

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

*Цель работы* – изучение внутреннего трения воздуха как одного из явлений переноса в газах.

### Теория метода

Явления переноса – это процессы установления равновесия в системе путем переноса массы (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены тепловым движением молекул.

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса от молекул из слоев потока, которые двигаются быстрее, к более медленным. Например, в случае протекания жидкости или газа в прямолинейной цилиндрической трубе (капилляре) при малых скоростях потока течение является ламинарным, т.е. поток газа движется отдельными слоями, которые не смешиваются между собой. В этом случае слои представляют собой совокупность бесконечно тонких цилиндрических поверхностей, вложенных одна в другую, имеющих общую ось, совпадающую с осью трубы.

Вследствие хаотического теплового движения молекулы непрерывно переходят из слоев и при столкновении с другими молекулами обмениваются импульсами направленного движения. При переходе из слоя с большей скоростью направленного движения в слой с меньшей скоростью, молекулы переносят в другой слой свой импульс направленного движения. В "более быстрый" слой переходят молекулы с меньшим импульсом. В результате первый слой тормозится, а второй – ускоряется. Опыт показывает, что импульс  $dP$ , который передается от слоя к слою через поверхность  $S$ , пропорционален градиенту скорости  $\frac{dv}{dr}$ , площади  $S$  и времени переноса  $dt$ :

$$dP = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot S \cdot dt.$$

В результате между слоями возникает сила внутреннего трения.

$$F_T = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \cdot \left| \frac{dv}{dr} \right| \cdot S, \quad (1.1)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости.

Для идеального газа

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \langle v_T \rangle,$$

здесь  $\rho$  – плотность газа;  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега молекул;

$\langle v_T \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул,  $v_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ ;  $\mu$  – молекулярная масса газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом  $r$  и длиной  $l$ , как показано на рисунке 1.1. Обозначим давления на его торцах  $P_1$  и  $P_2$ . При установившемся течении сила давления на цилиндр  $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2$  уравновесится силой внутреннего трения  $F_T$ , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа:

$$F - F_T = 0 \quad (1.2)$$

Сила внутреннего трения определяется по формуле Ньютона (1.1). Учитывая, что  $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$  и скорость  $v(r)$  уменьшается при удалении от оси трубы, т.е.  $\frac{dv}{dr} < 0$ , можно записать:

$$F_T = -\eta \frac{dv}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \quad (1.3)$$

В этом случае условие стационарности (1.2) запишется в виде:

$$(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2 + \eta \frac{dv}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l = 0 \quad (1.4)$$

Интегрируя это равенство, получим

$$v(r) = -\frac{R - P_2}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot r^2 + C,$$

где  $C$  – постоянная интегрирования, которая определяется граничными условиями задачи.

При  $r=R$  скорость газа должна обратиться в нуль, поскольку сила внутреннего трения о стенку капилляра тормозит смежный с ней слой газа. Тогда

$$v(r) = -\frac{R - P_2}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot (R^2 - r^2) \quad (1.5)$$

Подсчитаем объемный расход газа  $Q$ , т.е. объем, что протекает за единицу времени через поперечное сечение трубы. Через кольцевую площадку с внутренним радиусом  $r$  и внешним  $r+dr$  каждую секунду протекает объем газа  $dQ = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot v(r)$ . Тогда

$$Q = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v(r) \cdot dr = \pi \cdot \frac{R - P_2}{2 \cdot \eta \cdot l} \cdot \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr,$$

или

$$Q = \pi \cdot \frac{R - P_2}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot R^4 \quad (1.6)$$

Формулу (1.6), которая называется формулой Пуазейля, можно использовать для экспериментального определения коэффициента вязкости газа. Формула Пуазейля была получена в предположении ламинарного тече-

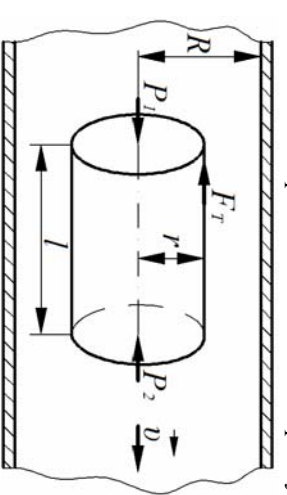


Рисунок 1.1 К расчету объемного расхода газа в случае течения его через капилляр

ния газа или жидкости. Однако с увеличением скорости потока движение становится турбулентным и слои смешиваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и направление, сохраняется только среднее значение скорости. Характер движения жидкости или газа в трубе определяется числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{v \cdot R \cdot \rho}{\eta}, \quad (1.7)$$

где  $v > v_c$  – средняя скорость потока;  $\rho$  – плотность жидкости или газа.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при  $R_e \approx 1000$ . Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо обеспечить выполнение условия  $R_e < 1000$ . Кроме этого, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений вдоль капилляра значительно меньше самого давления. В данной установке давление газа несколько больше атмосферного ( $10^3$  см вод. ст.), а перепад давлений составляет от  $\sim 10$  см вод. ст., т.е. приблизительно 1% от атмосферного.

Формула (1.6) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей (1.5) по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия  $R < L$ , где  $R$  – радиус;  $L$  – длина капилляра.

#### Экспериментальная установка

Для определения коэффициента вязкости воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ 1-1, общий вид которой изображен на рис. 1.2.

Воздух в капилляр 4 нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется реометром 5, а нужное его значение устанавливается регулятором "Воздух", который находится на передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра предназначен U-образный водяной манометр 6. Геометрические размеры капилляра – радиус  $R$  и длина  $L$  указаны на рабочем месте.

#### Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером "Сеть".
2. С помощью регулятора "Воздух" установить по показаниям реометра выбранное значение объемного расхода воздуха  $Q$ .
3. Измерить разность давлений  $\Delta P$  в коленах манометра. Значения  $Q$  и  $\Delta P$  занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ измерения	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\eta, \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$

4. Повторить измерения по пп. 2-3 для 5 значений объемного расхода воздуха.

5. Установить регулятор расхода воздуха на минимум, после чего включить установку тумблером "Сеть".

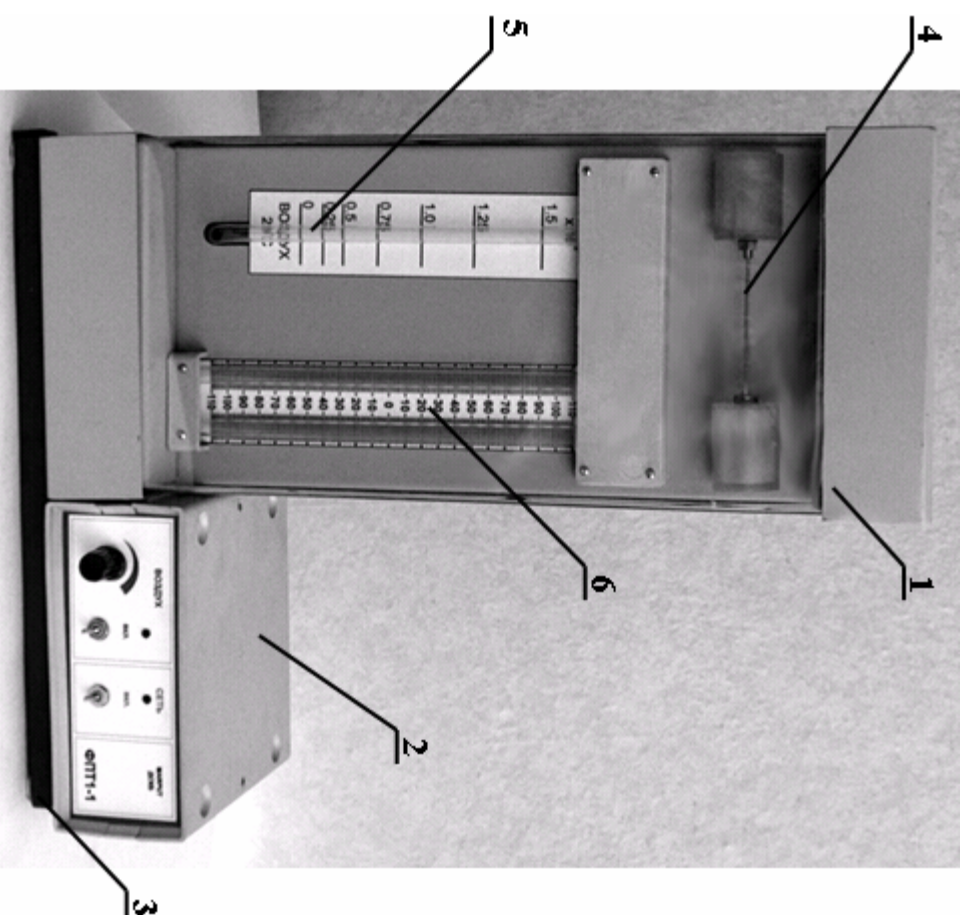


Рисунок 1.2 Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-1  
1 – блок рабочего элемента; 2 – блок приборов; 3 – стойка; 4 – капилляр;  
5 – реометр; 6 – манометр.

1. Для каждого режима определить по формуле Пуазейля коэффициент вязкости воздуха.

#### Обработка результатов измерений

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot Q \cdot h}.$$

Найти среднее значение коэффициента вязкости.

2. По формуле  $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$  вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха  $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$ , а универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{К)}$ .

3. По формуле  $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \cdot \langle v_T \rangle}$  вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. При этом плотность воздуха найти по табл. 1.1 для известных значений температуры и давления в лаборатории в процессе проведения эксперимента.

4. Оценить погрешность результатов измерения.

*Конитрольные задания*

1. Расскажите о явлениях переноса в газах.
2. Объясните явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
3. Напишите и объясните формулу Ньютона для внутреннего трения.
4. Какой физический смысл коэффициента вязкости? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
5. Напишите формулу для коэффициента вязкости идеального газа.
6. Какая величина называется средней скоростью теплового движения молекул идеального газа? От каких физических величин она зависит?
7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекул? От каких физических величин она зависит?
8. В чем заключается капиллярный метод определения коэффициента вязкости газов?
9. Выведите формулу Пуазейля. При каких условиях ее применяют?
10. Как изменяется скорость движения газа по радиусу канала при ламинарном режиме течения
11. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул газа, используя явление внутреннего трения в газах?
12. Почему при строительстве магистральных газопроводов используют трубы большого диаметра, а не увеличивают давление газа при его транспортировании.