

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
<<МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА>>

Н. П. Полуэктов, Ю. П. Царьгородцев, И. И. Усатов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса

Москва 2015

Лабораторная работа № 13

Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса

Цель работы: изучение явления внутреннего трения в жидкости и измерение коэффициента вязкости жидкости по скорости падения в ней шарика.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При движении жидкости между слоями возникают силы внутреннего трения, которые стремятся уровнять скорости всех слоев жидкости.

Пусть два ближайших слоя жидкости, находящихся на расстоянии Δz друг от друга, движутся по оси X с различными скоростями, отличающимися на величину ΔV (рис.1). Тогда на площадку ΔS между этими слоями будет действовать сила внутреннего трения (вязкости), величина которой равна:

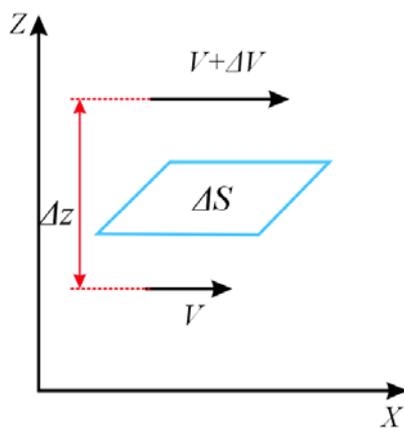


Рис.1

$$F = \eta \frac{\Delta V}{\Delta z} \Delta S \quad (1)$$

где η – так называемый **динамический коэффициент внутреннего трения** или просто **коэффициент вязкости**, значение которого зависит от свойств жидкости и от температуры. $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ – так называемый **поперечный градиент скорости**, он показывает, как изменится скорость потока в направлении оси Z .

Решая уравнение (1) относительно η , находим:

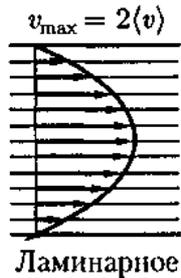
$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta V}{\Delta z} \Delta S} \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент внутреннего трения численно равен силе, действующей на единицу площади при градиенте скорости, равном единице. Размерность коэффициента внутреннего трения в системе СИ следующая:

$$[\eta] = \left[\frac{Hc^2}{m^2} \right] = Pa \cdot c = 10 \text{ Пуаз} \quad (3)$$

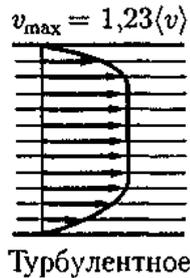
Единица коэффициента внутреннего трения в системе СИ – пуаз. Один пуаз равен 0,1 Па·с.

Коэффициент вязкости является одной из важнейших характеристик смазочных материалов. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей с увеличением температуры уменьшается. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. На пример, вязкость касторового масла в интервале 18 — 40 °С падает в четыре раза жидкостей. Течение называется **ламинарным** (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и **турбулентным** (вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа). Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы. При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы,



Ламинарное

Рис.2



Турбулентное

затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.

Профиль усредненной скорости при турбулентном течении в трубах (рис. 2) отличается от параболического профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения. Характер течения зависит от безразмерной величины, называемой **числом Рейнольдса**:

$$Re = \frac{\rho \langle V \rangle d}{\eta} \quad (4)$$

где ρ — плотность жидкости; $\langle V \rangle$ — средняя по сечению трубы скорость жидкости; d - характерный линейный размер, например, диаметр трубы или как в данной работе диаметр шарика. ; При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области а при $Re = 2300$ (для гладких труб) течение турбулентное. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей в трубах разных сечений одинаков.

Существует много способов определения коэффициента вязкости. Одним из наиболее простых и распространенных является способ,

основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости, который получил название **метода Стокса**.

Методика эксперимента

Для определения коэффициента динамической вязкости жидкости в работе используется метод Стокса, основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости. Стокс установил, что при небольших скоростях движения, то есть при малых значениях числа Рейнольдса, сила сопротивления, с которой действует жидкая среда на движущееся в ней твердое тело, пропорциональна коэффициенту динамической вязкости жидкости η , скорости v движения тела относительно жидкости и характерному размеру тела l . Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара, если в качестве l взять радиус шара r , коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi\eta r v \quad (5)$$

Формула (5) получена в предположении, что расстояние от тела до границ жидкости, в данном опыте до стенок сосуда, значительно больше размеров тела $r \ll R$.

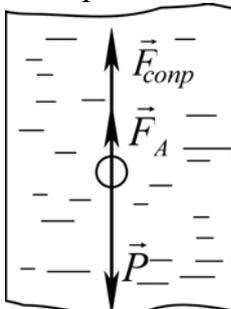


Рис.3.

На падающий в жидкости шарик действуют три силы (рис. 3):

– сила сопротивления среды $F_{\text{сопр}}$, определяемая (5),

– сила тяжести

$$P = mg = \rho_1 \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (6)$$

– выталкивающая сила Архимеда:

$$F_A = \rho_2 \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (7)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности материала шарика и жидкости соответственно.

Второй закон Ньютона для падающего шарика запишется в виде:

$$P - F_A - F_{\text{сопр}} = m \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

Вначале движение шарика будет ускоренным $\frac{dV}{dt} > 0$, но так как сила сопротивления согласно формуле Стокса увеличивается с увеличением скорости падения, то при некоторой скорости V_0 левая и правая части

уравнения движения (8) обратятся в нуль, и движение шарика станет равномерным

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (9)$$

Параметры установки подобраны таким образом, чтобы движение шарика установилось, когда он при своем падении достигнет верхней метки (рис. 4). Тогда скорость равномерного движения определяется из соотношения:

$$V_o = \frac{h}{t} \quad (10)$$

где h и t – расстояние между верхней и нижней метками и время, за которое это расстояние пройдено.

Подставляем выражение для сил (5) – (7) в уравнение (8) и при условии (9) получим:

$$\rho_1 \frac{4}{3} \pi r^3 g - \rho_2 \frac{4}{3} \pi r^3 g - 6\pi\eta r V_o = 0 \quad (11)$$

откуда с учётом (10) находим коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) g r^2 t}{h} \quad (12)$$

Таким образом, определение коэффициента динамической вязкости жидкости сводится к измерению радиуса шарика и скорости его равномерного падения в жидкости, плотности материала шарика и жидкости считаются известными.

Описание установки

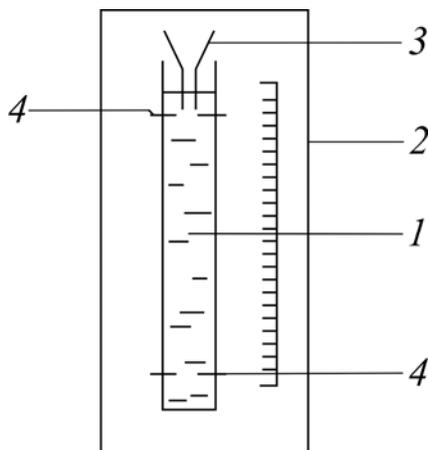


Рис.4. Схема установки.

Для проведения опыта используют цилиндрический стеклянный сосуд, заполненный глицерином или любой другой жидкостью с явно выраженными свойствами вязкости, шарики малых размеров, микрометр, масштабную линейку с миллиметровыми делениями, пинцет, термометр. Схема установки представлена на рис. 4.

На цилиндрической части сосуда нанесены две кольцевые метки – верхняя и нижняя. Расстояние между ними определяется по масштабной линейке. В верхней части сосуда установлена воронка, обеспечивающая падение шарика вдоль оси цилиндра.

Цилиндрический сосуд заливается испытываемой жидкостью выше уровня верхней метки.

Порядок выполнения работы

1. Установите плотности материала шариков ρ_1 и жидкости ρ_2 .
2. Измерьте с помощью масштабной линейки с точностью до 1 мм расстояние h между метками на цилиндрическом сосуде.
3. С помощью термометра определите температуру, при которой проводится измерение коэффициента вязкости жидкости.
4. Измерьте микрометром диаметр каждого шарика в трех различных местах. Определите среднее значение его радиуса.
5. Пинцетом опустите шарик, не сообщая ему начальной скорости, в воронку и наблюдайте за ним. При прохождении шариком верхней метки включите секундомер, при прохождении нижней выключите его.

Задание 1. Определение коэффициента вязкости жидкости

1. Запишите значения $\rho_1 = \dots$, $\rho_2 = \dots$, $t^\circ = \dots^\circ\text{C}$ и $h = \dots\text{м}$ согласно пунктам 1, 2, 3 порядка выполнения работы.
2. Выполните пункты 4, 5 порядка выполнения работы для 5–7 шариков. Результаты всех измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7
$r, \text{м}$							
$r^2, \text{м}^2$							
$t, \text{с}$							
$t^2, \text{с}^2$							

Вычислите средние значения

$$\langle t \rangle =$$

$$\langle r \rangle =$$

$$\langle t^2 \rangle =$$

$$\langle r^2 \rangle =$$

$$\text{и } S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}{n-1}}$$

$$S_{\langle t \rangle} =$$

$$S_{\langle r \rangle} =$$

3. Рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости жидкости:

$$\langle \eta \rangle = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{h} g \langle r \rangle^2 \langle t \rangle \quad (13)$$

4. Рассчитайте среднеквадратичную погрешность определения $\langle \eta \rangle$:

$$S_{\langle \eta \rangle} = \langle \eta \rangle \cdot \sqrt{\left(2 \frac{S_{\langle r \rangle}}{\langle r \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle t \rangle}}{\langle t \rangle}\right)^2} \quad (14)$$

5. Окончательный результат представьте в виде: $\eta = \langle \eta \rangle \pm S_{\langle \eta \rangle}$.

6. Используя формулу (4) определите число Рейнольдса $Re = \frac{\rho \langle V \rangle d}{\eta}$.

Задание 2. Определение коэффициента вязкости жидкости из зависимости времени падения шарика t от $1/r^2$

Представим (12) в виде уравнения прямой линии $y = A + Bx$:

$$t = \frac{9}{2} \cdot \frac{h \cdot \eta}{(\rho_1 - \rho_2)g} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (15)$$

где $y = t, x = \frac{1}{r^2}, B = \frac{9}{2} \cdot \frac{h \cdot \eta}{(\rho_1 - \rho_2)g}$ (16)

1. Запишите значения $\rho_1 = \dots, \rho_2 = \dots, t^\circ = \dots^\circ\text{C}$ и $h = \dots\text{м}$ согласно пунктам 1, 2, 3 порядка выполнения работы.
2. Выполните пункты 4, 5 порядка выполнения работы для 5 – 7 шариков. Результаты измерений занесите в табл. 2.

Таблица 2

i	1	2	3	4	5	6	7
$r, \text{м}$							
$Y = t, \text{с}$							
$X = 1/r^2,$							

3. Постройте график зависимости t от $1/r^2$. Покажите этот график преподавателю и дальнейшую обработку проведите по его указанию.

А. Графический метод

1. Из графика определите угловой коэффициент B .
2. По найденному значению B из (16) рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости жидкости $\langle \eta \rangle = \frac{2B}{9} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{h} g$.

Б. Аналитический метод

1. Рассчитайте: $\langle X \rangle, \langle Y \rangle, \langle X^2 \rangle, \langle Y^2 \rangle, \langle XY \rangle$, где $\langle \rangle$ – среднее арифметическое от указанной в скобках переменной.
2. По формуле (17) определите угловой коэффициент B .

$$B = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \quad (17)$$

3. По формуле (18) определить среднеквадратичного отклонения величины $B - S_B$.

$$S_B = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} - B^2}, \quad (18)$$

4. Результат представьте в виде $\eta = \langle \eta \rangle \pm \frac{S_{\langle B \rangle}}{B} \langle \eta \rangle$.

5. Используя формулу (4) определите число Рейнольдса.

Контрольные вопросы

1. Силы внутреннего трения и их природа? От каких факторов зависит коэффициент динамической вязкости?
2. Напишите формулу Ньютона для сил внутреннего трения. Поясните понятие градиента скорости течения жидкости с помощью рисунка.
3. Объясните метод Стокса определения вязкости жидкости и дайте вывод формулы (12).
4. Как различаются течения ламинарное и турбулентное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики т.5, ч.1. Атомная физика. М. «Наука», 1980 г. и др. издания.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. 11-е изд., стер. - М.: 2006.— 560 с. Учебное пособие
3. Детлаф А.А и Яворский Б.М. Курс физики. М. Высшая школа. 2002.