

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Сила F внутреннего трения слоев направленно движущейся жидкости определяется законом Ньютона [1]

$$F = -\eta S \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

где η - коэффициент внутреннего трения или вязкости жидкости; S - площадь соприкосновения ее слоев; $\frac{dv}{dx}$ - градиент скорости, измеряемый в направлении X , перпендикулярном направлению скорости v .

Из выражения (1) следует, что

$$\eta = -\frac{F}{S(dv/dx)}, \quad (2)$$

т.е. коэффициент внутреннего трения численно равен силе, действующей на единицу площади движущегося слоя жидкости при единичном градиенте скорости ее направленного движения. В СИ $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$. Паскаль-секунда - вязкость такой среды, в которой при давлении сдвига в 1 Па возникает градиент скорости направленного течения слоев среды $\frac{dv}{dx} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Экспериментальной задачей данной лабораторной работы является измерение коэффициента внутреннего трения η глицерина.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей лабораторной работе коэффициент внутреннего трения жидкости определяется методом измерения скорости падения в ней металлического шарика (дробинки) - методом Стокса.

Лабораторная установка, используемая для выполнения работы, изображена на рис. 1. Она состоит из цилиндрической стеклянной трубы, вертикально укрепленной на штативе и наполненной исследуемой жидкостью (глицерин). Для измерения скоростей движения падающих шариков на трубе имеются две метки, расстояние S между которыми измеряется линейкой. На том же штативе, над трубой укреплена воронка, в которую опускают шарик, чтобы он падал по центру трубы. Скорость установившегося равномерного падения шарика в жидкости

$$v = \frac{S}{t}, \quad (3)$$

где t - время падения шарика между отметками на трубе.

На металлический шарик, падающий в вязкой покоящейся жидкости, действуют, как это показано на рис. 1:

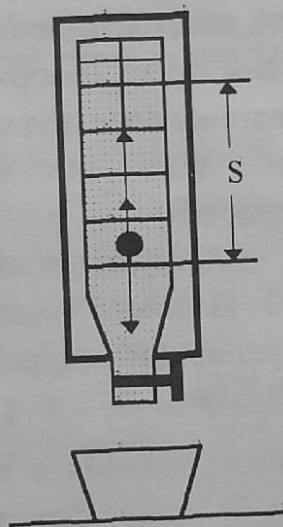


Рис. 1

1. Сила тяжести

$$P = mg = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_2 g, \quad (4)$$

где D - диаметр шарика; ρ_2 - плотность его материала; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

2. Выталкивающая сила (сила Архимеда)

$$F_1 = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_1 g, \quad (5)$$

где ρ_1 - плотность жидкости.

3. Обусловленная внутренним трением слоев жидкости сила сопротивления движению

$$F = 3 \pi \eta D v, \quad (6)$$

где v - скорость падения шарика в жидкости.

Примечание. Фактически при падении металлического шарика в жидкости имеет место не трение шарика о жидкость, а трение слоев жидкости друг о друга. Действительно, при соприкосновении шарика с жидкостью к его поверхности тотчас же прилипают молекулы жидкости. Шарик обволакивается слоями молекул, связанных с ним межмолекулярными силами. Непосредственно прилегающий к поверхности шарика слой жидкости движется вместе с шариком со скоростью его падения v . Строго говоря, именно скорость движения v прилегающего к шарiku слоя должна учитываться в выражении (6). Следует заметить также, что выражение (6) применимо лишь для небольших скоростей.

Направления сил, действующих на падающий в жидкости шарик, указаны на рис. 1. Из рис. 1 видно, что равнодействующая R сил, действующих на падающий шарик, равна

$$R = P - (F + F_1). \quad (7)$$

В нашем случае после падения в воздухе шарик попадает в жидкость с относительно большой скоростью. Вследствие этого в первый момент на шарик в жидкости, согласно выражениям (6) и (7), действует тормозящая сила R . Это приводит к резкому торможению шарика. Однако, по мере снижения скорости v шарика уменьшается и величина тормозящей силы R и быстро наступает момент, начиная с которого $R = 0$, т.е.

$$P = F + F_1. \quad (8)$$

С этого момента движение шарика в жидкости становится равномерным со скоростью v . Если размеры шарика невелики, а жид-

кость имеет заметную вязкость, то установление равномерности падения шарика в жидкости происходит практически мгновенно.

Подставляя в выражение (8) соответствующие соотношения для сил P , F и F_1 из выражения (4)-(6), получим для коэффициента внутреннего трения

$$\eta = \frac{1}{18} (\rho_2 - \rho_1) \frac{g D^2}{v}. \quad (9)$$

Учитывая, что $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, а также, что $v = S/t$, окончательно получим в СИ

$$\eta = 0,544 (\rho_2 - \rho_1) \frac{D^2 t}{S}. \quad (10)$$

Выражение (10) является окончательным расчетным соотношением данной лабораторной работы.

Значения плотностей ρ_2 и ρ_1 указаны на установке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить линейкой расстояние S между метками на трубе. Записать полученное значение S в исходные данные.

2. Определить диаметр шарика-дробинки с помощью микрометра. Найденное значение диаметра D записать в таблицу результатов измерения. Под таблицей запишите значения плотности жидкости ρ_1 и материала шарика ρ_2 (указаны на установке), а также расстояние S и комнатную температуру T (определить по термометру).

3. Установив глаз против верхней метки на трубе, опустить шарик в воронку. В момент прохождения шарика верхней метки включить секундомер. В момент прохождения шариком нижней метки секундомер выключить. Полученное значение времени падения шарика t_i между метками записать в таблицу.

$\rho_1 =$
 $\rho_2 =$

$S = 40$

$T =$

Таблица

Номер опыта	D_i , мм	t_i , с	η_i , Па·с	$\Delta\eta_i$, Па·с	$(\Delta\eta_i)^2$, Па·с ²

$$\bar{\eta} =$$

$$\sum (\Delta\eta_i)^2 =$$

4. Повторить указанные измерения еще для 4-5 шариков различных диаметров D_i .

5. Используя полученные значения S , D_i , t_i , а также указанное на установке значение разности плотностей $(\rho_2 - \rho_1)$, по формуле (10) вычислить для каждого шарика в отдельности значение коэффициента вязкости η_i . Вычисление η_i производить с точностью до трех значащих цифр.

6. Вычислить среднее значение коэффициента вязкости жидкости

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1} \eta_i.$$

7. Вычислить погрешность $\Delta\eta$ измеренного значения

$$\Delta\eta = t_{np} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (\Delta\eta_i)^2}, \quad P = 0,68.$$

8. Соответствующим образом, округлив погрешность $\Delta\eta$ и результат измерения, записать окончательный результат измерений

$$\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta, \quad P = 0,68.$$

9. Произвести анализ полученного результата (например, сравнить полученное значение коэффициента вязкости глицерина с его табличным или теоретическим значением). Произвести оценку метода измерений (удобен или неудобен, точен или неточен и т.д.).

Примечание. Внутреннее трение в жидкостях существенно зависит от температуры, поэтому для анализа результата измерений необ-

ходимо записать температуру в лаборатории, равную температуре исследуемой жидкости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как объясняется явление внутреннего трения в жидкостях и газах с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

2. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения? От чего зависит его величина?

3. Какие силы действуют на металлический шарик, падающий в вязкой среде? Укажите направление действия каждой из этих сил.

4. Почему движение шарика в вязкой среде быстро становится равномерным?

5. Имеет ли значение форма шарика и его материал при измерении коэффициента вязкости жидкостей?

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982, т. 1, §128-130.
2. Гусев Г.В., Буркова Л.А. Учебное пособие. Обработка и анализ результатов лабораторного физического эксперимента. - СПб.: СПГУТД, 1995.

Составитель доц. Г.В.Гусев