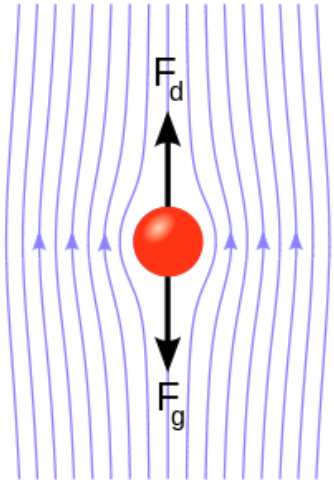
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



ФИЗИКА

Лабораторная работа

«Определение коэффициента динамической вязкости жидкости методом Стокса»

Кафедра физики: доц. Щепин В.И.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{ж} \cdot V \cdot d}{\eta}$$

Иркутск – 2019

4.5 Лабораторная работа «*Определение коэффициента динамической вязкости жидкости методом Стокса*»

Цель работы: *изучение явления внутреннего трения в жидкостях и опытное определение величины коэффициента вязкости жидкости методом Стокса на виртуальной лабораторной установке.*

Краткая теория

Различают два типа течения вязкой жидкости - *ламинарное и турбулентное*. *Турбулентным* называется такое течение жидкости, при котором её частицы совершают неустановившееся и неупорядоченные движения по сложным траекториям, приводящим к перемешиванию слоёв. *Ламинарное* – это упорядоченное течение жидкости, при котором траектории движения соседних частиц мало отличаются друг от друга. При ламинарном течении жидкость можно рассматривать как совокупность отдельных слоёв, движущихся с различными скоростями. Это обусловлено тем, что при движении слоев жидкости относительно друг друга с различными скоростями между ними возникает тормозящая сила, это сила внутреннего трения, или сила *вязкости*.

Вязкость *– это свойство жидкости оказывать противодействие перемещению её слоёв относительно друг друга.*

При движении тела в жидкой среде, например, лодки возникают силы, которые противодействуют этому движению. При движении жидкости в цилиндрической трубе скорость течения слоев от оси к стенкам постепенно убывает. Максимальную скорость имеет жидкость, движущая вдоль оси трубы и равна нулю у частиц, прилегающих к стенке. Между соседними слоями происходит взаимодействие, обусловленное силой которая замедляет движение более быстрых слоев и ускоряет движение медленных слоев.

Рассмотрим перемещение в жидкости пластинки параллельно плоской стенке (рис. 1).

Для перемещения пластинки необходимо приложить силу, по величине равную силе трения. Если слои жидкости находятся на расстоянии ΔX и движутся с различными скоростями, то верхние слои будут ускорять движение средних слоёв, а нижние – замедлять.

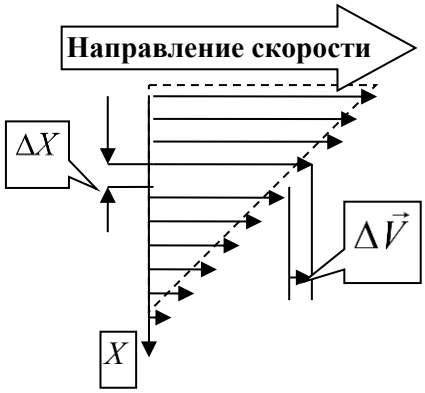


***Рис. 1*. Распределение скорости между движущейся пластинкой и стенкой**

Природа этих сил заключается в том, что слои жидкости, движущиеся с разными скоростями, обмениваются энергией: слои с молекулами, имеющими большую скорость, передают некоторое количество движения более медленным слоям, ускоряя их, но при этом сами подвергаются торможению. Ньютон показал, что сила внутреннего трения, действующая на средние слои, прямо пропорциональна градиенту скорости слоев в направлении, перпендикулярном течению:

$$F_{тр} = \eta \left| \frac{d\vec{V}}{dX} \right| S .$$

где η – коэффициент динамической вязкости, равный силе внутреннего трения, возникающей на единице поверхности соприкосновения слоев, движущихся относительно друг друга с *градиентом скорости*, равным единице. *Градиент скорости* – это изменение скорости двух слоёв жидкости *dV* на расстоянии между слоями *dX*. Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости и уменьшается с повышением ее температуры. Закон Ньютона определяет также силу трения, возникающую на границе между жидкостью и движущимся в ней твердым телом, например, шариком. В системе СИ коэффициент динамической вязкости измеряется в паскаль секундах.

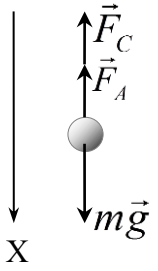


Рис. 2

$$[\eta] = паскаль \cdot секунда \Rightarrow (Па \cdot с) = Н \cdot с / м^2 = кг/(м \cdot с);$$

До 1980г. применяли единицу измерения *пуаз (П);* $1\ пуаз = 0{,}1\ Па \cdot с$;

Метод Стокса. Стоксом был предложен метод определения коэффициента динамической вязкости η, основанный на анализе движения шарика, свободно падающего в вязкой жидкости. Это возможно, если плотность материала шарика $\rho_ш$ больше плотности жидкости $\rho_ж$, в которой он движется. Характер движения шарика определяется тремя действующими на него силами (рис.2): силой тяжести $m\vec{g}$, выталкивающей силой Архимеда $\vec{F}_A$ и силой вязкого трения $\vec{F}_C$. Уравнение движения шарика из основного закона динамики в данном случае принимает вид

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C, \qquad (1)$$

где m – масса шарика; $\vec{v}$ – скорость его движения относительно жидкости; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения. В проекции на ось оx, т.е. на направление движения шарика, уравнение (1) запишется следующим образом:

$$m\frac{dV_x}{dt} = mg - F_A - F_C.$$

Особенность силы вязкого трения заключается в том, что ее величина зависит от скорости движения тела относительно жидкости. При малых скоростях эта зависимость прямо пропорциональна. В начале, при увеличении скорости тела сила трения возрастает настолько, что движение становится равномерным. Если тело имеет постоянную скорость, т.е. движение установившееся, то $dV/dt = 0$; получим уравнение

$$mg - F_A - F_C = 0. \qquad (2)$$

Выразим составляющие силы, входящие в уравнение (2), через параметры жидкости и шарика. Для тел сферической формы модуль силы вязкого трения определяется формулой Стокса

$$F_C = 6\pi\eta rV, \qquad (3)$$

где r – радиус шарика; V – скорость его движения относительно жидкости.

Важно отметить, что формула (3) справедлива только в случае *ламинарного* течения жидкости относительно шарика (скорость движения шарика должна быть небольшой), а жидкость по всем направлениям простирается безгранично, т.е. размеры сосуда, в котором находится

жидкость, должны быть много больше по сравнению с размерами шарика. Условия ламинарности можно считать выполненными, если число Рейнольдса $Re < Re_{кр}$:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{ж} \cdot V \cdot d}{\eta} . \qquad (4)$$

Здесь $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, а критическое значение числа Рейнольдса для шарика $\mathrm{Re}_{кр}$, движущегося в жидкости, можно принять равным единице.

Выразим массу шарика через его плотность и объем:

$$m = \rho_{ш} \frac{4}{3} \pi r^3 . \qquad (5)$$

Тогда выражение для архимедовой силы принимает вид

$$F_A = \rho_{ж} \frac{4}{3} \pi r^3 g . \qquad (6)$$

Подставляя выражения (3), (4) и (5) в уравнение (2) и учитывая, что $d=2r$, после простых преобразований получим:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж}) d^2 g}{V} . \qquad (6)$$

Описание экспериментальной установки

Установка для реализации метода Стокса состоит из стеклянного цилиндра 1, в котором находится исследуемая жидкость, вязкость которой необходимо определить (рис. 3). На цилиндре имеются метки 3 и 4. Расстояние между метками L можно замерить при помощи линейки 6, а диаметр шарика – при помощи микрометра. Время прохождения между метками 3 и 4 можно определить с помощью секундомера 5. Метка 3 помещена на несколько сантиметров ниже верхнего уровня жидкости для выполнения условия равномерного движения шарика в жидкости; V = const на участке L. Цилиндр закрыт пробкой с воронкой, в которую опускается шарик, двигающийся в дальнейшем примерно по оси цилиндра так, чтобы на его движение не влияли стенки. При более точных измерениях необходимо учитывать влияние размеров стеклянного цилиндра. Исследуемой жидкостью, вязкость которой необходимо определить, является глицерин в которой свободно падает стальной шарик.

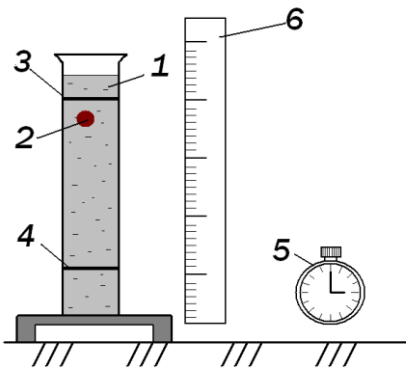


Рис. 3. Установка для измерения вязкости жидкости по методу Стокса

Плотность стального шарика $\rho_ш = (7{,}8 \pm 0{,}1)10^3$ кг/м^3.

Плотность исследуемой жидкости $\rho_ж = (1{,}26 \pm 0{,}01)10^3$ кг/м^3.

Эксперимент можно проводить как на физической, так и на виртуальной модели установки.

Если в выражении (6) скорость равномерного движения шарика в жидкости V заменить отношением L/t, то получим:

$$\eta = \frac{1}{18}\frac{(\rho_ш - \rho_ж)d^2 gt}{L}. \qquad (7)$$

Порядок выполнения работы

Перед началом измерений: получить свой вариант задания и допуск у ведущего преподавателя; ознакомиться с работой виртуальной лабораторной установки, провести пробные измерения (п. 2-3) для различных значений диаметра шарика d и расстояния между метками L, определяя время прохождения между метками при помощи секундомера.

Внимание! ***Вариант задания выдается преподавателем или определяется по таблице вариантов и номеру зачетной книжки.***

1. Занести в таблицу заданные в вашем варианте значения: расстояние L_i (между метками 3 и 4 (см. рис.3), диаметр шарика d_i и его плотность $\rho_ш$, а также плотность исследуемой жидкости $\rho_ж$.

Таблица.

№ п/п	$\rho_ш$, кг/м^3	$\rho_ж$, кг/м^3	L_i, м	ΔL, м	d_i, м	Δd, м	t_i, с	Δt, с	V, м/с	Re	η, $Па \cdot с$	$\Delta\eta$, $Па \cdot с$	$\overline{\eta}$, $Па \cdot с$

2. Сбросить шарик в сосуд с жидкостью. В момент касания шариком верхней метки запустить секундомер, а в момент касания шариком нижней метки остановить его. Записать в таблицу показание секундомера t_i.
3. Кнопкой «СБРОС» установить нуль на табло секундомера.
4. Повторить измерения еще четыре раза, задавая различные значения диаметра шариков d_i и расстояние L_i между метками (пп. 4 и 5).
5. Результаты опытов занести в таблицу измерений.
6. Вычислить коэффициент вязкости η для каждого из пяти опытов по рабочей формуле (6) или (7).
7. Найти среднее значение коэффициента вязкости как

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

8. Определить абсолютные приборные погрешности прямых измерений (расстояния между метками ΔL, диаметр шарика Δd, время его падения Δt, плотности шарика $\Delta\rho_ш$ и жидкости $\Delta\rho_ж$), а также их относительные ошибки ε_L, ε_d, ε_ρ и ε_t.
9. Оценить полную абсолютную $\Delta\eta$ и относительную ε погрешности.
10. Записать конечный результат в виде $\eta = \overline{\eta} \pm \Delta\eta$.
11. Сравнить полученное значение η со справочными данными.
12. По результатам эксперимента сделать выводы.

Замечание. Оценку абсолютной погрешности коэффициента вязкости $\Delta\eta$ рассчитать по методике расчёта погрешностей косвенных

$$\Delta\eta = \overline{\eta}\sqrt{(2\varepsilon_d)^2 + \varepsilon_\rho^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_L^2}, \qquad (8)$$

или

$$\Delta\eta = \overline{\eta}\sqrt{4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}\,. \qquad (8a)$$

Сравните вклад слагаемых величин в общую величину абсолютной погрешности в формулах (8, 8а).

Определение варианта

Всего необходимо выполнить пять измерений. Четыре измерения по заданию из табл., пятое измерение – произвольные значения расстояния между метками L и диаметр шарика d. Последние две цифры номера зачётной книжки указывают на Ваш вариант. Например, номеру зачетной книжки **№645693 соответствует вариант 93,** находим в таблице значения $L =$ **61-66, *см***; $d =$ **4,3-4,8, *мм***;

Измерения:

1. $L =$ **61 *см*** $d =$ **4,3 *мм***
2. $L =$ **61 *см*** $d =$ **4,8 *мм***
3. $L =$ **66 *см*** $d =$ **4,3 *мм***
4. $L =$ **66 *см*** $d =$ **4,8 *мм***
5. $L =$ **63 *см*** $d =$ **4,5 *мм***

Пятое измерение – задаются произвольные значения расстояния между метками $L =$ **61-66, см.** и диаметра шарика $d =$ **4,3-4,8, *мм***

($L =$ **63 *см,*** и $d =$ **4,5 *мм***).

Контрольные вопросы

1. Поясните сущность явления вязкого трения. Какова природа сил внутреннего трения жидкости?
2. Что такое коэффициент динамической вязкости? В каких единицах измеряется величина вязкости η в системе СИ?
3. Какие силы действуют на тело, движущееся в жидкости?
4. Дайте определение ламинарного и турбулентного течения жидкости.
5. Запишите формулу Стокса и укажите условия ее применимости.
6. Оцените величину силы трения, действующей на стальной шарик диаметром 3 мм, падающий со скоростью 0,75 м/с в жидкости с коэффициентом вязкости 1,5 Па·с.

7. Почему шарик в начале движения ускоряется, а затем движется равномерно? Что такое градиент скорости?
8. Запишите рабочую формулу, объясните условия её применения и причину начала измерения времени не от поверхности жидкости.
9. Перечислить основные источники погрешностей измерений, проводимых в данной работе.

Литература

1. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 557 с.
2. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 9-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 719 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М. : Наука, 2012. Т. 1, 2, 3.
4. Лабораторные работы : метод. указания по выполнению лабораторных работ / сост. В.И. Щепин. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2009. – Ч.1. – 64 с.
5. Лабораторные работы : сост. В.И. Щепин. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2010. – Ч.2 – 64с.
6. Щепин В.И. Физика: лаб. практикум. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017, – 132 с.