

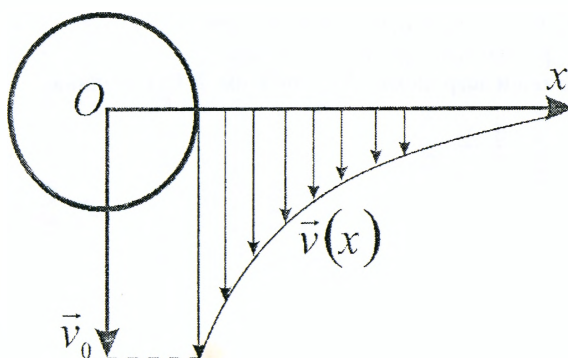
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Методические указания

к выполнению лабораторной работы

М20. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ ПО МЕТОДУ СТОКСА



Брест 2012

УДК 532.635 (075.8)

В указаниях приведены теоретические сведения, устройство и принцип работы используемых приборов и аппаратуры, методика проведения экспериментов, задания для самостоятельной работы, а также контрольные вопросы и литература.

Методические указания к лабораторной работе составлены в соответствии с программой курса физики для инженерно-технических специальностей вузов. Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения всех специальностей.

Составители: Г.С. Кандилян, доцент
И.С. Янусик, доцент
В.Я. Хуснутдинова, к.ф.-м.н., доцент

Учреждение образования

© "Брестский государственный технический университет", 2012

Лабораторная работа М20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: изучение явления внутреннего трения (вязкости) и определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

Оборудование: стеклянный цилиндр, с прозрачной жидкостью; секундомер; сосуд Стокса.

Теория вопроса и метод выполнения работы

Явлением внутреннего трения (вязкости) называется появление сил трения между слоями газа или жидкости, движущимися друг относительно друга, параллельно и с разными по величине скоростями. Слой, движущийся быстрее, действует с ускоряющей силой на более медленно движущийся соседний слой. Силы внутреннего трения, которые возникают при этом, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Величина силы внутреннего трения F между соседними слоями пропорциональна их площади ΔS и градиенту скорости $\frac{dV}{dx}$, то есть справедливо соотношение, полученное экспериментально Ньютоном

$$F = \eta \frac{dV}{dx} \Delta S. \quad (1)$$

Величина η называется коэффициентом внутреннего трения или динамическим коэффициентом вязкости. В СИ η измеряется в Па·с.

Входящая в (1) величина $\frac{dV}{dx}$ показывает, как меняется скорость жидкости в пространстве при перемещении точки наблюдения в направлении, перпендикулярном слоям. Понятие градиента скорости иллюстрируется рисунком 1.

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.

Суть метода состоит в том, что на всякое тело, движущееся в жидкости, действует сила сопротивления, зависящая от многих факторов (формы тела, условий течения и т.д.), в том числе и от вязкости жидкости.

Сила внутреннего трения и коэффициент вязкости жидкости может быть определен различными методами – по скорости истечения жидкости через калиброванное отверстие, по скорости движения тела в жидкости и т.д. В данной работе для определения η используется метод, предложенный Стоксом.

Рассмотрим для примера равномерное движение маленького шарика радиуса r в жидкости. Обозначим скорость шарика относительно жидкости через V_0 . Распределение скоростей в соседних слоях жидкости, увлекаемых шариком, должно иметь вид, изображенный на рис. 1. В непосредственной близости к поверхности шара эта скорость V равна V_0 , а по мере удаления уменьшается и практически становится равной нулю на некотором расстоянии x от поверхности шара.

Упавший в жидкость шарик движется равноускоренно, но, по мере того, как растет его скорость, будет возрастать и сила сопротивления жидкости до тех пор, пока сила тяжести шарика в жидкости не сравняется с суммой силы сопротивления и силы трения жидкости движению шарика. После этого движение будет происходить с постоянной скоростью V_0 .

При движении шарика слой жидкости, граничащий с его поверхностью, прилипает к шару и движется со скоростью шарика. Ближайшие смежные слои жидкости также приводятся в движение, но получаемая ими скорость тем меньше, чем дальше они находятся от шарика. Таким образом, при вычислении сопротивления среды следует учитывать трение отдельных слоев жидкости друг о друга, а не трение шарика о жидкость. На рис. 1 показано распределение скоростей жидкостей около движущегося в ней вертикально вниз со скоростью V_0 шарика.

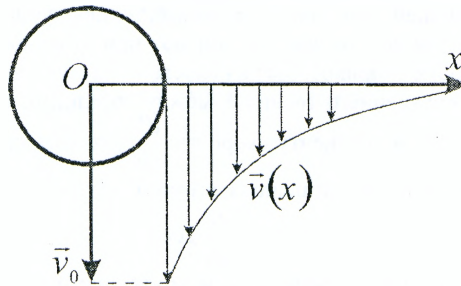


Рисунок 1

Предполагается, что скорость V_0 мала, так что завихрения в жидкости не образуются. В этом случае жидкость, непосредственно прилегающая к поверхности шарика, имеет скорость V_0 . В это движение частично вовлекаются удаленные от шарика слои жидкости. При этом скорость наиболее быстро меняется по направлению x вблизи шарика.

Наличие градиента скорости у поверхности тела указывает, что на него действует сила внутреннего трения, зависящая от коэффициента вязкости η . Сама величина η определяется природой жидкости и обычно существенно зависит от ее температуры.

Стоксом была строго выведена формула для силы сопротивления, действующей на шарик, движущийся в жидкости, при условии, что движение жидкости относительно шарика ламинарное. Ламинарное течение – это такое течение, при котором слои жидкости можно считать параллельными друг другу и направлению макроскопического движения жидкости. Такие условия практически выполняются при достаточно малых скоростях движения шарика.

Если условие это не выполнено, то в жидкости образуются вихри, течение становится турбулентным и тогда о вязкости как о свойстве вещества говорить нельзя. Формула Стокса имеет вид

$$F = 6\pi\eta rV, \quad (2)$$

где η – вязкость жидкости; r – радиус шарика; V – скорость шарика.

Метод определения вязкости жидкости (метод Стокса) состоит в наблюдении падения шарика в жидкости. В этом случае на шарик, кроме силы вязкости, определяемой формулой (1) и направленной вверх, действует сила Архимеда

$$F_A = 4/3 \pi r^3 \rho g \quad (3)$$

тоже направленная вверх, и сила тяжести

$$F_g = mg = 4/3 \pi r^3 \rho_0 g, \quad (4)$$

направленная вниз. Здесь ρ_0 – плотность вещества шарика, g – ускорение свободного падения.

Так как сила вязкости F зависит от скорости движения шарика (две другие силы от скорости не зависят), то при падении шарика с ускорением она растёт и поэтому вместе с силой Архимеда в конце концов должна уравновесить силу тяжести. После этого шарик падает с постоянной скоростью **установившегося движения**. При таком движении, следовательно, результирующая сила равна нулю, т.е. имеет место равенство

$$F_g = F + F_A \quad (5)$$

Или
$$4/3 \pi r^3 \rho_0 g = 4/3 \pi r^3 \rho g + 6 \pi \eta r v \quad (6)$$

Тогда
$$2/3 r^2 (\rho_0 - \rho) g = 3\eta v. \quad (7)$$

Из равенства (7) получаем выражение для η

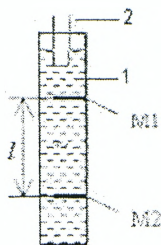
$$\eta = 2/9 r^2 g (\rho_0 - \rho) / v. \quad (8)$$

Это и есть основная расчетная формула в методе Стокса.

По формуле Стокса можно определить вязкость жидкости, измеряя скорость падения шарика (в нашем случае) из глицерина и дистиллированной воды в жидкости (трансформаторное масло).

Однако отметим, что в этих уравнениях не учтено влияние боковых стенок сосуда, в котором движется капля (среда считается безграничной). У стенок исследуемой жидкости покоится, а пограничный слой жидкости около шарика движется вместе с ним. Это приводит к увеличению градиента скорости, и следовательно, скорость равномерного падения шарика в трубке будет меньше, чем в безграничной среде. Учет этого обстоятельства теоретически обосновал Ландербург, введя поправки в формулу (8). С учетом этих поправок при падении капле в цилиндрическом сосуде радиуса R формула (8) будет выглядеть следующим образом:

$$\eta = \frac{2 gr^2 t (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{9 L \left(1 + 2,4 \frac{r}{R} \right)}. \quad (9)$$



Описание экспериментальной установки и задания для самостоятельной работы

Для опыта используется стеклянный цилиндр, в который налита исследуемая жидкость (сосуд Стокса) (см. рисунок). На цилиндре имеются две метки – M1 и M2. Метка M1 помещена на несколько сантиметров ниже уровня жидкости,

1 – цилиндрический сосуд, 2 – каплеуловитель
 Рисунок 2 – Принципиальная схема прибора для определения вязкости методом Стокса

чтобы к тому моменту, когда шарик проходит мимо нее, его движение уже было установившимся. Цилиндр закрыт пробкой с трубкой (2), в которую опускается шарик,двигающийся в дальнейшем примерно по оси цилиндра так, чтобы на его движение не влияли стенки.

Исследуемой жидкостью является трансформаторное масло, плотность которого $\rho_m = (0,80 \pm 0,01) 10^3 \text{ кг/м}^3$. Исследуемые шарики из дистиллированной воды и глицерина плотностью $\rho_w = (1,0 \pm 0,1) 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{гг} = (1,2 \pm 0,1) 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Время t прохождения шарика от одной метки до другой измеряется секундомером. Расстояние l между метками M1 и M2 измеряется линейкой. Таким образом, скорость шарика без труда может быть вычислена:

$$V = L/t.$$

Порядок выполнения работы

1. Взять пустой стакан и шприц для глицерина.
2. Посчитать число капель глицерина (N) в объеме $V = 1$ мл (на шприце указаны деления).
3. Повторить этот опыт до 5 мл, через каждый мл полученные значения числа капель усреднить.
4. По формуле найти радиус капель глицерина

$$r_{гг} = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi N}}. \tag{10}$$

Вывод данной формулы см. в приложении 2.

5. Повторить эти же пункты (1-4) для дистиллированной воды и найти радиус капель дистиллированной воды.

6. Аккуратно, придерживая стеклянный цилиндр опустить штатив с цилиндром на поверхность стола. Проверить вертикальность цилиндра.

7. Выбрать две вертикальные метки M1 и M2 в средней части сосуда (см. рис. 3) и измерить расстояние между ними L.

8. Капнуть каплю дистиллированной воды в трансформаторное масло в этом цилиндре как можно ближе к оси цилиндра.

9. Секундомером измерить время t прохождения капель заданного расстояния между метками L, найти скорость установившегося равномерного движения $V = \frac{L}{t}$. Опыт повторить не менее 6 раз. Результаты занести в таблицу.

№ п/п	L	D	$\rho_{ж}$	$\rho_{к}$	t_i	η_i	v_i	$\Delta \eta_i$	Δv_i
1									
2									
3									
4									
5									
6									

10. Прodelать эти же пункты (7-9) для капель глицерина.

11. По формуле (8) рассчитать коэффициент вязкости η . Сравнить результаты, полученные для воды и глицерина.

12. Определить кинематическую вязкость ν по формуле $\nu = \frac{\eta}{\rho}$.

13. Рассчитать погрешности $\Delta\eta$ и $\Delta\nu$

14. Дать оценку в % влияния боковой стенки сосуда на результат по формуле (9). Для этого при помощи нитки замерьте в средней части цилиндра по периметру $L = 2\pi R$ и найдите радиус R цилиндра.

Приложение 1

Вязкость газов может быть рассчитана с помощью методов, основанных на теоретических предположениях, но для определения вязкости жидкостей аналогичной теоретической базы не существует. Вязкости жидкостей значительно отличаются от вязкостей газов, т.е. они много больше по величине и резко уменьшаются с повышением температуры (тогда как для газов увеличиваются).

Вязкость газов обусловлена главным образом передачей импульса (P) в результате отдельных столкновений молекул, движущихся беспорядочно между слоями с различными скоростями. Аналогичная передача импульса существует и в жидкостях, хотя она более локализована из-за влияния полей сил взаимодействия между плотно упакованными молекулами. Действительно, плотности жидкостей таковы, что среднее межмолекулярное расстояние незначительно отличается от эффективного диапазона действия таких силовых полей.

При течении жидкости ее слой, прилегающий к твердому телу, например к стенке трубы, прилипает так, что его скорость равна нулю. Следующий слой движется, но из-за хаотичности движений молекул некоторые из них попадают в первый слой, теряя импульс при столкновении. Третий слой передает импульс второму и т.д. В результате этого наибольшей скоростью обладает та часть жидкости, которая более всего удалена от твердого тела (стенки), а скорости всех остальных слоев уменьшаются по мере приближения к стенке. Так как изменение импульса в единицу времени равно силе, то это и приводит к появлению силы внутреннего трения.

В жидкости наблюдается ближний порядок, в отличие от беспорядка в газах. По образному выражению советского физика Френкеля: «Молекула жидкости – «цыганка», которая взаимодействует с табором, т.е. с ближайшими соседями, находящимися в сфере молекулярного действия. Оседлый образ молекул (когда она колеблется около данного положения равновесия) длится τ времени, после чего она перескакивает на новое место жительства. Дальность этого скачка δ примерно равна размеру молекул (10^{-10} м). И, как показывают расчеты, среднее время оседлой жизни молекулы вычисляется по формуле 11:

$$\langle \tau \rangle = \langle \tau_0 \rangle \exp\{\Delta E / (kT)\}, \quad (11)$$

где $\langle \tau_0 \rangle$ – средний период колебаний молекулы; ΔE – минимальная энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перейти из одного положения равновесия в другое ($\Delta E \sim 10^{-20}$ Дж); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура жидкости. Для воды при комнатной температуре

$\langle \tau_0 \rangle \sim 10^{-13}$ с, а $\langle \tau \rangle \sim 10^{-11}$ с. С повышением температуры подвижность молекул возрастает, время оседлой жизни уменьшается.

При движении жидкости (или газа) между слоями, перемещающимися с различной скоростью, возникают силы внутреннего трения (вязкости). Эти силы направлены так, что ускоряют медленно движущиеся слои или замедляют быстро движущиеся.

Рассмотрим ламинарный поток жидкости в направлении оси Y .

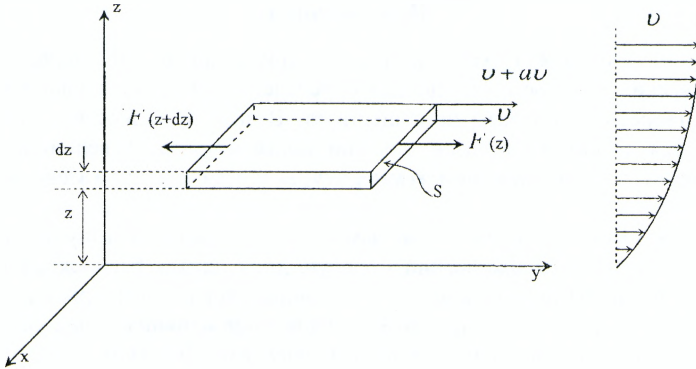


Рисунок 3

На рисунке 3 изображён элемент среды в виде слоя толщиной dz . Слои жидкости движутся с разными скоростями. Скорости двух слоев, отстоящих друг от друга на расстоянии dz , отличаются на dv . Величина $\frac{dv}{dz}$ – производная скорости – показывает, как быстро изменяется скорость слоев вдоль оси Z . Более быстро движущийся слой среды (сверху) действует на грань S выделенного элемента с силой $F(z)$, а менее быстро движущийся слой (снизу) действует с силой $F(z+dz)$. Результирующая сила для каждого слоя определяет величину и направление его ускорения, что и приводит к выравниванию поля скоростей упорядоченного движения в замкнутой системе.

Ньютон установил, что модуль силы внутреннего трения между слоями прямо пропорционален площади их соприкосновения и модулю производной скорости упорядоченного движения среды:

$$dF = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \tag{12}$$

где η – коэффициент пропорциональности, называемый вязкостью (или коэффициентом вязкости) жидкости; площадка S ориентирована перпендикулярно направлению изменения скорости.

Между слоями жидкости будет происходить передача импульса. Из-за хаотического теплового движения происходит обмен молекулами между соседними слоями, в результате чего импульс быстро движущегося слоя уменьшается,

а медленно движущегося – увеличивается. Это приводит к ускорению медленно движущегося слоя и замедлению более быстрого. По второму закону Ньютона:

$$dp = -\eta \frac{dv}{dz} S dt - \text{закон переноса импульса}, \quad (13)$$

где dp – величина импульса, переносимого за время dt от слоя к слою через поверхность S , перпендикулярную к направлению переноса импульса. Знак минус указывает, что импульс переносится от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью (в нашем случае вдоль оси Y). Импульс, переносимый через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к переносимому потоку импульса за единицу времени, называется плотностью потока импульса \bar{L}_p :

$$L_p = \frac{dp}{S_n dt} = -\eta \frac{dv}{dz}. \quad (14)$$

Соотношения (2)-(4) являются различными формами записи основного закона вязкости – закона Ньютона. Физический смысл вязкости η можно определить из любого соотношения. Например, из (4) следует, что вязкость η определяется плотностью потока импульса при $\frac{dv}{dz} = 1$.

Вязкость жидкости зависит от ее химического состава, примесей и температуры. С повышением температуры T вязкость жидкости уменьшается по закону

$$\eta = A \cdot \exp[\Delta E/(kT)]. \quad (15)$$

Здесь коэффициент A для каждой конкретной жидкости можно приблизительно считать постоянным.

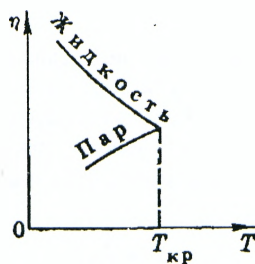


Рисунок 4

Вязкость газов (паров) в отличие от жидкостей с повышением температуры медленно увеличивается ($\sim \sqrt{T}$), при критической температуре $T_{кр}$ вязкости жидкости и ее пара сравниваются (рис. 4). Разный характер температурной зависимости вязкости жидкостей и газов указывает на различие механизмов внутреннего трения в них. В газах перенос импульса осуществляется при переходе молекул из слоя в слой благодаря тепловому движению.

В жидкостях большую часть времени молекулы колеблются около положения равновесия, скачкообразные переходы редки. Так как молекулы жидкости

находятся близко друг к другу, силы молекулярного сцепления между ними значительны. Поэтому одни слои жидкости увлекают (тормозят) соседние слои в основном за счет сил притяжения. Перенос импульса вследствие скачкообразных переходов молекул не играет решающей роли.

В жидкостях с повышением температуры расстояния между молекулами увеличиваются, а силы притяжения уменьшаются и, как следствие, уменьшается вязкость.

Приборы для измерения вязкости называются вискозиметрами.

Приложение №2

Определение радиуса капли

В традиционных методических разработках по определению коэффициента вязкости жидкостей методом Стокса для измерения радиуса капли используется микроскоп. Однако такой способ измерения по понятным причинам приводит к существенным погрешностям. В этой работе предлагается следующий, достаточно простой метод определения радиуса движущейся капли, основанный на следующих соображениях.

На движущуюся каплю в общем случае действуют: сила поверхностного натяжения, гравитационная сила и сила сопротивления среды (сила вязкости). Причём только первая из них (сила поверхностного натяжения) стремится минимизировать поверхность капли, придать ей сферическую форму, а остальные стремятся деформировать её. Поэтому большие падающие капли нельзя считать сферами. Чем меньше капля, тем ближе её объём к сфере. В данной работе падающие капли достаточно малого размера, чтобы считать их объём как объём сферы.

Для определения радиуса капли можно предложить следующий метод:

Поместить в капельницу заданный объём жидкости, радиус капель которой нужно определить (2-3 мл). Открыть кран и посчитать количество капель в заданном объёме V . Пусть в нашем объёме содержится N капель, тогда $V = NV_0$, где V_0 – объём одной капли. Т.к. каплю мы можем представить в виде сферы, то её объём:

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3.$$

Тогда:

$$V = N \frac{4}{3} \pi \cdot r^3,$$

следовательно

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi N}}. \tag{10}$$

Контрольные вопросы

1. От чего и как зависит коэффициент вязкости среды?
2. В чем различие механизмов вязкости в жидкостях и в газах?
3. Как зависит вязкость газов и жидкостей от температуры?
4. В чем заключается метод определения коэффициента вязкости жидкости по Стоксу?
5. Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?
6. Какие течения жидкости называют ламинарными и турбулентными? Как определяются числом Рейнольдса эти течения?
7. Почему измерения верны только при малых скоростях?
8. Для какой жидкости глицерина или воды коэффициент вязкости можно определить точнее рассматриваемым методом?
9. Почему путь, проходимый шариком, отсчитывают не от поверхности жидкости?
10. Как экспериментально проверить постоянство скорости движения шарика?
11. Напишите и сформулируйте закон Ньютона для определения силы внутреннего трения при ламинарном течении жидкости.
12. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения η . От чего он зависит и в каких единицах измеряется в СИ?
13. Как возникает сила сопротивления, действующая на движущийся в жидкости шарик?
14. Охарактеризуйте другие явления переноса (диффузию и теплопроводность). Каким законам они подчиняются?

Литература

1. Трофимова, Т.И. Основы физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 2007. – Книга 2: Молекулярная физика и термодинамика.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1977. – т.1.

Составители: Кандилян Генрик Сережаевич
Янусик Ирина Семёновна
Хуснутдинова Венера Ямалетдиновна

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
M20 Определение коэффициента вязкости
жидкостей по методу Стокса

Ответственный за выпуск: Хуснутдинова В.Я.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная верстка: Кармаш Е.А.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 05.11.2012 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 0,69. Уч. изд. л. 0,75. Заказ № 1342. Тираж 60 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».
224017, г. Брест, ул. Московская, 267