

Задорожный Н.А., Инфимовский Ю.Ю.

*Методическое руководство к лабораторной  
работе Т-103*

**Определение вязкости воздуха  
методом Пуазейля**

Москва 2024 г.

# Определение вязкости воздуха методом Пуазейля

## 1. Цель лабораторной работы

Цель данной работы заключается в изучении установившегося течения вязкой газа по трубке круглого сечения.

## 2. Задачи лабораторной работы

Задачей работы является определение коэффициента динамической вязкости воздуха при ламинарном истечении воздуха через узкий и длинный капилляр.

## 3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

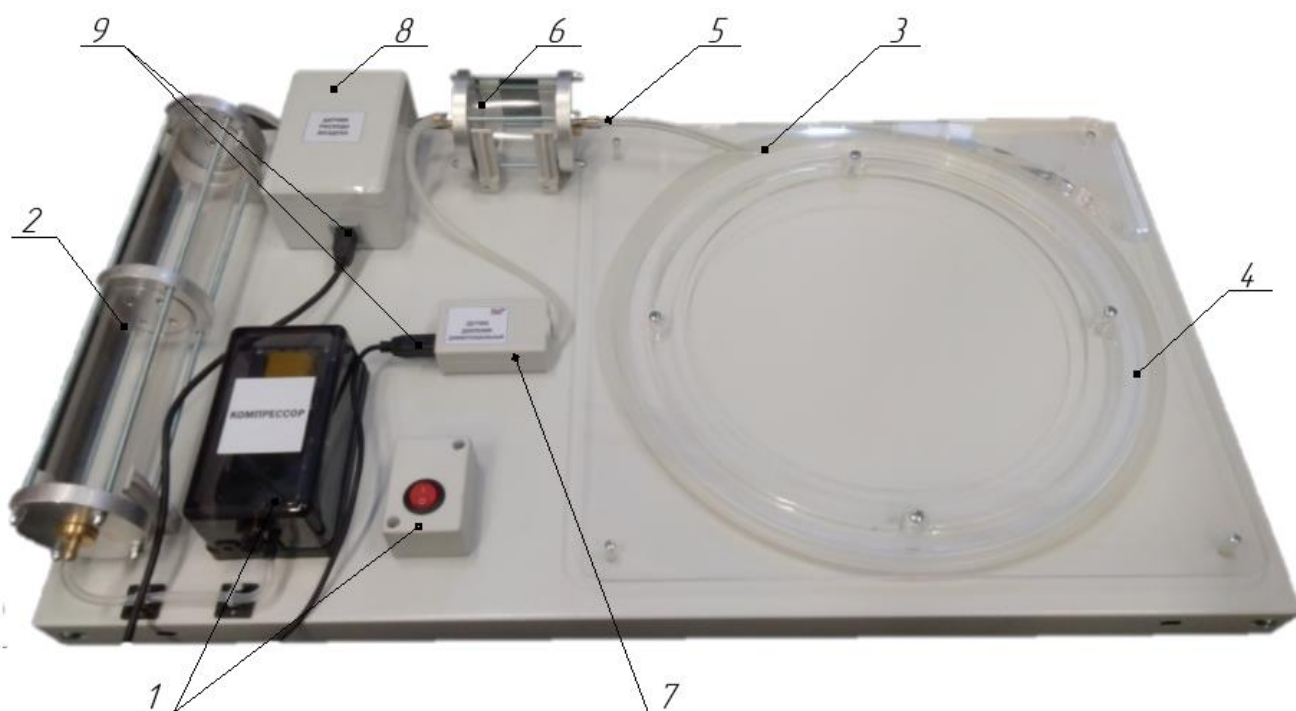


Рис. 1

Лабораторная установка (рис. 1) включает смонтированные на единой платформе воздушный компрессор с клавишей его запуска 1, ресивер 2 для

выравнивания давления воздуха, качаемого компрессором, свернутую в кольца трубку длиной  $l = 3,0$  м и диаметром 2,0 мм (капилляр) 3, выходное сечение 4 которого сообщается с окружающим воздухом. Входное сечение капилляра 5 соединено с воздушной камерой 6 с большим, по сравнению с капилляром, поперечным сечением. При этом полное давление в такой камере за счет малой скорости воздушного потока практически равно статическому. Падение давления между воздушной камерой 6 и окружающей атмосферой измеряется дифференциальным датчиком давления 7. Датчик расхода воздуха 8 установлен между ресивером и воздушной камерой. Сигналы от датчиков через USB-разъемы 9 подаются на соответствующие входы в компьютер (на рисунке не показан).

#### 4. Теоретическая часть

В данной работе изучается вязкость (внутреннее трение) жидкости при ламинарном течении. *Вязкостью* называется свойство жидкости сопротивляться сдвигу или скольжению одних слоев жидкости относительно других.

Определение вязкости вытекает из известной формулы Ньютона, устанавливающую зависимость силы трения  $F_{mp}$  между параллельно движущимися слоями жидкости (газа) от их контактной площади  $S$  и градиента скорости между слоями:

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dy} \right| S \quad (1)$$

Отсюда можно дать определение коэффициента вязкости:

*Коэффициент динамической вязкости численно равен силе вязкости, возникающей между соприкасающимися слоями жидкости, отнесенной к единице площади соприкосновения, при градиенте скорости, равном единице.*

Коэффициент динамической вязкости  $\eta$  в СИ измеряется в Н·с/м<sup>2</sup> или в Па·с.

Для газов  $\eta$  зависит от температуры. Для воздуха при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении  $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па коэффициент вязкости  $\eta = 1,72 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Ниже в табл. 1 приведены значения коэффициента вязкости воздуха вблизи комнатной температуры.

Таблица 1.

$t, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30
$\eta, 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$	1,743	1,767	1,789	1,814	1,837	1,861

### ***Ламинарное и турбулентное течения***

*Ламинарное (слоистое) течение* – такое течение жидкости или газа, при котором жидкость (газ) перемещается слоями, параллельными направлению течения.

С увеличением скорости ламинарное течение может перейти в неупорядоченное *турбулентное течение*, при котором резко изменяется сила сопротивления движению и в жидкости (газе) возникают завихрения, слои перемешиваются.

Характер движения газа (или жидкости) в трубке определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{vR\rho}{\eta}, \quad (2)$$

где  $v$  – средняя скорость течения жидкости в трубке,  $\rho$  – плотность жидкости,  $R$  – радиус трубы,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от вида течения, коэффициента вязкости жидкости, температуры, давления. При значениях числа Рейнольдса  $\text{Re} < 1000$  течение ламинарное, а при  $\text{Re} > 1000$  совершается переход от ламинарного течения к турбулентному.

### ***Формула Пуазейля***

Рассмотрим течение жидкости (газа) в трубке круглого сечения радиуса  $R$ .

Выделим воображаемый цилиндрический объем радиуса  $r$  и длины  $l$  (рис. 2).

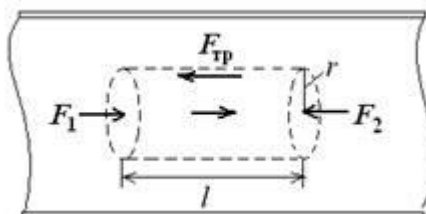


Рис. 2

На торцах сумма сил давления равна:

$$F_1 - F_2 = (p_1 - p_2)S_{осн} = (p_1 - p_2)\pi r^2$$

На боковую поверхность цилиндра действует сила трения:

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S_{бок} = F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r l.$$

Для стационарного (установившегося) течения действует условие равновесия сил:

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r l.$$

Отсюда:

$$-\frac{dv}{dr} = \frac{(p_1 - p_2)r}{2\eta l}.$$

Знак минус учитывает, что скорость уменьшается по мере удаления от оси трубы. Разделив переменные, и проинтегрируем, учитывая граничные условия – равенство нулю скорости при  $r = R$ . Тогда получим зависимость скорости слоя от его расстояния до оси трубы:

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

В ламинарном течении скорость слоев жидкости (газа) изменяется с расстоянием от оси трубы по параболическому закону (рис. 3).

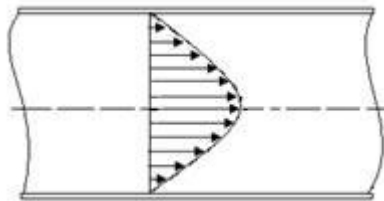


Рис. 3

Вычислим расход жидкости  $Q$ , т.е. объем жидкости, протекающей через поперечное сечение трубы за единицу времени. Если выделить в поперечном сечении трубы кольцо шириной  $dr$ , то расход через него равен:

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

Для нахождения потока  $Q$  через трубу радиуса  $R$  проинтегрируем это выражение по  $r$  в пределах от нуля до  $R$ , откуда:

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)\pi R^4}{8\eta l}$$

Эта формула называется *формулой Пуазейля*. Формула Пуазейля справедлива только для ламинарного течения жидкости (газа).

Отсюда можно найти коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2)\pi R^4}{8Ql}$$

Если положить для рассматриваемых условий эксперимента давление на входе капилляра, равным  $p$ , а атмосферное давление обозначить, как  $p_0$ , то расчетная формула для оценки коэффициента динамической вязкости приобретет вид:

$$\eta = \frac{(p - p_0)\pi R^4}{8Ql} \quad (3)$$

Из молекулярно-кинетической теории для идеальных газов можно вывести соотношения между измеряемыми макропараметрами газового состояния – давлением, температурой, коэффициентом вязкости и эффективным диаметром молекул. Так коэффициент вязкости можно определяется, как:

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

где  $\rho$  - плотность газа,  $\langle V \rangle$  - средняя арифметическая скорость газа,  $\langle \lambda \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекул.





Учитывая, что  $\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_0 d_{эф}^2}$ ,  $\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$  и  $\rho = n_0 m_0 = n_0 \frac{\mu}{N_A}$ ,


где  $n_0$  – концентрация молекул, получим выражение для эффективного диаметра  $d_{эф}$ :

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{2\sqrt{\mu RT}}{3\pi\sqrt{\pi\eta N_A}}} \approx 0,35 \sqrt{\frac{\sqrt{\mu RT}}{\eta N_A}} \quad (4)$$

Здесь  $\mu$  – молярная масса газа (кг/моль),  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная,  $T$  – термодинамическая температура (К),  $N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости. Для воздуха с температурой 20°C:  $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $T = 293$  К.

## 5. Порядок проведения лабораторной работы

1. Подключите датчик расхода воздуха и дифференциальный датчик давления к USB – входам компьютера.
2. После включения компьютера запустите программу «Практикум по общей физике». В открывшемся интерфейсе программы появятся диалоговые окна датчиков. Первое окно – показания датчика расхода воздуха  $Q$  (см<sup>3</sup>/с) как функции от времени  $t$  (с). Второе окно – показания дифференциального датчика давления  $(p-p_0)$  (кПа) как функции от времени  $t$  (с). Если датчики включены впервые, то автоматический процесс установки драйверов устройств займет некоторое время.
3. В автоматически появившемся окне меню эксперимента (вручную его можно вызвать кнопкой ) установите соответствующий сценарий проведения эксперимента, выбрав последовательно «Молекулярная физика» - «Определение коэффициента вязкости воздуха». Компрессор при этом должен быть выключен, чтобы датчики корректно настроились на работу.
4. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения» (Ctrl+S) .
5. Включите компрессор и, вращая регулятор подачи воздуха против часовой стрелки, установите максимальное избыточное давление и скорость потока газа в системе.
6. Дождитесь, когда показания датчиков примут стабильные значения, и остановите измерения, нажав на кнопку (Ctrl+T) .
7. Установите курсор мыши на ровный участок графика давления и, нажав левую кнопку мыши, зафиксируйте в этой точке жёлтый вертикальный маркер (он появляется синхронно во всех окнах регистрации).
8. Нажмите в любом из окон кнопку  (находится в правом верхнем углу окна) - отмеченные маркером значения давления и расхода будут отправлены в таблицу обработки.

9. Вернитесь к регистрации измерений, начав новый сбор данных. На вопрос программы об очистке накопленных данных следует ответить отрицательно.
10. Повторите измерения по п.п. 6-9, постепенно снижая давление в системе вращением регулятора компрессора по часовой стрелке. Добавьте еще 5 - 6 экспериментальных точек в таблицу обработки.
11. Перейдите на вкладку «График» окна Обработки данных. В верхнем левом углу выберите из выпадающего списка тип функции  $Y=A*X$ . Нажмите кнопку  - на экране будет построен график выбранной аппроксимирующей функции и появится уравнение этой функции.
12. Пересчитайте полученный угловой коэффициент аппроксимирующей прямой  $A$  в соотношение  $\tilde{A} = \frac{Q}{p - p_0}$ , учитывая то, что размерности расхода и давлений, в которых проградуированы датчики лабораторной установки, не соответствуют основным единицам размерностей СИ. Используя пересчитанное значение углового коэффициента  $\tilde{A}$ , получите значение динамической вязкости воздуха по формуле:

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8 \tilde{A} l}$$

13. Используя формулу (4), найдите значение эффективного диаметра молекул воздуха  $d_{\text{эф}}$ .



## 6. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

## 7. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Что называется коэффициентом динамической вязкости?
3. Опишите лабораторную установку и ход эксперимента.
4. Запишите расчетную формулу и поясните физический смысл входящих в нее величин.
5. Поясните физический смысл коэффициента вязкости и от чего он зависит?
6. Назовите виды течения вязкой жидкости (газа). Напишите формулу Рейнольдса для течения потока в круглой трубе.
7. Выведите формулу Пуазейля и исследуйте ее.
8. Выведите расчетную формулу.
9. Найдите величину соотношения коэффициентов  $\tilde{A}/A$ .
10. По значению максимального давления определите скорость истечения воздуха в капилляре. Оцените величину числа Рейнольдса и сделайте вывод о характере течения воздуха в капилляре.