

Лабораторная работа 2-4: Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Студент _____ группа _____

Допуск _____ Выполнение _____ Защита _____

Цель работы: Определить коэффициент вязкости жидкости методом падающего шарика (методом Стокса).

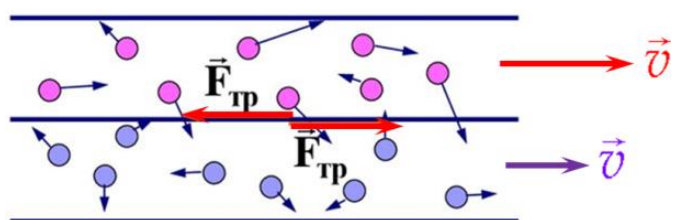
Приборы и принадлежности: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, шарики, масштабная линейка, секундомер.

Теоретические сведения

Внутреннее трение (или **вязкость**) связано с возникновением сил трения между соседними слоями жидкости или газа, которые перемещаются параллельно друг другу с различными по модулю скоростями.

Механизм возникновения сил вязкого трения в жидкостях и газах несколько отличаются.

В газах вязкость возникает в результате непрерывного обмена молекулами между движущимися с разными скоростями слоями газа вследствие хаотического теплового движения молекул газа.



Молекулы из быстрого слоя переходят в медленный слой и ускоряют его и, наоборот, молекулы из медленного слоя переходят в быстрый слой и тормозят его. В результате таких переходов происходит перенос импульса молекул между слоями, что

способствует выравниванию скоростей соседних слоёв и возникновению сил вязкого трения между ними.

В жидкостях силы вязкости возникают в основном не за счёт перехода молекул из одного слоя в другой, а за счёт сил межмолекулярного притяжения между молекулами соседних движущихся слоёв. Со стороны слоя, движущегося более быстро силы межмолекулярного притяжения вызывают ускоряющую силу, а со стороны слоя, движущегося более медленно, на более быстрый слой действует замедляющая сила. Это так же приводит к выравниванию скоростей соседних слоёв и возникновению сил вязкого трения между ними.

Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Для сил внутреннего трения в газах справедлив **закон Ньютона**:

Сила внутреннего трения $F_{тр}$, действующая на движущийся слой газа площадью

S , прямо пропорциональна градиенту скорости $\frac{dv}{dx}$ движения слоёв:

$$F_{тр} = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (1)$$

где η (эта) - коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$ (Паскаль-секунда),

$$\left[\frac{dv}{dx} \right] = \frac{\frac{m}{c}}{\frac{m}{c}} = \frac{1}{c} \quad - \text{градиент скорости, } \frac{1}{c}, \text{ (показывает на сколько } \frac{m}{c} \text{ изменяется}$$

скорость газа в направлении оси x , перпендикулярной к направлению скорости слоёв, на расстоянии 1 м от данного слоя),

S - величина площади поверхности, на которую действует сила вязкого трения $F_{\text{тр}}$.

Формула Стокса

При небольших скоростях тела v в какой-либо жидкой или газообразной среде, сопротивление среды обусловлено практически только силами трения. Стокс установил, что сила сопротивления в этом случае пропорциональна коэффициенту динамической вязкости η (эта), скорости движения тела v относительно жидкости и характерному размеру тела (предполагается, что расстояние от тела до границ жидкости, например до стенок сосуда, значительно больше размеров тела). Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара радиусом r коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях (когда жидкость или газ обтекают тело ламинарным потоком) в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v. \quad (2)$$

Данное соотношение лежит в основе метода определения коэффициента вязкости η , предложенного Стоксом.

Сущность его заключается в следующем. Если опустить небольшой шарик в вязкую жидкость и предоставить возможности шарiku падать, то на него будут действовать сила тяжести mg , сила Архимеда $\vec{F}_{\text{Арх}}$ и сила вязкого трения $\vec{F}_{\text{тр}}$.

В начале характер движения шарика в жидкости ускоренный, но по мере его движения скорость шарика v увеличивается, а, следовательно, увеличивается и сила

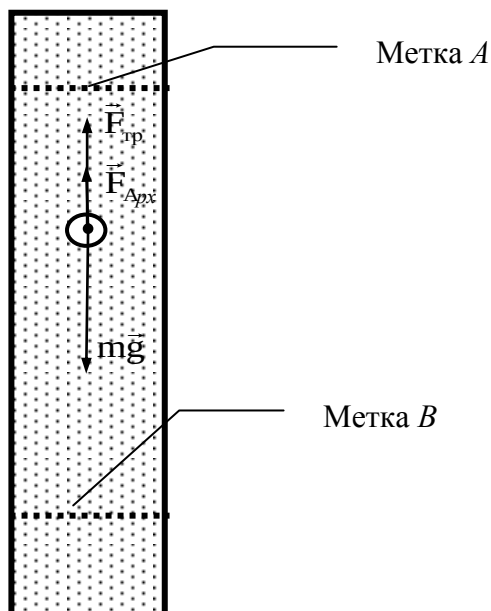


Рис. 2.

вязкого трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (см. равенство 2). Поэтому в некоторый момент времени векторная сумма сил, действующих на шарик, становится равной нулю. После этого движение шарика согласно первому закону Ньютона будет равномерным.

Из первого закона Ньютона для шарика в проекции на вертикальную ось имеем следующее соотношение:

$$mg - F_{\text{Арх}} - F_{\text{тр}} = 0 \Rightarrow \rho V g - \rho_1 V g - 6\pi\eta r v = 0,$$

где ρ и V - плотность и объём шарика

соответственно ($V = \frac{4}{3}\pi r^3$),

ρ_1 - плотность жидкости, v - скорость равномерного движения шарика на участке АВ (см. рис. 2).

Отсюда можно выразить коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) g \frac{4}{3} \pi r^3}{6 \pi r v} = \frac{(\rho - \rho_1) g 2 r^2}{9 v}. \quad (3)$$

Заменяя в равенстве (3) радиус шарика на его диаметр $r = \frac{d}{2}$, получим следующее соотношение:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) g d^2}{18 v}. \quad (4)$$

Определив время прохождения τ шариком участка AB , находим скорость равномерного движения шарика по формуле $v = \frac{L}{\tau}$, а, следовательно, окончательную формулу для вычисления коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) g d^2 \tau}{18 L}. \quad (5)$$

Прибор для определения коэффициента вязкости показан на рис. 2. Он состоит из стеклянного цилиндра, наполненного исследуемой жидкостью. Вверху цилиндр закрыт крышкой с отверстием посередине для опускания шарика. На поверхности цилиндра имеются две отметки A и B , расположенные друг от друга на расстоянии L . Метки выполнены в виде колец из тонкой проволоки или резины. Верхняя метка опущена ниже уровня жидкости на 8-10 см. На этом участке (8–10 см) шарик достигает постоянной скорости.

Порядок выполнения работы

1. Возьмите у инженеров 7 - 8 дробинok круглой формы. Диаметр каждой дробинки $d \approx 3 \text{ мм}$.

2. Осторожно опустите шарик через отверстие в крышке, расположенной в верхней части цилиндра с жидкостью. Одновременно с опусканием шарика в отверстие фиксируйте глазом верхнюю метку A . Кольцо должно сливаться в прямую линию.

3. Вам необходимо определить время τ (тау) прохождения дробинкой расстояния между метками A и B . Для этого при прохождении шарика через верхнюю метку A включите секундомер. Сразу же после прохождения шарика через верхнюю метку зафиксируйте глаз на нижней метке B . При прохождении шарика через нижнюю метку B выключите секундомер.

Измерительной линейкой определите расстояние между метками A и B .

Опыт повторите 7- 8 раз, выберите из этих результатов 5 наиболее близких друг к другу и результаты занесите в таблицу 1.

4. По формуле

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) g d^2 \tau}{18 L}$$

вычислите величину коэффициента вязкости исследуемой жидкости. Диаметр дробинки возьмите равной $d = 3 \text{ мм}$.

5. Найдите среднее значение $\langle \eta \rangle$ коэффициента вязкости:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\sum \eta_i}{n},$$

где n - число измерений.

6. Определите среднеквадратичное отклонение коэффициента вязкости:

$$S_{\langle \eta \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_i (\eta_i - \langle \eta \rangle)^2}{n(n-1)}}, \text{ где } n \text{ число измерений.}$$

7. Ответ запишите в виде: $\eta = \langle \eta \rangle \pm t_{p,k} S_{\langle \eta \rangle}$, где коэффициент Стьюдента $t_{p,k} = 2,8$ для вероятности доверительного интервала $p = 0,95$ при числе измерений $n = 5$.

8. Из сравнения полученного Вами значения коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$ со значениями из таблицы 2, определите какую жидкость Вы исследовали.

9. Определите относительную погрешность Ваших измерений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|\eta_{\text{табличное}} - \langle \eta \rangle|}{\eta_{\text{табличное}}} \cdot 100\%,$$

где $\eta_{\text{табличное}}$ - табличное значение коэффициента вязкости (из Таблицы 2).

Таблица 1

№ опыта	τ , с	L , м	d , м	ρ , кг/м ³	ρ_1 , кг/м ³	η , Па·с	$\langle \eta \rangle$, Па·с	S_η , Па·с
1								
2								
3								
4								
5								

Коэффициент вязкости жидкостей η при 25 °C Таблица 2

Жидкость	η , Па·с
Оливковое масло	0,081
Моторное масло	0,319
Машинное масло	0,985
Кукурузный сироп	1,381
Глицерин	1,490

Контрольные вопросы

1. Какую группу явлений называют явлениями переноса?
2. Что такое диффузия? Запишите закон Фика для явления диффузии.
3. Что такое теплопроводность? Запишите закон Фурье для явления теплопроводности.
4. Что такое вязкость (или внутреннее трение)? Запишите закон Ньютона для явления внутреннего трения.
5. Запишите формулу Стокса. Укажите границы её применимости.
6. Что такое ламинарное и турбулентное течение?

Ответы на контрольные вопросы

1. Какую группу явлений называют явлениями переноса?

Явлениями переноса называют группу процессов, связанных с неоднородностями плотности (диффузия), температуры (теплопроводность) и скорости упорядоченного перемещения отдельных слоёв вещества (вязкость).

Выравнивание таких неоднородностей и приводит к возникновению явлений переноса: **диффузии, теплопроводности** и **вязкости** (или **внутреннего трения**).

3. Что такое диффузия? Запишите закон Фика для явления диффузии

Диффузией называется явление самопроизвольного взаимного проникновения соприкасающихся веществ друг в друга вследствие теплового движения атомов или молекул вещества, приводящее к выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму.

(переносимой величиной является масса вещества m).

В химически однородном веществе явление диффузии заключается в переносе массы вещества из мест с большей концентрацией молекул, в места с их меньшей концентрацией.

Явлением диффузии объясняется распространение запахов, смешивание разнородных жидкостей, процесс растворения твердых тел в жидкостях и многое другое.

Явление диффузии наблюдается во всех средах: твёрдых, жидких и газообразных, однако происходит она с разными скоростями.

Закон Фика для явления диффузии

Наблюдения показывают, что скорость диффузии прямо пропорциональна площади поперечного сечения образца, а также разности концентраций взаимодействующих веществ. Процесс диффузии ускоряется с повышением температуры, так как увеличивается скорость теплового движения молекул.

Явление диффузии в газах описывается **законом Фика**:

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS dt, \quad (1)$$

где dm - масса, переносимая в процессе диффузии за время dt через площадку площадью dS , расположенную перпендикулярно потоку вещества, кг,

$\frac{d\rho}{dx}$ - градиент плотности вещества (показывает на сколько $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ изменяется плотность

вещества ρ при перемещении на 1 метр вдоль направления потока вещества), $\left[\frac{d\rho}{dx} \right] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$.

dS - элемент площади поверхности, м^2 ; dt - время, с,

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle - \text{коэффициент диффузии, } [D] = \frac{m^2}{c},$$

$\langle l \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекулы, м ;

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8 kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8 RT}{\pi \mu}} - \text{средняя арифметическая скорость молекулы газа, } \frac{m}{c};$$

m_0 - масса одной молекулы газа, кг.

Знак минус « - » в уравнении (1) указывает на то, что диффузия происходит в направлении уменьшения плотности вещества.

4. Что такое теплопроводность? Запишите закон Фурье для явления теплопроводности

Теплопроводностью называется процесс передачи теплоты от более нагретых участков тела менее нагретым в результате теплового движения молекул.

(переносимой величиной является тепловая энергия Q).

Теплопроводность возникает при наличии разности температур, вызванной какими-либо внешними причинами.

Закон Фурье для явления теплопроводности

Явление теплопроводности в газах описывается **законом Фурье**:

$$dQ = -K \frac{dT}{dx} dS dt, \quad (2)$$

где dQ - переносимая в процессе диффузии за время dt через площадку площадью dS , расположенную перпендикулярно потоку вещества,

$$K = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_V - \text{коэффициент теплопроводности, } [K] = \frac{B_T}{m \cdot K}$$

ρ - плотность вещества, $\frac{кг}{м^3}$; $\langle v \rangle$ - средняя арифметическая скорость молекулы газа, $\frac{м}{с}$,

$\langle l \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекулы, м ;

c_V - удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$,

$\frac{dT}{dx}$ - градиент температуры (показывает, на сколько градусов изменяется температура

вещества при перемещении на 1 метр вдоль направления потока теплоты), $\left[\frac{dT}{dx} \right] = \frac{K}{m}$,

dS - элемент площади поверхности, $м^2$; dt - время, с.

Знак минус « - » в уравнении (2) указывает на то, что теплопроводность происходит в направлении уменьшения температуры вещества.

5. Что такое вязкость (или внутреннее трение)?

Запишите закон Ньютона для явления внутреннего трения

Вязкостью (или **внутренним трением**) называется свойство текучих сред (газов, жидкостей, расплавленных металлов) оказывать сопротивление перемещению частей среды относительно друг друга.

(переносимой величиной является импульс p).

Внутреннее трение (вязкость) связано с возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными по модулю скоростями.

Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила и, наоборот, медленно перемещающиеся слои тормозят более быстро движущиеся слои газа.

Механизм возникновения сил вязкого трения в жидкостях и газах несколько отличаются.

В газах вязкость возникает в результате непрерывного обмена молекулами между движущимися с разными скоростями слоями газа вследствие хаотического теплового движения молекул газа.

Молекулы из быстрого слоя переходят в медленный слой и ускоряют его и, наоборот, молекулы из медленного слоя переходят в быстрый слой и тормозят его. В результате таких переходов происходит перенос импульса молекул между слоями, что способствует выравниванию скоростей соседних слоёв и возникновению сил вязкого трения между ними.

В жидкостях силы вязкости возникают в основном не за счёт перехода молекул из одного слоя в другой, а за счёт сил межмолекулярного притяжения между молекулами соседних движущихся слоёв. Со стороны слоя, движущегося более быстро силы межмолекулярного притяжения вызывают ускоряющую силу, а со стороны слоя, движущегося более медленно, на более быстрый слой действует замедляющая сила. Это так же приводит к выравниванию скоростей соседних слоёв и возникновению сил вязкого трения между ними.

Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. С молекулярно-кинетической точки зрения причиной вязкости является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями $\vec{v}$ и хаотического теплового движения молекул.

Явление вязкости в газах описывается **законом Ньютона** (1687) (или **уравнением внутреннего трения**):

$$dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS dt, \quad (3)$$

где dp - импульс, переносимый в процессе вязкого трения за время dt через площадку площадью dS , расположенную перпендикулярно потоку вещества, $H \cdot c$,

$\frac{dv}{dx}$ - градиент скорости (показывает, на сколько $\frac{m}{c}$ изменяется скорость течения среды при

перемещении на 1 метр от слоя к слою перпендикулярно течению жидкости), $\left[\frac{dv}{dx} \right] = \frac{1}{c}$,

$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$ - коэффициент вязкости, $Па \cdot c$ (Паскаль-секунда),

$\langle l \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекулы, m ;

dS - элемент площади поверхности, m^2 ; dt - время, c .

Знак минус « - » в уравнении (3) указывает на то, что вязкость происходит в направлении уменьшения скорости

6. Запишите формулу Стокса. Укажите границы её применимости.

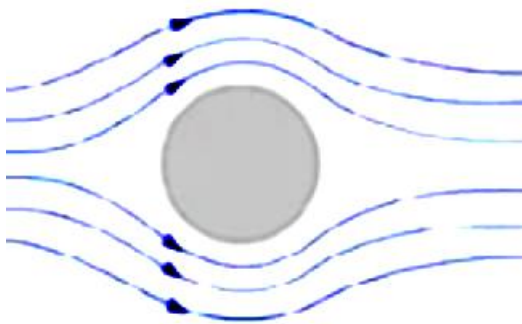
При небольших скоростях тела v в какой-либо жидкой или газообразной среде, сопротивление среды обусловлено практически только силами трения. Стокс установил, что сила сопротивления в этом случае пропорциональна коэффициенту динамической вязкости η (эта), скорости движения тела v относительно жидкости и характерному размеру тела (предполагается, что расстояние от тела до границ жидкости, например до стенок сосуда, значительно больше размеров тела). Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара радиусом r коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях (когда жидкость или газ обтекают тело ламинарным потоком) в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{тр} = 6\pi\eta r v.$$

Формула Стокса справедлива только в случае ламинарного течения жидкости вокруг данного тела.

7. Что такое ламинарное и турбулентное течение?

Ламинарным (или **слоистым**) называется течение, при котором слои жидкости текут не перемешиваясь, скользя относительно друг друга.

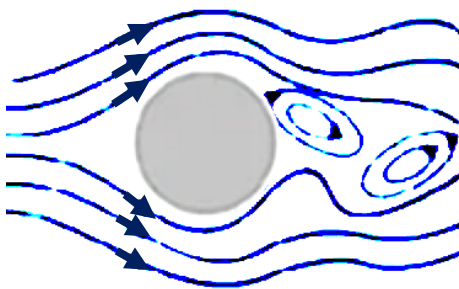


Оно характерно при малых скоростях течения и небольшой вязкости жидкости.

При ламинарном течении скорость частиц жидкости в каждой точке пространства остаётся неизменной.

Однако при достаточно больших скоростях ламинарное течение оказывается неустойчивым и переходит в так называемое турбулентное течение.

Турбулентным (или **вихревым**) называется течение, при котором в жидкости возникают завихрения.



При турбулентном течении скорость и давление в каждой точке потока быстро и нерегулярно изменяются во времени. Частицы жидкости совершают неустойчивые движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию слоёв движущейся жидкости.