

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ  
МЕТОДОМ СТОКСА**

**Методические указания  
для выполнения лабораторной работы**

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2016

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией  
физического факультета

Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Председатель комиссии



В. М. Вымятнин

В работе рассматриваются понятия вязкости жидкости и силы внутреннего трения. Дается описание способа определения коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

Методические указания рассчитаны на студентов нефизических специальностей очной и заочной форм обучения.

Составители: доц. **Н.А. Александров**  
**Н.И. Иванова**

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Цель работы:** познакомиться с некоторыми свойствами жидкостей, с одним из методов определения коэффициента вязкости жидкостей и измерение коэффициента вязкости касторового масла или глицерина.

### ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТИ

**Вязкостью или внутренним трением** называется явление возникновения силы трения между слоями текущей жидкости или газа, параллельными направлению течения. Силы внутреннего трения направлены по касательной к поверхности слоя; на слой, движущийся быстрее, со стороны слоя, движущегося медленнее, действует тормозящая сила. Эти силы возникают за счет передачи импульса от одного слоя жидкости (или газа) другому, а так как изменение импульса в единицу времени равно силе, то это и приводит к появлению силы внутреннего трения. Вязкость – важная физико-химическая характеристика веществ.

Величина, обратная вязкости, называется текучестью, которую необходимо учитывать, например, при перекачке жидкостей и газов по трубопроводам, разливке расплавленных металлов, смазке машин и механизмов. В медицине вязкость крови определяет состояние организма – в норме или при патологии.

*Вязкость обусловлена наличием между отдельными частицами (молекулами) жидкости сил притяжения, которые при перемещении одной части жидкости относительно другой сдерживают движение слоёв.* Очевидно, что все жидкости имеют разную вязкость. Между молекулами всегда существуют силы не только притяжения, но и отталкивания. Равновесие между этими силами определяет равновесное состояние жидкости. Если один из слоёв жидкости вывести из состояния равновесия и перемещать его с некоторой скоростью относительно другого, то силы притяжения частиц будут тормозить это движение.

Допустим, что вязкая жидкость движется по горизонтальной трубе с небольшой скоростью так, что её течение

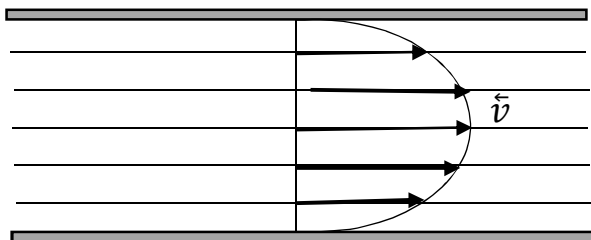


Рис.

является **ламинарным**. Ламинарным называется течение, при котором слои жидкости можно считать параллельными друг другу и направлению течения жидкости. Молекулы слоя, соприкасающегося со стенками трубы, прилипают к стенкам и остаются неподвижными. Другие слои движутся с возрастающими скоростями, и наибольшую скорость имеет слой, движущийся вдоль оси трубы. Картина распределения скоростей слоев вязкой жидкости имеет вид параболы (рис.1).

Рассмотрим течение некоторой жидкости по горизонтальной поверхности (рис.2). Если скорость в этом течении меняется от слоя к слою, то на границе между слоями действует сила внутреннего трения  $F$ , величина которой определяется по закону, впервые найденному Ньютоном

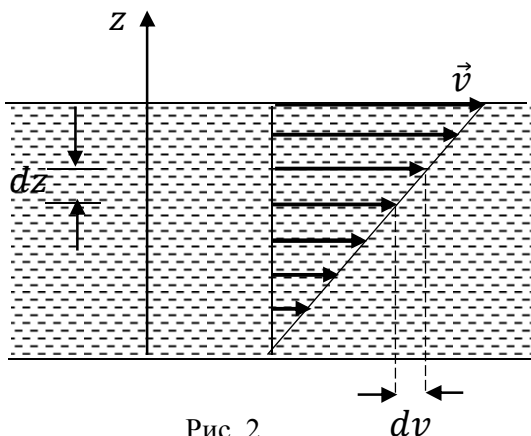


Рис. 2

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| \cdot S \quad (1)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости жидкости,  $S$  - площадь поверхности слоя, на которую действует сила,  $\left| \frac{dv}{dz} \right|$  - модуль градиента скорости. Градиент скорости показывает, как быстро изменяется скорость движения жидкости в направлении  $z$ , перпендикулярном к поверхности слоев. Величина коэффициента вязкости  $\eta$  зависит от природы жидкости или газа и температуры. Для жидкостей коэффициент вязкости с увеличением температуры уменьшается, для газов, наоборот, возрастает. Как следует из уравнения (1), единица измерения коэффициента вязкости – Паскаль · секунда (Па · с).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Сила внутреннего трения возникает не только при движении жидкости относительно покоящегося тела, но и при движении твердого тела в покоящейся жидкости. На этом и основан метод измерения вязкости по Стоксу. Сила сопротивления, действующая на движущееся в жидкости тело, зависит от многих факторов (формы тела, условий течения и т.д.), в том числе и от вязкости жидкости.

Стоксом была строго выведена формула для силы сопротивления, действующей на шарик, движущийся в жидкости, при условии, что движение жидкости относительно шарика ламинарное, т.е. для достаточно малой скорости движения шарика. Если это условие не выполняется, то в жидкости образуются вихри, течение становится **турбулентным** и тогда о вязкости как о свойстве вещества говорить нельзя. Формула Стокса имеет вид

$$F_C = 6\pi\eta r v, \quad (2)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости жидкости;  $r$  - радиус шарика;  $v$  - скорость шарика.

Справедливость этой формулы, строгий вывод которой достаточно сложен, следует из простых соображений. Опыт показывает, что сила сопротивления зависит только от скорости шарика, его радиуса и вязкости жидкости. Вид зависимости определяется тем, что размерность комбинации, составленной из этих трех величин, должна совпадать с размерностью силы. Этому условию удовлетворяет единственная комбинация – произведение  $\eta \cdot r \cdot v$ . Множитель  $6\pi$  получается из строгого вывода, проведенного Стоксом.

Для оценки ламинарности, а, следовательно, возможности применения формулы Стокса существует так называемое число, или критерий Рейнольдса, ( $Re$ ):

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}, \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;  $d$  - диаметр шарика.

Оказывается, что для каждого вида движения жидкости существует такое критическое значение  $\text{Re}_{кр}$ , что при  $\text{Re} < \text{Re}_{кр}$  возможно только ламинарное течение. Закон Стокса выполняется вплоть до значений числа Рейнольдса порядка 0,1. При  $\text{Re} \approx 1$  сила сопротивления определяемая по закону Стокса, примерно на 10% ниже истинной. Поэтому для движущихся в жидкости шариков будем считать  $\text{Re}_{кр} = 1$ .

На движущийся в жидкости шарик действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , выталкивающая архимедова сила  $\vec{F}_A$  и сила сопротивления  $\vec{F}_C$  (рис.3). Равномерное движение шарика наступает когда равнодействующая сил равна нулю

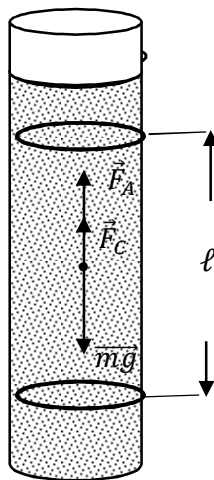


Рис.3

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0 \quad (4)$$

или  $mg - F_A - F_C = 0$ . Учитывая, что

$mg = \rho Vg$ ,  $F_A = \rho_0 Vg$  и сила сопротивления  $F_C = 6\pi\eta r v$ ,

получим

$$\rho Vg - \rho_0 Vg - 6\pi r v \eta = 0, \quad (5)$$

где  $\rho, \rho_0, V$  - плотности материала шарика, жидкости и объём шарика соответственно. Зная, что объём шара  $V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{\pi d^3}{6}$  из (5) получим выражение для расчета коэффициента вязкости жидкости

$$\eta = \frac{d^2 g (\rho - \rho_0)}{18v}, \quad (6)$$

где  $v$  - скорость равномерного движения шарика.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для выполнения работы используется стеклянный цилиндрический сосуд (рис.3), наполненный исследуемой вязкой жидкостью. На стенках сосуда имеется две метки на расстоянии  $\ell$  друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости на 3 – 4 см для того, чтобы скорость шарика успела установиться к моменту прохождения верхней метки.

В работе используются маленькие металлические шарики, диаметр которых измеряется с помощью измерительного микроскопа МИР-1. Цена деления микроскопа в зависимости от длины тубуса приведены в таблице 1.



## Цена деления шкалы микроскопа

Т а б л и ц а 1

Длина тубуса (мм)	Цена одного деления шкалы (мм)
130	0,068
140	0,053
147	0,050
150	0,049
160	0,045
170	0,041
180	0,038
190	0,036

Шарики для данного эксперимента желательно брать одинаковые (или близкие по размеру), так как погрешность измерения вычисляется как случайная. Для оценки погрешности измерения  $\Delta\eta$  принять интервал для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$

$$\Delta\eta = t_{n,\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\eta} - \eta_i)^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (7)$$

где  $t_{n,\alpha}$  – коэффициент Стьюдента;  $n$  – число измерений.

Измерив диаметр шарика, опускают его в цилиндр с исследуемой вязкой жидкостью как можно ближе к его оси; глаз наблюдателя должен быть при этом против верхней метки, чтобы она сливалась в одну прямую. В момент прохождения шарика через эту метку пускают секундомер, а в момент прохождения

шариком нижней метки секундомер останавливают. Опыт проводится с десятью шариками. Результаты заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

№	$d$ (дел)	$d$ (мм)	$\ell$ (см)	$t$ (с)	$v$ (см/с)	$\eta$ (П)	$\bar{\eta}$ (П)	$\Delta\eta$
---	--------------	-------------	----------------	---------	---------------	---------------	---------------------	--------------

Подставляя в (6) значения из таблицы 2, рассчитайте значения коэффициента вязкости  $\eta$  для каждого шарика, затем определите среднее значение  $\bar{\eta}$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сила вязкости?
2. Что такое коэффициент вязкости? От чего он зависит?
3. Какое течение называется ламинарным?
4. Что показывает число Рейнольдса?
5. Как зависит сила сопротивления движению тела в жидкости от скорости? Почему?
6. В чем заключается метод Стокса?
7. Выведите формулу (6).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.1. Москва, Астрель, 2004.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.

*Издание подготовлено в авторской редакции*

Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 1904 от «6» мая 2016 г. Тираж 100 экз.

