Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Определение коэффициента вязкости воздуха ФПТ 1-1н

Методические указания
к лабораторной работе №123А
по дисциплине «Физика»

Уфа-2016

Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

Цель работы - изучение внутреннего трения воздуха как одного из явлений переноса в газе.

Теория метода

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

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса 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 слон 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 слоя в слой 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 поверхностьS, 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.

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

Где η– коэффициент вязкости.

Для идеального газа

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot < \lambda > \cdot < v_T >$$

Здесь ρ -плотность газа; $< \lambda >$- средняя длина свободного пробега молекул; $< v_T >$- средняя скорость теплового движения молекул, $v_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$; μ – молекулярная масса газа, ρ - универсальная газовая постоянная.

Выделим воображаемый коаксиальный цилиндрический объём жидкости радиуса r и длинны l внутри капилляра (рис. 1.1). При стационарном течении этот объем движется без ускорения. В направлении движения на жидкость действует сила давления $F_1 = p_1\pi r^2$. Во встречном направлении сила давления равна $F_2 = p_2\pi r^2$. Результирующая сил давления имеет модуль:

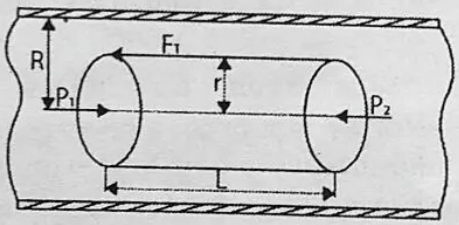

Рис. 1.1

$$F = (p_1 - p_2)\pi r^2 \qquad (1.2)$$

На боковую поверхность действует тормозящая сила внутреннего трения:

$$F = \eta \left|\frac{dv}{dr}\right| 2\pi rl = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi rl \qquad (1.3)$$

Скорость убывает с увеличением расстояния от оси трубы: $\frac{dv}{dr} < 0$

Модуль скорости ее убывания равен $-\frac{dv}{dr}$. Из формулы 1.2 и 1:3 следует, что:

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi rl$$

Или

$$dv = -\frac{(p_1 - p_2)}{2\eta l} \cdot rdr$$

После интегрирования последнего равенства получим формулу для вычисления скорости овившегося течения жидкости в трубе:

$$v = -\frac{(p_1 - p_2)}{2\eta l} \cdot \frac{r^2}{2} + C$$

Постоянную интегрирования C определим из условия, что скорость жидкости у стенок обращается в ноль (условие прилипая $r = R, v = 0$):

$$C = \frac{(p_1 - p_2)}{2\eta l} \cdot \frac{R^2}{2}$$

Тогда

$$v(r) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta l}(R^2 - r^2) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta l} R^2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

На оси трубы

$$v(0) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta l} R^2$$

Следовательно,

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

Итак, скорость с расстоянием от оси г трубы при ламинарном течении жидкости меняется раболическому закону.

Вычислим поток жидкости Q, то есть объем жидкости, протекающий через поперечное ие трубы в единицу времени. Разобьём мечение трубы на кольцевые зоны. Тогда, объём ости, протекающий в единицу времени через элементарное сечение трубы $2\pi r dr$, равен:

$$dQ = \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr$$

Интегрируя данное дифференциальное уравнение, получим искомое значение потока ости Q:

$$Q = \int_0^R v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr = \frac{v_0 \pi R^2}{2} = \frac{1}{2} S v_0$$

Или с учетом выражения для скорости v_0 получим окончательно:

$$Q = \frac{1}{2} S \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta l} R^2 = \frac{(p_1 - p_2)\pi R^4}{8\eta l} \quad (1.4)$$

Полученная формула (1.4) называется формулой Пуазейля. Поток Q сильно зависит от са трубы R, от перепада давления на единицу ее длинны. Он обратно пропорционален фициенту вязкости η.

Формула Пуазейля используется для определения величины коэффициента вязкости η сти и газов. Пропуская жидкость или газ через трубку известного радиуса, измеряют ад давления и поток Q. На основе полученных данных вычисляют значение η. Ламинарное ие является стационарным. При больших скоростях течение становится нестационарным – сть частиц в каждой точке пространства все время беспорядочно изменяется. Такое течение ают турбулентным. Формула Пуазейля не применяется к турбулентным течениям.

Формула Пуазейля была получена в предположении ламинарного течения газа или сти. Однако с увеличением скорости потока движение становится турбулентным и слои ваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и вление, сохраняется только среднее значение скорости. Характер движения жидкости или трубе определяется числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\langle v \rangle \cdot R\rho}{\eta} \quad (1.5)$$

Где $< v >$ - средняя скорость потока, ρ - плотность жидкости или газа.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному ходит при $R_e \approx 1000$. Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо ечить выполнение условия $R_e < 1000$. Кроме этого, эксперимент необходимо проводить образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда

перепад давлений вдоль капилляра значительно меньший самого давления. В данной установке давление газа несколько больше атмосферного 9,8 кПа, а перепад давлений составляет от ~ 0,098 кПа, т.е. приблизительно 1 % от атмосферного.

Формула (1.4) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входов 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 1-1н, общий вид которой изображен на рис. 1.2.

Воздух в капилляр 4 нагнетается микропроцессором, размешенным в приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется специальным датчиком $AWM3300V$ (0 ÷ 1 л/мин), и результаты отображаются цифровым измерителем, а необходимое его значение устанавливается регулятором "Воздух", который находится на передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра используется дифференциальный датчик $MPX5010$ (до 10 кПа) и результаты отображаются цифровым измерителем.

Типовые геометрические размеры капилляра — радиус R и длина L указаны на рабочем месте.

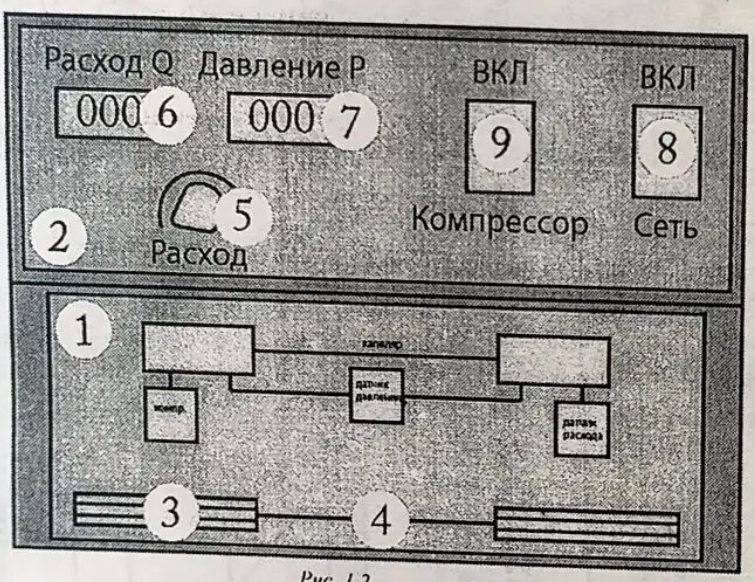

Рис. 1.2

1 – блок рабочего элемента; 2 – блок приборный; 3 – пневмо-камера; 4 – капилляр; 5- регулятор расхода; 6 – измеритель расхода; 7 – измеритель перепада даления;8 – включатель сети; 9 – включатель компрессора.

Технические характеристики прибора ФПТ1-1н:

Расход воздуха через рабочий элемент от $1{,}6 \times 10^{-6}$ м^3/с до $11{,}7 \times 10^{-6}$ м^3/с (0,1 л/мин до 0,7 л/мин).

Перепад давления на рабочем элементе не более 5 кПа.

Размеры капилляра рабочего элемента: длина $l = 0{,}1$ м; $\delta l = 2\%$; диаметр $r_0 = 0{,}95$ мм; $\delta r_0 = 2\%$ — уточняется при регулировке и указывается на рабочем месте (задней стенке блока приборного).

Погрешность определения коэффициента вязкости воздуха при расходе через капилляр $0{,}75 \times 10^{-5}$ м^3/с не более 15%.

Питание установки от сети переменного тока: напряжение, В; частота, Гц 50±1

Порядок выполнения работы

1. Подать на установку питание, включив в приборном модуле переключатель «СЕТЬ». При этом в модуле рабочего элемента загорается переменная подсветка (зеленого свечения), указывающая на подачу питания.
2. Включить в приборном модуле переключатель «КОМПРЕССОР». При этом в модуле рабочего элемента загорается переменная подсветка (красного свечения), указывающая на то, что микропроцессор начал прокачку капилляра с минимально возможным расходом воздуха.
3. Плавно вращая по часовой стрелке регулятор «РАСХОД» установить по показаниям расходомера выбранное значение объемного расхода воздуха Q.
4. Снять соответствующие показания с измерителя разности давлений ΔP в кПа. Значения Q и ΔP занести в табл. 1.1.

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

Табл. 1.1

5. Повторить измерения по пп. 2-3-4 для 5 значений объемного расхода воздуха в диапазоне от 0,1-0,7 л/мин.
6. Установить регулятор расхода воздуха на минимум и выключить «КОМПРЕССОР». После выключить установку тумблером "СЕТЬ".

Обработка результатов измерений

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

$$\eta = \frac{\pi \cdot r_0^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot Q \cdot L}$$

Найти среднее значение коэффициента вязкости.

2. По формуле $< v_T >= \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха μ =0,029 кг/моль, универсальная газовая постоянная R =8,31 Дж/К.
3. По формуле $< \lambda >= \frac{3\eta}{\rho \cdot < v_T >}$ вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. При этом плотность воздуха найти по табл. 1.1 для известных значений температуры и давления лаборатории в процессе проведения эксперимента.
4. Оценить погрешность результатов измерения.

Контрольные задания

1. Расскажите о явлениях переноса в газах.
2. Объясните явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической.
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 он зависит?
7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекулы? От каких физических величин она зависит?
8. В чем заключается капиллярный метод определения коэффициента вязкости?
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 молекулы 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.