Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественных и математических наук»

ФИЗИКА

Методические указания к
выполнению лабораторной работы

“ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ (МЕТОД СТОКСА)”

для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2025

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

Составитель – Шведова Наталья Дмитриевна.

Под редакцией - Зюрюкина Юрия Анатольевича.

Рецензент – Евсеева Лидия Алексеевна

410054, Саратов, ул. Политехническая 77,
Научно-техническая библиотека СГТУ,
тел. 52-63-81, 52-56-01
http: // lib.sstu.ru

Регистрационный
номер 060559Э

© Саратовский государственный
технический университет 2023 г.

Цель работы: знакомство с явлением внутреннего трения в жидкостях и определение коэффициента внутреннего трения в эталонной среде.

Теоретические представления о вязкости

Вязкость (внутреннее трение) – это свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоёв жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила. Между слоями происходит процесс, приводящий к выравниванию скоростей, молекулы переносят присущие им импульсы. Вязкость жидкостей есть свойство, аналогичное внутреннему трению в газах, и относится к «явлениям переноса», происходящим в жидкой среде. В отличие от твёрдых тел молекулы жидкости не связаны между собой «жёстко», каждая молекула, совершая беспорядочное тепловое движение, одновременно изменяет своё расположение относительно «соседей» и с течением времени перемещается в объёме сосуда.

Можно представить, что молекулы жидкости совершают колебательное движение вокруг временных положений равновесия за некоторый малый промежуток времени t, по истечении которого молекулы «перескакивают» в другое место и совершает колебательные движения вокруг нового положения равновесия и т.д. Чем больше время пребывания молекул жидкости в одном месте, то есть время их «осёдлой жизни», тем больше вязкость жидкости. В пределе при $t \to \infty$ вещество переходит в твёрдое состояние, в котором молекулы его «привязаны» к определённым местам объёма, где они могут совершать только колебательные движения

Различные слои жидкости при её движении имеют различную скорость.

Рассмотрим два очень тонких слоя жидкости, движущихся относительно друг друга со скоростями v и $v+dv$ (см. рис. 1).

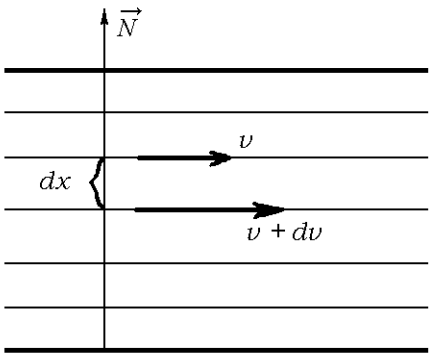

рис. 1

Расстояние, измеренное в направлении, перпендикулярном к их скоростям движения обозначим dx. Отношение dv/dx, характеризующее быстроту изменения скорости на единицу

длины в направлении, перпендикулярном скорости, называется градиентом скорости. Совершая беспорядочное тепловое движение, молекулы жидкости могут переходить из слоя в слой, перенося с собой некоторый импульс. При этом, попадая из слоя, движущегося с большой скоростью, в более медленный слой, они увеличивают его импульс и тем самым ускоряют его движение. Наоборот, молекулы, попадающие из более медленного слоя в быстрый, замедляют его движение. Между слоями будет происходить процесс, приводящий к выравниванию скоростей, что и является внутренним трением.

Ньютон установил, что возникающая при этом между слоями, движущимися с разными скоростями, сила внутреннего трения F пропорциональна величине площади соприкосновения движущихся слоёв S и градиенту скорости dv/dx

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \qquad (1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения или коэффициент динамической вязкости.

Как следует из формулы (1), коэффициент динамической вязкости η есть физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, возникающей при движении двух соприкасающихся слоёв единичной площади (в системе СИ S = 1 м^2) при градиенте скорости равном единице (в системе СИ dv/dx = 1 м/(с·м).

В системе СИ за единицу коэффициента вязкости принята такая вязкость, при которой градиент скорости равный 1 м/с на 1 м приводит к возникновению силы внутреннего трения в 1 Н на 1 м^2 поверхности соприкасающихся слоёв. Эта единица называется Паскаль-секундой (Па·с). Коэффициент вязкости зависит от природы жидкости, наличия в ней примесей и от состояния (например, температуры).

Динамическая вязкость жидкости проявляется, например, при относительном движении частей машины, между которыми введён слой смазки. При этом внутри смазывающего слоя возникает движение отдельных слоёв, подобно описанному выше. Так как вязкое сопротивление жидкости меньше сопротивления трению при скольжении твёрдых тел, то благодаря смазке, уменьшается сопротивление в машине.

Кроме динамической вязкости η жидкости характеризуются кинематической вязкостью. Кинематической вязкостью ν называется отношение динамической вязкости η к плотности ρ

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

В системе СИ единицей кинематической вязкости является квадратный метр на секунду (м^2/с). В системе СГС – стокс (Ст), причём 1 Ст = 10^{-4} м^2/с.

Пользуясь понятием кинематической вязкости, можно сравнить характер движения тел в жидкости. Характер обтекания тел жидкостью определяется безразмерной величиной – числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}.$$

где ρ – плотность жидкости,

v – скорость движения тел в жидкости,

η – динамическая вязкость жидкости,

l – характерный размер обтекаемого тела, например, сторона квадрата при квадратном сечении, радиус или диаметр при круглом сечении и т.д.

Если взять тело определенной формы, например, шар, то независимо от размеров тела и свойств жидкости характер обтекания тела определяется только числом Рейнольдса. Так ламинарное обтекание перейдет в турбулентное при определенном значении числа Рейнольдса (для шара при $Re \approx 10$).

Течение называется ламинарным (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних не перемешиваясь с ними, а турбулентным (вихревым) – если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости. При малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 1000$) наблюдается ламинарное течение, а при больших значениях числа Рейнольдса ($Re \geq 1000$) – турбулентное.

Как легко видеть, число Рейнольдса не изменится, если одновременно изменить плотность жидкости и динамическую вязкость в одинаковое число раз. Поэтому число Рейнольдса обычно выражают не через η, а через кинематическую вязкость $\nu = \eta/\rho$:

$$Re = \frac{vl}{\nu}. \qquad (2)$$

Чем больше вязкость, тем бóльшие силы внутреннего трения в ней возникают. Вязкость зависит от температуры. Так, для жидкостей коэффициент η с увеличением температуры уменьшается. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. Например, вязкость касторового масла в интервале 18 – 40 ºС падает в четыре раза. Академик П.Л. Капица открыл, что при температуре 2,17 К жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

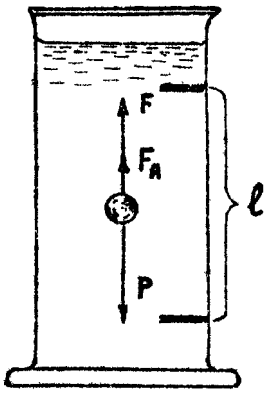

рис. 2

Определение динамической вязкости методом Стокса

Приборы и принадлежности: стеклянный

цилиндр с исследуемой жидкостью, микрометр, электросекундомер, шарики.

Метод определения вязкости основан на измерении скорости падения в жидкости медленно движущихся небольших тел сферической формы.

Исследуемая жидкость налита в стеклянный цилиндр, имеющий метки, расположенные друг от друга на расстоянии l которое измеряют по шкале (рис. 2). Верхняя метка должна быть ниже уровня жидкости на 5 – 8 см. динамическую вязкость определяют по скорости установившегося падения шарика в жидкости.

На шарик, падающий в жидкости, действуют три силы:

1. Сила тяжести

$$P = m\mathrm{g} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 \mathrm{g}, \qquad (3)$$

где r – радиус шарика; $\frac{4}{3}\pi r^3$ – его объём; ρ_1 – плотность материала, из которого сделан шарик.

2. Архимедова сила. Согласно закону Архимеда на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной им жидкости:

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 \mathrm{g},$$

где ρ_2 – плотность жидкости. Объём вытесненной жидкости равен объёму шарика.

3. Сила сопротивления, вычисленная Стоксом.

$$F = 6\pi\eta r v_0, \qquad (4)$$

где η – динамическая вязкость жидкости;

v_0 – скорость шарика по отношению к неподвижной жидкости.

Соотношение (4) строго выполняется при условии, что диаметр цилиндра много больше диаметра шарика и число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_2 v_0 d}{\eta} << 10,$$

где $d = 2r$ – диаметр шарика (малые скорости, маленькие шарики, вязкая жидкость).

Сила сопротивления обусловлена внутренним трением в жидкости. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к шарику, движется вместе с ним и увлекает соседние слои, которые приходят в относительное движение. Силы внутреннего трения возникают между слоями жидкости (рис. 3).

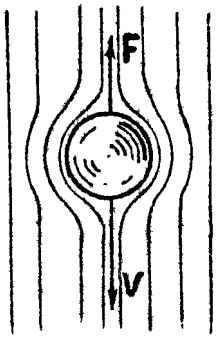

рис. 3

Скорость шарика, спущенного в жидкость, вначале будет возрастать. Вместе с ней будет возрастать и сила

сопротивления. Вскоре наступит момент, когда сила тяжести P будет уравновешена суммой архимедовой силы F_A и силы сопротивления F (см. рис. 2). С этого момента движение шарика становится равномерным с постоянной скоростью $v = v_0$.

Условие равновесия сил запишем

$$P = F_A + F$$

или

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g + 6\pi\eta r v_0,$$

откуда

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_1 - \rho_2)\frac{g r^2}{v_0}. \qquad (5)$$

Учитывая, что $v_0 = \frac{l}{t}$ и $r = \frac{d}{2}$, получим

$$\eta = \frac{1}{18}(\rho_1 - \rho_2)\frac{g d^2 t}{l}. \qquad (6)$$

Полученная формула является рабочей формулой для определения коэффициента вязкости.

По формуле (6) коэффициент вязкости исследуемой жидкости определяется через шесть различных физических величин: ρ_2, ρ_1, g, d, t, l. Все величины вносят определённый вклад в погрешность коэффициента вязкости.

Значения плотности материала шарика ρ_2 и жидкости ρ_1 взяты из таблиц: $\rho_2 = (7{,}8 \pm 0{,}05)\cdot 10^3$ кг·м$^{-3}$, $\rho_1 = (1{,}26 \pm 0{,}005)\cdot 10^3$ кг·м$^{-3}$.

Абсолютные погрешности плотностей $\Delta\rho_2 = 0{,}05\cdot 10^3$ кг·м$^{-3}$ и $\Delta\rho_1 = 0{,}005\cdot 10^3$ кг·м$^{-3}$ являются систематическими.

Ускорение свободного падения на географической широте лаборатории g = (9,810 ± 0,005) м/с^2. Следовательно, $\Delta g = 0{,}005$ м/с^2 – систематическая погрешность.

Расстояние l между метками определяется методом непосредственного отсчёта по вертикальной линейке с систематической инструментальной погрешностью $\Delta l = 0{,}5\cdot 10^{-3}$ м.

Время t прохождения шариком пути l между метками измеряют с помощью электросекундомера (см. раздел «Порядок выполнения работы»).

Погрешность в измерении времени связана с фиксацией наблюдателем момента прохождения шариком меток. Эта погрешность является случайной. Она примерно на два порядка больше инструментальной погрешности секундомера. В соответствии с ГОСТ 8.207-76, если погрешности различаются в 8 раз, то меньшей погрешностью можно пренебречь. Порядок нахождения погрешности в определении времени Δt описан в разделе «Производство опыта». Формула

для подсчёта погрешностей $\Delta\rho_2$, $\Delta\rho_1$, Δg, Δd, Δt, Δl приведена в разделе «Обработка результатов эксперимента».

Порядок выполнения работы

Приборы и принадлежности:

Стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, на котором нанесены две метки «а» и «в», линейка, микрометр, электросекундомер, шарики, пинцет, сачок. Микрометр (рис. 4) состоит из скобы *B*, неподвижного стержня (упора) *E*, подвижного стержня *A*, объединённого с микрометрическим винтом. На микрометрическом винте закреплён полый цилиндр (барабан) *C* с делениями по окружности.

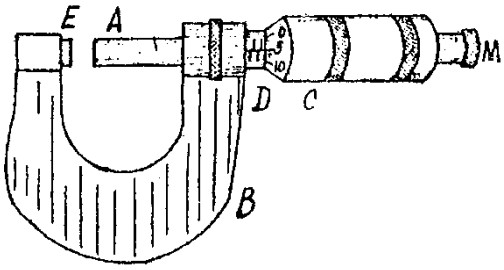

рис. 4

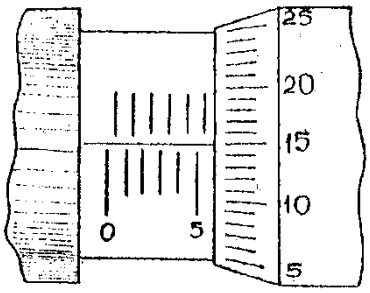

рис. 5

При измерении диаметра шарик зажимают между торцами упора *E* и подвижного стержня *A*, вращая для этого микровинт за «трещётку» *M*. Вместе с микровинтом вращается корпус барабана *C*, перемещаясь при этом поступательно. Отсчётное устройство микрометра состоит из двух шкал. Шкала на стебле *A* нанесена по обе стороны продольной черты таким образом, что верхние сдвинуты относительно нижних на 0,5 мм. Круговая шкала на барабане *C* служит для отсчёта сотых долей миллиметра. На ней нанесено 50 делений, так как шаг микровинта составляет 0,5 мм, то есть одному полному обороту винта соответствует перемещение подвижного стержня и края барабана на 0,5 мм.

Отсчёт производят следующим образом: целые миллиметры отсчитывают по верхней части продольной шкалы, сотые доли миллиметра – по круговой шкале против продольной черты на стебле *D*. Полученные результаты складываются. Например, отсчёт на рис. 5 равен: 5+0,5+0,15=5,65 мм.

Время прохождения шариком пути l между метками «а» и «в» измеряют с помощью электросекундомера, общий вид которого изображён на рис. 6. Перед пуском электросекундомера стрелки устанавливают на

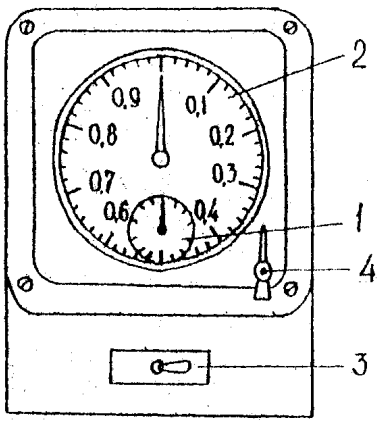

рис. 6

нуль рукояткой 4, повернув её до упора. Пускают в ход секундомер нажатием тумблера 3. При отпускании тумблера секундомер останавливается. Целые секунды отсчитывают по шкале 1, десятые и сотые доли по шкале 2.

В табл. 1 приведены метрологические характеристики используемых приборов.

Таблица 1

№	Наименование	Тип	Пределы измерений	Основная инструментальная погрешность
1	Секундомер	ПВ-53Щ		±0,05 с
2	Микрометр			±0,005 мм
3	Линейка		0-500 мм	±0,5 мм

Проведение опыта

Измерьте микрометром диаметр шарика. Результат занесите в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	t_i, с	$\Delta t_i = \lvert \bar{t} - t_i \rvert$	$\Delta t^2{}_i$	d	l
1					
2					
3					
4					
n					

Здесь $\bar{t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i$, $n \geq 1$ – количество опытов.

Измерьте с помощью линейки расстояние l между метками «а» и «в», результат запишите в табл. 2.

Опустите пинцетом шарик в цилиндр как можно ближе к его оси. Глаз наблюдателя должен быть при этом расположен против верхней метки. В момент прохождения шариком верхней метки включите электросекундомер. В момент прохождения шариком нижней метки остановите электросекундомер. Запишите время прохождения шариком расстояния l между метками «а» и «в». Проделайте не менее 5 опытов с одним и тем же шариком, вынимая его каждый раз после опускания с помощью сачка.

Величины ρ_1 и ρ_2 указаны на стенде.

Обработка результатов эксперимента

1. Определите предельную случайную погрешность измерения времени (см. правила подсчёта погрешностей при прямых измерениях [6]) по формуле $\Delta t = t_{nP_0} S_{n\bar{t}}$, где t_{nP_0} – коэффициент Стьюдента для заданной

доверительной вероятности P_0 и числа произведённых измерений n. При выполнении лабораторных работ $P_0 = 0{,}95$ и $n \geq 5$.

$$S_{n\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i^2}{n(n-1)}}$$

Коэффициент Стьюдента находят по таблице, приведённой в [6].

2. Вычислите значение $\overline{\eta}$ по формуле (6), подставляя в неё соответствующие величины.

3. Определите погрешность измерений $\Delta\eta$ с учётом всех погрешностей $\Delta\rho_2$, $\Delta\rho_1$, Δg, Δd, Δl и Δt, используя приём логарифмического дифференцирования функции. Для этого необходимо взять натуральный логарифм от обеих частей формулы (8)

$$\ln\eta = \ln 1 - \ln 18 + \ln(\rho_2 - \rho_1) + 2\ln d + \ln t - \ln l + \ln g,$$

затем продифференцировать левую и правую части полученного выражения, считая ρ_2, ρ_1, g, d, l и t переменными величинами

$$\frac{d\ln\eta}{d\eta} = \frac{d\eta}{\eta} = \frac{\partial\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} - \frac{\partial\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} + 2\frac{\partial d}{d} + \frac{\partial t}{t} - \frac{\partial l}{l} + \frac{\partial g}{g}$$

Заменяя формально ∂ и d на Δ, η и t усреднёнными величинами, суммируя абсолютные значения всех приращений, получим

$$\frac{\Delta\eta}{\overline{\eta}} = \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} + \frac{\Delta\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} + 2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{\bar{t}} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta g}{g}$$

или

$$\Delta\eta = \overline{\eta}\left(\frac{\Delta\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} + \frac{\Delta\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} + 2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{\bar{t}} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta g}{g}\right).$$

Окончательный результат представьте в виде

$\eta = \overline{\eta} \pm \Delta\eta$ (Па·с), $P_0 = 0{,}95$.

Чтобы убедиться, что для данной жидкости применим метод Стокса, для одного из шариков находят число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_2 v_0 d}{\eta}$. Если Re оказывается больше 10, то обтекание шариков было турбулентным, а не ламинарным (слоистым), следовательно скорость шарика при падении велика и шарики данных размеров и плотности можно применять только для определения η более вязких жидкостей.

Контрольные вопросы

1. Запишите и объясните формулу Ньютона. Каков физический смысл динамической вязкости? В каких единицах она измеряется?
2. В чём проявляется динамическая вязкость жидкости?
3. Что такое кинематическая вязкость и где она используется?

4. Каков механизм внутреннего трения?
5. Какие силы действуют на шарик, падающий в вязкой жидкости? Выведите рабочую формулу?
6. Почему уровень жидкости должен быть выше верхней метки?
7. Как произвести отсчёт по шкалам микрометра?
8. В каком порядке проводятся измерения? Как убедиться, что в данном опыте справедлива формула Стокса?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, Т. 1. 2000.
2. Зисман Г.А., Тодес С.М. Курс общей физики. М.: Наука, Т. 1. 2000.
3. Детлаф А.Н., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, Т. 1. 2002.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 1998.
5. Грибов Л.А., Прокофьева Н.И. Основы физики. М.: Градарика, 1998.