

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

***МЕХАНИКА
ЖИДКОСТЕЙ***

Определение зависимости динамической вязкости от температуры.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебно-методического пособия
для студентов технических специальностей МГУЛ

Москва

Издательство Московского государственного университета леса
2015

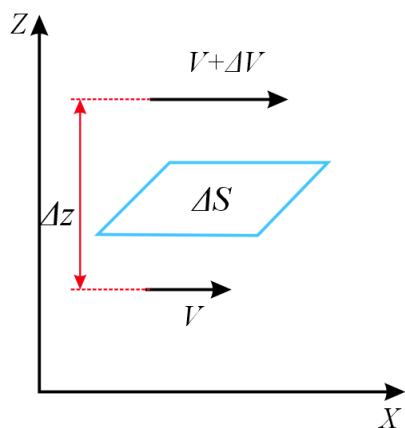
Лабораторная работа № 13

Определение зависимости динамической вязкости от температуры.

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:



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

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

Рис.1

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,

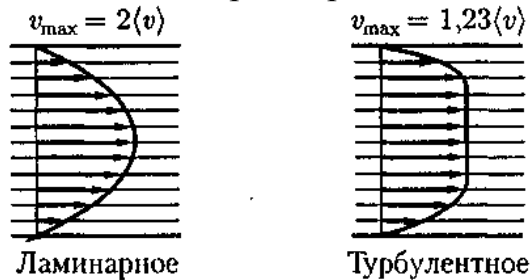


Рис.2

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**:

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

где $\rho_{жс}$ — 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 $r \ll R$.

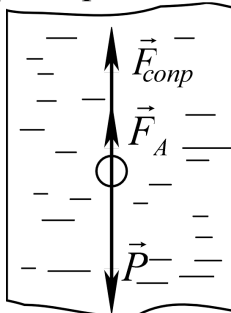


Рис.3.

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

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

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

– выталкивающая сила Архимеда:

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

где $\rho_{\text{ш}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – 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:

$$V_0 = \frac{h}{t} \quad (10)$$

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:

$$\rho_{ш} \frac{4}{3} \pi r^3 g - \rho_{ж} \frac{4}{3} \pi r^3 g - 6\pi\eta r V_0 = 0 \quad (11)$$

откуда с учётом (10) находим коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж})gr^2t}{h} \quad (12)$$

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 лабораторной установки.

На рисунке 4 представлен интерфейс программы лабораторной работы. При помощи мышки пользователь может выбрать один из трех шариков 1 и при помощи мышки переместить их в любое место экрана. Контролером 2 выбирается материал шариков (это может быть алюминий (Al), медь (Cu), свинец (Pb) или железо (Fe)). При этом в окошке индикатора 3 появится плотность, соответствующая выбранному материалу, а шарики сменят цвет на приблизительно соответствующий данному материалу в природе. Кнопка 4 возвращает все шарики обратно в кювету из любой точки экрана. Для того, чтобы измерить диаметр шаров необходимо воспользоваться микрометром 5, при этом один из шариков 1

необходимо передвинуть в положение 7. Если шарик помещен в положение 7 правильно, то фон за ним станет зеленым и после отпускания кнопки мыши шарик притянется к левой губке микрометра. Чтобы измерить шарик, при помощи мышки нужно передвинуть барабан микрометра 6 влево, зажав при этом измеряемый шарик между губками микрометра. После зажимания шарика по показаниям на стебле микрометра со шкалой и барабана, можно определить диаметр шарика.

На термостате располагается цифровой и аналоговый регуляторы температуры 8. Изменение температуры приводит к изменению плотности вязкой жидкости (глицерин), что можно видеть по индикатору 9, а, следовательно, и её динамической вязкости.

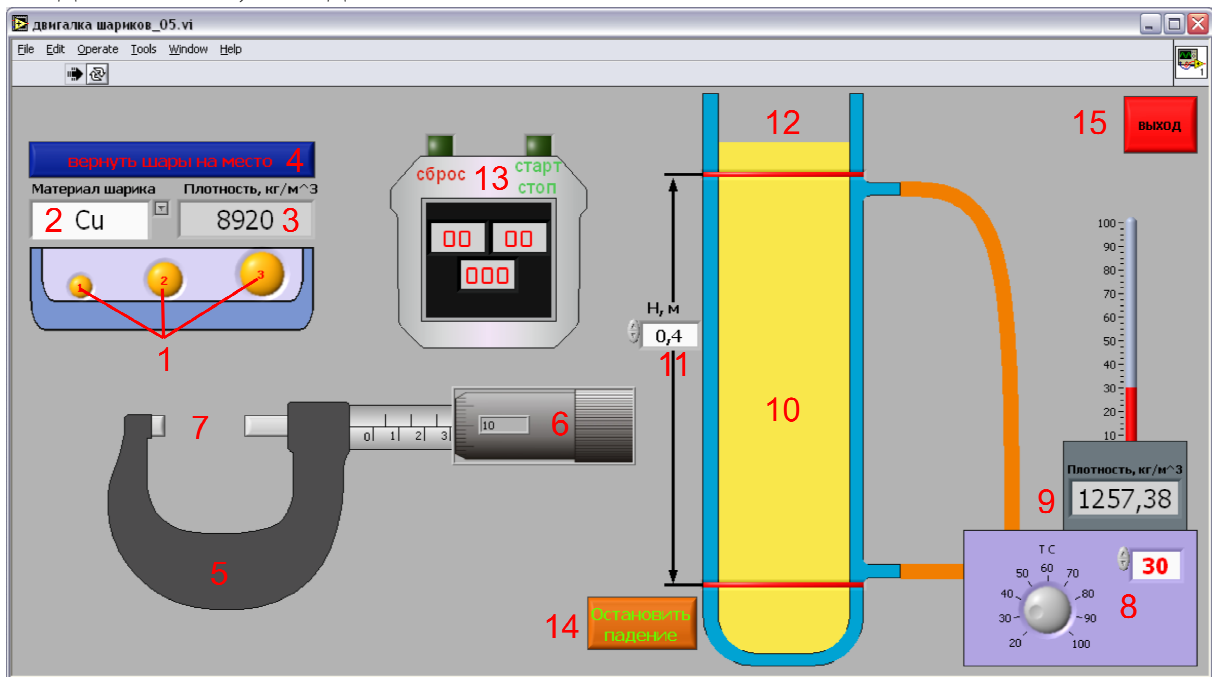


Рис.4. Интерфейс программы

В зависимости от выполняемого задания один и тот же или различные шарики необходимо бросать в сосуд с полыми стенками, заполненный глицерином 10 при одной и той же или различных температурах. Для того чтобы бросить шарик необходимо переместить его в положение 12 (при этом фон за шариком станет зелёным) и отпустить его. Во время движения шарика в вязкой среде пользователя интересует время, за которое шарик преодолет промежуток между двумя красными отметками на сосуде 10. Расстояние между двумя рисками устанавливается при помощи контролера 11. Для того что бы запустить остановить или сбросить секундомер 13, воспользуйтесь соответствующими кнопками на нём или на корпусе внешнего пульта (рис 5).



Рис.5. Фотография внешнего пульта

При необходимости движение шарика в вязкой жидкости можно прервать с помощью кнопки 14.

Выход из программы осуществляется при помощи кнопки ВЫХОД 15.

Задание 1. Определение зависимости динамической вязкости от температуры.

Таблица 1

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T, ^\circ\text{C}$ | | | | | | | |
| $t, \text{с}$ | | | | | | | |
| $\rho_{\text{ж}}, \text{кг}/\text{м}^3$ | | | | | | | |
| $\eta, \frac{\text{Нс}^2}{\text{м}^2}$ | | | | | | | |

1. По указанию преподавателя выберите один из шариков и его материал ($\rho_{\text{ш}} = \text{_____ кг}/\text{м}^3$).
2. По указанию преподавателя установите расстояние между рисками 11 ($h = \text{_____ м}$) и начальную температуру вязкой жидкости, а плотность жидкости запишите в таблицу.
3. При помощи микрометра произведите измерение диаметра шарика и запишите его ($d = \text{_____ м}$).
4. Опустите выбранный шарик в сосуд 10 и измерьте время, за которое он пройдет расстояние между рисками. Полученный результат запишите в таблицу 1.
5. Увеличьте температуру на величину Δt° , заданную преподавателем и запишите значение плотности в таблицу.
6. Повторите пункты 4-5 столько, сколько потребуется для заполнения таблицы.
7. По формуле 12 вычислить динамическую вязкость для каждого эксперимента и записать в таблицу.

8. Постройте график зависимости динамической вязкости от температуры.

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

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

$$t = \frac{9}{2} \cdot \frac{h \cdot \eta}{(\rho_{ш} - \rho_{ж})g} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (13)$$

где $y = t$, $x = \frac{1}{r^2}$, $B = \frac{9}{2} \cdot \frac{h \cdot \eta}{(\rho_{ш} - \rho_{ж})g}$ (14)

1. Запишите плотность различных материалов шариков ($\rho_{Fe} = \text{_____ кг/м}^3$); ($\rho_{Cu} = \text{_____ кг/м}^3$); ($\rho_{Pb} = \text{_____ кг/м}^3$).
2. Установите расстояние между рисками 11 ($h = \text{_____ м}$) и температуру вязкой жидкости, а плотность жидкости запишите в таблицу.
3. Выберите температуру жидкости и запишите ее плотность ($\rho_{ж} = \text{_____ кг/м}^3$; $T = \text{_____ } ^\circ\text{C}$)
4. При помощи микрометра произведите измерение диаметров всех шариков и запишите их радиусы в таблицу 2.
5. Проведите измерения времени падения 3-х шариков для каждого материала. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

| i | r , м | $1/r^2$, м ⁻² | t , с (Fe) | t , с (Cu) | t , с (Pb) |
|-----|---------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |

6. Для каждого материала шарика постройте график зависимости t от $1/r^2$. Каждый из 3-х графиков линейно аппроксимируйте. Определите тангенс угла наклона прямой B . По найденному значению B из (14) рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости жидкости $\langle \eta \rangle = \frac{2B}{9} \cdot \frac{\rho_{ш} - \rho_{ж}}{h} g$.

7. Результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3

| | Fe | Cu | Pb | $\langle \eta \rangle$ |
|--------------------------|----|----|----|------------------------|
| $\eta, \frac{Hc^2}{M^2}$ | | | | |

Задание 3. Определение коэффициента вязкости жидкости

1. По указанию преподавателя выберите шарик. Измерьте его диаметр и запишите. ($\rho_{ш} = \text{_____ кг/м}^3$; $d = \text{_____ м}$; $r = \text{_____ м}$)
2. Установите температуру жидкости и запишите её плотность. ($\rho_{ж} = \text{_____ кг/м}^3$; $T = \text{_____ } ^\circ\text{C}$)
3. По указанию преподавателя установите наименьшее значение расстояния между рисками на сосуде и запишите это значение в таблицу.
4. Бросьте шарик в сосуд и измерьте время за которое он пройдёт расстояние между рисками. Результат занесите в таблицу 4.
5. Увеличьте расстояние между рисками на заданную преподавателем величину и запишите значение в таблицу 4.
6. Повторите пункты 4-5 до полного заполнения таблицы.

Таблица 4

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

Вычислите средние значения

$$\langle t \rangle =$$

$$\langle h \rangle =$$

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

$$\langle h^2 \rangle =$$

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

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

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

3. Рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости жидкости:

$$\langle \eta \rangle = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\langle h \rangle} gr^2 \langle t \rangle \quad (15)$$

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

$$S_{\langle \eta \rangle} = \langle \eta \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{\langle h \rangle}}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle t \rangle}}{\langle t \rangle}\right)^2} \quad (16)$$

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

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

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.