

Определение коэффициента динамической вязкости жидкости по методу Стокса

Цель работы: изучение явления внутреннего трения в жидкостях, определения динамической вязкости жидкости.

Краткая теория

Отличительной особенностью газов и жидкостей является их текучесть, которая обусловлена малыми силами трения при относительном движении соприкасающихся слоев.

Внутренним трением (вязкостью) называется явление возникновения сил, препятствующих относительному перемещению слоев жидкости либо газа. Силы внутреннего трения направлены вдоль соприкасающихся слоев. Их величина зависит от относительных скоростей слоев.

Причиной возникновения внутреннего трения в жидкостях (газах) является перенос молекулами жидкости импульсов между соприкасающимися слоями. Когда соседние слои жидкости движутся с различными скоростями, переход молекул из одного слоя в другой приводит к замедлению слоя движущегося быстрее и увеличению скорости слоя, движущегося медленнее (Рис. 1).

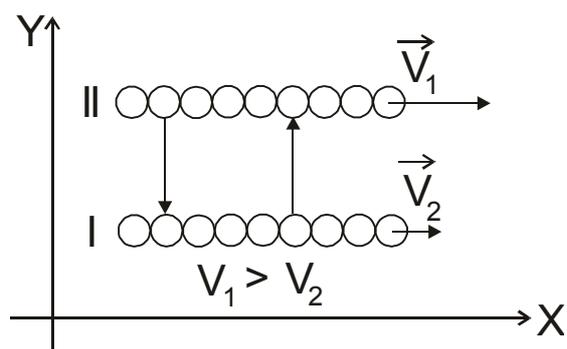


Рис.1. Схема движения слоев жидкости

Очевидно, что сила трения для верхнего слоя будет направлена влево (против \vec{V}_1), а для нижнего слоя вправо (по \vec{V}_2).

Аналогично объясняется механизм внутреннего трения в газах.

Для поддержания течения вязкой жидкости работа сил давления должна превышать работу сил внутреннего трения.

Рассмотрим механизм возникновения вязкости на примере.

Представим две плоскости, поверхности которых смачиваются жидкостью, причем 1-ая поверхность – подвижная, 2-ая – неподвижная (Рис. 2).

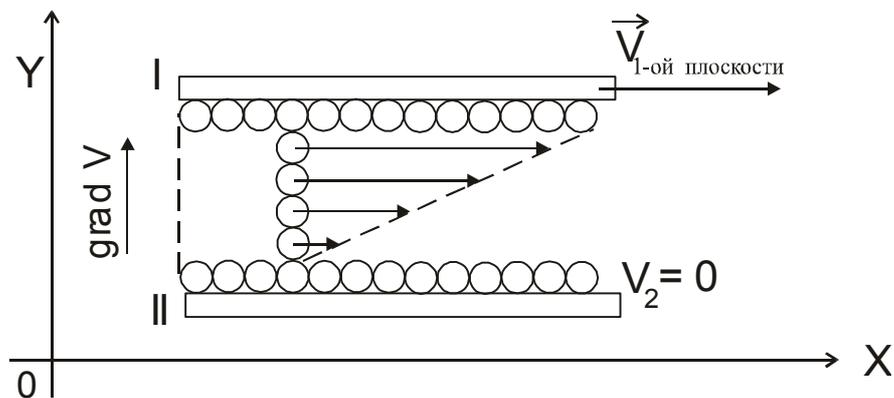


Рис. 2. Диаграмма скоростей слоев жидкости

Молекулы, соприкасающиеся с подвижной плоскостью, будут иметь $\vec{v} = \vec{v}_{1пл.}$, а соприкасающиеся с неподвижной плоскостью $\vec{v} = \vec{v}_2 = 0$. Следовательно, поле скоростей слоев можно представить в виде (Рис. 2).

Градиент скорости будет направлен перпендикулярно 1-ой плоскости в сторону возрастания функции.

Очевидно, что сила внутреннего трения тем больше, чем больше площади рассматриваемых поверхностей S .

Величина $gradV$ показывает изменение скорости, которое приходится на единицу расстояния, отсчитываемого перпендикулярно скорости (того как быстро изменяется величина скорости \vec{v} от слоя к слою):

$$gradV = \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_x. \quad (1)$$

Опытным путем Стокс установил, что при ламинарном течении жидкости модуль силы внутреннего трения (вязкости):

$$F = \eta \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \cdot S, \quad (2)$$

где η - динамическая вязкость (коэффициент зависящий от

природы жидкости)

$\frac{\partial V}{\partial y}$ - градиент скорости слоев.

При ламинаризованном течении и градиенте скорости с модулем 1 м/сек на 1 м., возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев, следовательно размерность величины η определяется как: $\left[\frac{Н \cdot сек}{м^2} \right] = [Па \cdot сек]$.

Величина вязкости зависит от температуры. Для жидкостей с увеличением температуры вязкость уменьшается (в технике это приводит к ухудшению качества смазки трущихся поверхностей). Для газов с повышением температуры вязкость увеличивается.

В данной работе для определения вязкости используется метод Стокса. Этот метод основан на измерении скорости движущихся в жидкости небольших тел сферической формы.

Пусть небольшой шарик радиусом r падает в жидкости. На шарик, падающий в жидкости действуют три силы.

1. Сила тяжести $F_m = mg = \rho_{ш} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g$,

где $\rho_{ш}$ - плотность шарика; $g = 9,81 \left[\frac{М}{с^2} \right]$ - ускорение свободного падения.

2. Сила Архимеда $F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ж} g$, где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости.

кости.

3. Сила сопротивления, эмпирически установленная Стоксом, $F_C = 6\pi\eta rV$, где V – скорость шарика.

На участке равномерного движения шарика: $\vec{F}_m + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0$,
 $F_m = F_A + F_C$ или $F_m - F_A = F_C$ т. е.

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

Откуда находим коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж}) \cdot r^2 g}{V}. \quad (4)$$

Если заменить в формуле (4.4) значение скорости V через $\frac{L}{t}$ (путь деленный на время падения), а радиус шарика r через половину его диаметра $\frac{d}{2}$, то формула примет вид:

$$\eta = \frac{d^2(\rho_{ш} - \rho_{ж})}{18L} gt, \quad (5)$$

где d – диаметр шарика;

L – длина участка равномерного падения шарика;

t – время прохождения шариком мерного участка.

Очевидно, что для определения коэффициента вязкости жидкости необходимо на опыте определить значения величин входящих в формулу (5).

Выполнение работы

Приборы и материалы: цилиндрический сосуд с вязкой жидкостью, шарики, весы с разновесами, микрометр, секундомер, ареометр, термометр, линейка.

Цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (касторовое масло или глицерин) прикреплен к деревянному штативу (рис. 3).

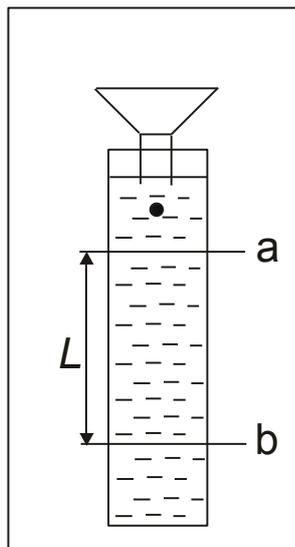


Рис.3. Схема установки

Сосуд закрыт крышкой, в которую вставлена воронка, служащая для направления движения шарика по оси цилиндра. На штативе нанесены метки «a» и «b» на расстоянии L друг от друга.

Порядок выполнения работы

1. Взять 5 стальных шариков. Измерить микрометром диаметр каждого шарика. Найти общую массу шариков путём взвешивания. Вычислить их плотность по формуле

$$\rho_{ш} = \frac{\sum m}{\frac{1}{6}(\pi \sum d^3)}, \quad (6)$$

где $\sum d^3 = 5 \cdot \bar{d}^3$;

\bar{d} - средний диаметр шариков;

$\sum m$ - масса пяти шариков, определяемая на весах.

2. Определить ареометром плотность $\rho_{ж}$ исследуемой жидкости, находящейся в мензурке, которая наполнена той же жидкостью, что и сосуд Стокса. При этом нужно следить, чтобы ареометр находился на оси сосуда, а не вблизи его стенок.

3. Длину пройденного шариком пути L между метками «а» и «в» измеряют линейкой.

4. Измерить время падения шариков на пути L . Для этого опустить в цилиндр с жидкостью через воронку шарик и в момент прохождения его через метку «а» включить секундомер. В момент прохождения шарика метки «в» секундомер остановить. Показания секундомера соответствует времени t движения шарика по пути L . Скорость шарика значительна, поэтому подготовиться к наблюдениям необходимо тщательно, чтобы не упустить момент прохождения шарика через метки.

5. Температуру окружающей среды определить по термометру.

Данные всех измерений записать в табл.1.

Таблица 1

Результаты измерений

$\sum m$	$\Delta(\sum m)$	$\rho_{ш}$	$\Delta\rho_{ш}$	$\rho_{ж}$	$\Delta\rho_{ж}$	L	ΔL	d	Δd	t	Δt
<i>кг</i>		<i>кг/м³</i>				<i>м</i>				<i>с</i>	
<i>Температура жидкости</i>								$\bar{d} =$	$\Delta\bar{d} =$	$\bar{t} =$	$\Delta\bar{t} =$

6. Коэффициент вязкости вычислить по формуле (5), подстановкой средних значений.

Вычисление погрешностей

Относительная погрешность измерения плотности шариков:

$$E_{\rho_{ш}} = \frac{\overline{\Delta\rho_{ш}}}{\overline{\rho_{ш}}} = \frac{\Delta\sum m}{\sum m} + 3 \cdot \frac{\overline{\Delta d}}{d}. \quad (7)$$

Абсолютная погрешность для плотности шариков:

$$\overline{\Delta\rho_{ш}} = E_{\rho_{ш}} \cdot \overline{\rho_{ш}}. \quad (8)$$

Относительная погрешность измерения коэффициента вязкости:

$$E_{\eta} = \frac{\overline{\Delta\eta}}{\overline{\eta}} = 2 \frac{\overline{\Delta d}}{d} + \frac{\overline{\Delta\rho_{ш}} + \overline{\Delta\rho_{ж}}}{\overline{\rho_{ш}} - \overline{\rho_{ж}}} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\overline{\Delta t}}{t}. \quad (9)$$

Абсолютная погрешность измерения коэффициента вязкости:

$$\overline{\Delta\eta} = E_{\eta} \cdot \overline{\eta}. \quad (10)$$

Окончательный результат

$$\eta = \overline{\eta} \pm \overline{\Delta\eta}. \quad (11)$$

Результат сравнивают с табличным значением.

Контрольные вопросы

1. Что называется вязкостью?
2. Как возникает сила внутреннего трения в жидкости?
3. Дайте определение коэффициенту вязкости, в каких единицах он измеряется.
4. В чём сущность метода Стокса?
5. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?
6. Как изменяется с температурой коэффициент вязкости?
7. Как определяется плотность шариков и плотность жидкости?
8. Вывести расчётную формулу для вычисления вязкости.