

Лабораторная работа №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
(ВЯЗКОСТИ) ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

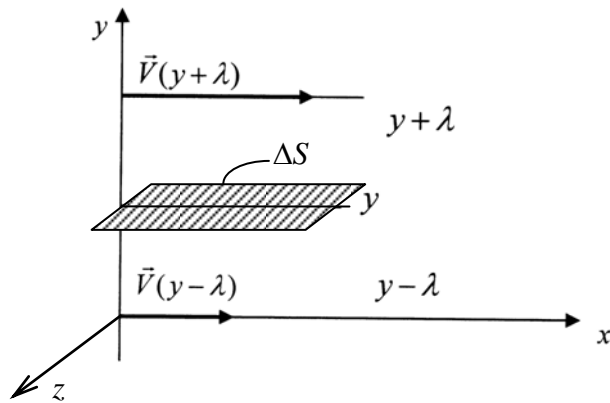
Цель работы: определение коэффициента внутреннего η трения жидкостей и сравнение найденных его экспериментальных значений с табличными значениями.

1. Вывод формулы для коэффициента вязкости

Возникновение внутреннего трения в газах и жидкостях связано с переносом импульса в направлении, перпендикулярном скорости жидкости. Если скорость направленного движения $\vec{V}(y) = (V(y), 0, 0)$ в потоке жидкости изменяется от слоя к слою (см. рисунок), то на границе между слоями возникает сила, связанная с тем, что молекулы, переходящие из быстрого слоя в медленный, ускоряют медленный слой, а молекулы, переходящие из медленного слоя в быстрый, тормозят быстрый слой. Для случая плоского течения жидкости (газа) силу трения между слоями можно оценить, используя приведенный ниже рисунок, следующим образом [1-3].

Пусть в направлении оси x течет жидкость, причем существует градиент скоростей направленного движения жидкости $d\vec{V}/dy \neq 0$ вдоль оси y . Такой градиент скоростей можно осуществить в аквариуме в слоях жидкости между дном и поверхностью, двигая с постоянной скоростью параллельно оси x доску, лежащую на поверхности жидкости. Верхние слои жидкости, прилегающие к доске, вследствие трения между жидкостью и доской, будут двигаться с максимальной скоростью, нижние слои жидкости из-за внутреннего трения в жидкости также придут в движение, скорость

направленного движения жидкости с приближением ко дну аквариума будет



уменьшаться.

Для силы трения, приходящейся на единицу площади площадки ΔS , расположенной параллельно оси x (касательного “натяжения” σ_x внутри жидкости в направлении оси x

), исходя из второго закона Ньютона, можно записать следующее выражение:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\Delta F_x}{\Delta S} = \frac{(1/6)(m \cdot n \bar{V}_{\text{тепл}})(V(y - \lambda) - V(y + \lambda)) \cdot \Delta S}{\Delta S} \cong \\ &\cong -\frac{1}{3} mn \bar{V}_{\text{тепл}} \lambda \frac{dV}{dy} = -\eta \frac{dV}{dy}, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $\eta = \frac{1}{3} nm \bar{V}_{\text{тепл}} \lambda$ – коэффициент внутреннего трения жидкости, выражающийся через массу молекулы m , концентрацию n , среднюю скорость теплового движения $\bar{V}_{\text{тепл}}$ и длину свободного пробега λ молекул. При получении формулы (1) учтено, что число молекул жидкости, пересекающих единичную площадку, расположенную посередине между слоями жидкости с координатами $y - \lambda$ и $y + \lambda$ за секунду в положительном и отрицательном направлениях оси y , из-за теплового их движения, равно $(1/6)n\bar{V}_{\text{тепл}}$. Молекулы, переходящие через слой с координатой y из слоев с координатами $y \pm \lambda$, переносят импульс $\mp mV(y \pm \lambda)$ направленного движения, это и приводит к возникновению внутреннего трения между слоями жидкости, характеризуемому выражением (1).

Стокс установил, что сила трения, действующая на медленно движущийся в жидкости шар, равна

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta rV, \quad (2)$$

где V – скорость и r – радиус шара. Условием «медленности» является малость безразмерного числа Рейнольдса

$$Re = 2\rho_0 Vr/\eta \ll 1 \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность жидкости. Для практического использования формулы Стокса отметим, что при значениях числа Рейнольдса $Re \cong 0.01$ экспериментально измеренная сила сопротивления и сила, вычисленная по формуле (2), отличаются не более чем на 1%, в случаях же $Re \cong 1$ экспериментальные значения силы трения больше расчетных примерно на 20%.

При движении шара в жидкости, кроме силы трения (2), на него действуют сила Архимеда

$$F_A = (4/3)\pi r^3 \rho_0 g \quad (4)$$

и сила тяжести

$$F_T = (4/3)\pi r^3 \rho g, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала шара; g – ускорение свободного падения. Скорость свободно падающего в жидкости шара возрастает до момента, когда сила тяжести уравнивается силой Архимеда и силой сопротивления. Затем шар движется равномерно. Условие равномерного движения шара имеет вид

$$(4/3)\pi r^3(\rho - \rho_0)g - 6\pi\eta rV = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что при равномерном падении шара в жидкости время t движения шара связано с высотой его падения h формулой $h = Vt$, из (6) получаем формулу для расчета коэффициента вязкости

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)gt}{9h}. \quad (7)$$

2. Задания

1. Бросая стальные шарики известного диаметра в первую жидкость (глицерин), измерьте время их падения на участке равномерного движения.
2. Вычислите η для глицерина по формуле (7) и оцените среднеквадратичную погрешность σ_η по формуле для прямых измерений. (Опыт проделайте не менее чем с 4-5 шарами).
3. Повторите измерения и расчеты для второй жидкости.
4. Используя полученные значения η , оцените величину числа Рейнольдса по формуле (3) для каждой жидкости и использованных в эксперименте шаров.

3. Контрольные вопросы

1. Какая величина измеряется в работе? Дайте ее определение.
2. Поясните смысл коэффициента внутреннего трения η . Какова его размерность?
3. Объясните природу сил внутреннего трения и выведите формулу (1).
4. При каких условиях шар движется равномерно?
5. Используя табличные значения η , оцените, какой путь должен пройти шар, прежде чем его скорость станет постоянной.
6. Согласуются ли найденные значения η с табличными?
7. Выполняется ли условие (3) в Вашей работе?

Рекомендуемая литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики. – Т. 1. – М.: Наука, любое издание.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Высшая школа, любое издание
3. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1981. - § 13, стр. 50-52.