

КАЛМЫЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей физики

Лабораторная работа № 11

*«Определение вязкости жидкости по скорости
истечения через капилляр»*

Лаборатория № 211

**«Определение вязкости жидкости по скорости
истечения через капилляр»**

Цель работы: определение вязкости воды по формуле Пуазейля.

Приборы и принадлежности: сосуд Мариотта, капиллярная трубка, мензурка, секундомер, стакан, штангенциркуль, радиус капиллярной трубки $R = 1,15$ мм, длина капиллярной трубки $l = 10,6$ см.

Т е о р и я

Рассмотрим стационарный поток жидкости, ламинарно текущий через капилляр круглого сечения (Рис. 1).

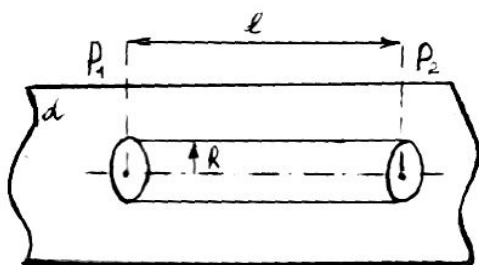


Рис. 1.

Мысленно выделим в жидкости цилиндр радиуса r и длины l . Обозначим давление на его торцах P_1 и P_2 . В стационарных условиях сила давления на цилиндр $(P_1 - P_2)\pi r^2$ уравновешивается силой трения, действующей на цилиндр со стороны наружных слоев жидкости. Эта сила равна

$$F_{mp} = S \eta \frac{dv}{dr},$$

где S - поверхность цилиндра, η - вязкость, dv/dr - градиент скорости. Заменяя S - через $2\pi Rl$ и приравнивая к нулю сумму сил, действующих на цилиндр, получим

$$(P_1 - P_2)\pi R^2 + 2\pi Rl \eta \frac{dv}{dr} = 0.$$

Интегрируя это равенство,

$$v = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C,$$

где C - константа интегрирования, которая должна быть найдена из граничных условий. Чтобы найти ее, заметим, что скорость жидкости обращается в

нуль при радиусе трубки R , где жидкость «прилипает» к стенкам. Имеем, следовательно

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (1)$$

Таким образом, скорость жидкости квадратично меняется с радиусом и максимальна на оси трубки (при $r = 0$).

Расход жидкости Q , т.е. объем, ежесекундно протекающий через поперечное сечение трубки, равен

$$Q = \frac{V}{t} = \int_0^R v 2\pi r dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4. \quad (2)$$

Формула (2) носит название 'формулы Пуазейля. Она показывает, что вязкость жидкости можно определить, измеряя ее расход Q , перепад давления $P_1 - P_2$, длину трубки l и ее радиус R .

Прежде чем применять формулу Пуазейля, к конкретным расчетам, всегда следует убедиться в том, что течение жидкости является ламинарным. В реальной жизни мы редко встречаемся с ламинарным течением. Движение воды в водопроводе и в реке, движение воздуха в атмосфере практически всегда оказывается турбулентным. Разделить эти два режима можно, исследуя зависимость расхода от давления. При ламинарном течении расход пропорционален давлению, а при турбулентном - корню квадратному из него. Характер течения жидкости зависит от числа Рейнольдса Re , которое определяется с помощью формулы

$$Re = vR\rho / \eta, \quad (3)$$

где v - скорость потока, R - радиус трубки, ρ - плотность жидкости, η - ее вязкость. В гладких трубках круглого сечения течение имеет ламинарный характер, если $Re < 1000$. Ламинарное движение жидкости при переходе ее из широкого сосуда в капилляр устанавливается не сразу, а после того, как она пройдет расстояние a :

$$a \approx 0,2 R \cdot Re. \quad (4)$$

Формула (2) дает надежные результаты лишь в том случае, если длина капилляра во много раз больше a .

Описание установки

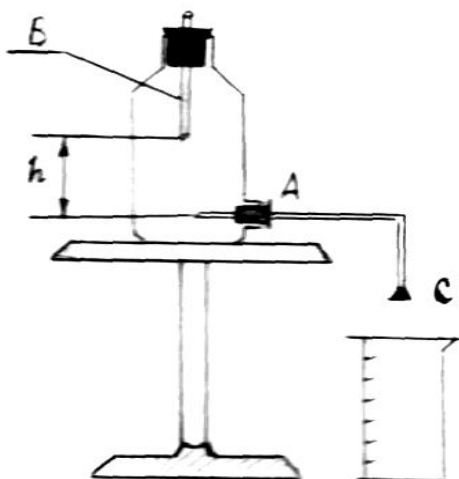


Рис. 2.

Установка, для измерения вязкости воды изображена на рис. 2. Вода заполняет сосуд Мариотта и вытекает через калиброванную капиллярную трубку, укрепленную в нижней части его боковой стенки. Сосуд Мариотта позволяет, поддерживая постоянным перепад давления $P_1 - P_2$ на концах капилляра.

Величина этого перепада определяется высотой столба жидкости между осью капилляра и нижним концом вертикальной трубки B , вставленной в сосуд Мариотта.

Следует обратить внимание на то, что перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$ между концами капилляра, выраженный в миллиметрах водного столба, не равен h , а содержит постоянную поправку Δh , и обусловленную силами поверхностного натяжения. Высоту Δh можно измерить следующим образом. Снимите с капиллярной трубки резиновую пробку C : при этом вода начнет вытекать в химический стакан. Подождите, пока на нижнем конце не появятся пузырьки воздуха. Затем, постепенно опуская трубку B , оставьте ее на такой высоте Δh , при которой вода перестает вытекать из капилляра. Это значит, что давление столба воды Δh между осью капилляра и нижним концом трубки B уравновесилось силами поверхностного натяжения пузырька, возникшего на концах трубки B . При этом измеряется длина выступающей части трубки B и относительно ее значения определяется h .

Объем вытекшей жидкости измеряется мензуркой. Время истечения

определяется по секундомеру. Длина капиллярной трубки измеряется штангенциркулем, диаметр капилляра равен 2,3 мм.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину капиллярной трубки штангенциркулем.
2. Вставьте капиллярную трубку в боковое отверстие A сосуда Мариотта, уплотнив соединения резиновой пробкой (рис.2). Закройте капиллярную трубку резиновой пробкой C . Налейте дистиллированную воду и плотно закройте горловину пробкой со вставленной в нее трубкой B .
3. Снимите с капиллярной трубки пробку C : при этом вода начнет вытекать в мензурку. Подождите пока на нижнем конце трубки B не появятся пузырьки воздуха. После этого, опустите трубку B , оставив ее на такой высоте, при которой вода перестанет вытекать из капилляра. Измерьте высоту h_0 выступающей части трубки B штангенциркулем.
4. Поднимите трубку B - $\Delta h = h - h_0$ на 3 см. Подождите некоторое время после того, как начнет вытекать вода и в сосуде установится распределение давления и можно приступить к измерению расхода воды.
5. Замерьте по секундомеру время Δt , в течение которого мензурка будет заполнена до объема 50-60 см³. Разность давлений на концах капилляра будет $\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h_0$. В первом измерении $\Delta h = 3$ см. Измерьте расход воды при 4-5 значениях Δh , вплоть до максимального, определяя каждый раз Δh с помощью штангенциркуля ($\Delta h = h - h_0$). Вычислите для каждого значения Δh вязкость воды по формуле (2).
6. Проверьте при помощи формулы (3), что в каждой из опытов в капилляре устанавливалось ламинарное течение. По формуле (4) оцените длину участка капилляра, на которой устанавливается ламинарное течение. Для оценки числа Re и a можно предварительно принять, что вязкость воды $\eta = 0,01$ П (пуаза).
7. Изобразите полученные результаты на графике, отложив по его осям

h и Q . Формула (2) показывает, что при ламинарном течении зависимость между h и Q линейна. При нарушении ламинарности разность давлений растет быстрее, чем расход. Поэтому для определения η пригоден только прямолинейный участок графика. Вязкость находится по наклону этого участка. Затем, что при таком способе определения η нет надобности определять высоту h_0 (величина h_0 отсекается прямой $Q(h)$ на оси h при $Q = 0$). Определите вязкость воды и оцените погрешность полученного результата. Сравните найденные из графика значения h_0 со значением, измеренным в п. 5.

Контрольные вопросы

1. Какое течение жидкости называется ламинарным? Турбулентным?
2. Какая величина характеризует течение жидкости?
3. Как распределена скорость слоев жидкости по сечению канала при установившемся течении?
4. Какая сила называется силой внутреннего трения?
5. Какова причина ее возникновения в жидкости?
6. В чем состоит закон Пуазейля?
7. Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости? Градиента скорости?
8. Как определить перепад давления на концах капиллярной трубки?

Л и т е р а т у р а

1. И.В.Савельев. Курс общей физики. т.1, М., 1973, с. 73-78, 320-322, 351-364, 375-384.
2. Л.Д.Ландау, А.И.Ахиезер, Е.М.Лифшиц. Механика и молекулярная физика. М., 1969, §119.
3. Л.Л.Гольдин и др. Лабораторные занятия по физике. М., 1983, 170-172.

Примечание

1. В п.5 для определения вязкости воды следует воспользоваться формулой (2)

$$Q = \frac{V}{t} = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4,$$

$$\eta = \frac{\pi (P_1 - P_2) R^4 t}{8Vl} = \frac{\pi \rho g \Delta h R^4 t}{8Vl},$$

где V - объем вытекшей воды в м^3 за время t .

2. Во втором случае, при определении из графика, уравнение (2) можно переписать в виде

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \rho g R^4}{8\eta l} (h - h_0) = \frac{\pi \rho g R^4}{8\eta l} h - \frac{\pi \rho g R^4}{8\eta l},$$

где $Q = bh - bh_0$ - линейная зависимость от h . Здесь буквой b обозначена по-

стоянная величина $b = \frac{\pi \rho g R^4}{8\eta l}$ - угловой коэффициент линейной функции $Q(h)$.

График будет выглядеть следующим образом (рис.3).

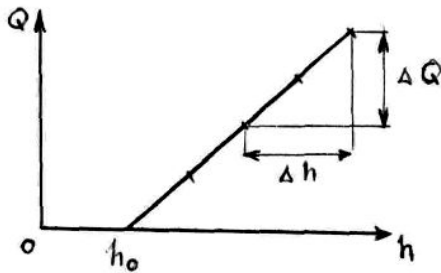


Рис. 3.

Значение b можно определить из графика:

$$b = \Delta Q / \Delta h.$$

Определив таким образом b , можно найти η :

$$\eta = \frac{\pi \rho g R^4}{8bl}.$$