

## Лабораторная работа № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

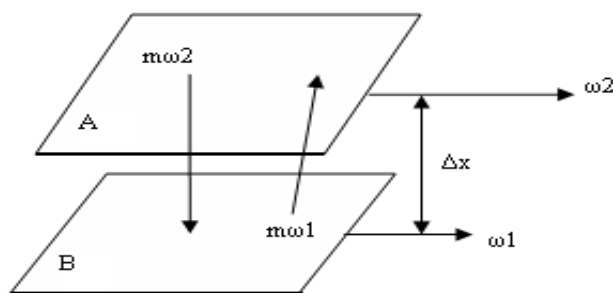
**Цель работы:** ознакомиться с одним из методов измерения коэффициента вязкости; определить коэффициент вязкости жидкости.

#### Приборы и принадлежности.

1. Вискозиметр Стокса.
2. Набор металлических шариков.
3. Секундомер.
4. Штангенциркуль.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Различные слои жидкости при ее движении имеют различную скорость. Между этими слоями действуют силы внутреннего трения. Происхождение сил внутреннего трения можно понять из следующих рассуждений. Предположим, что два слоя жидкости или газа движутся с разными скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (рисунок 9.1).



*Рисунок 8.1 – Механизм возникновения сил внутреннего трения*

Каждая молекула участвует в двух движениях: хаотическом

тепловом и упорядоченном со скоростью  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Благодаря тепловому движению молекулы переходят из слоя  $B$  в слой  $A$  и наоборот. При этом молекулы из слоя  $B$  переносят в слой  $A$  импульсы  $m\omega_2$  своего упорядоченного движения. Если  $\omega_1 > \omega_2$ , то такие молекулы при столкновении с молекулами слоя ускоряют свое упорядоченное движение, а молекулы слоя  $A$  – замедляют. Наоборот, при переходе молекул из более быстро движущегося слоя  $A$  в слой  $B$  они переносят большие импульсы  $m\omega_1$  и соударения с молекулами слоя  $B$  приводят к ускорению упорядоченного движения молекул этого слоя.

Таким образом, со стороны слоя, движущегося более быстро на слой, движущиеся медленнее, действует ускоряющая сила. Наоборот, со стороны слоя, движущегося медленнее, на более быстрый слой действует тормозящая сила. Эти силы носят название сил внутреннего трения, направлены по касательной к поверхности слоев. Опыт показывает, что сила внутреннего трения  $F$  пропорциональна величине площади соприкосновения движущихся слоев  $S$  и градиенту скорости  $\frac{\Delta\omega}{\Delta x}$ .

Для сил внутреннего трения справедливо уравнение Ньютона

$$F = \eta S \frac{\Delta\omega}{\Delta x}. \quad (9.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\eta$ , который называется коэффициентом внутреннего трения или динамической вязкостью.

Пусть два слоя  $A$  и  $B$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $\Delta x$ , текут соответственно со скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , тогда  $\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$ .

Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями  $\Delta x$ , перпендикулярно к скорости течения слоев.

Величина  $\frac{\Delta\omega}{\Delta x}$  показывает изменение скорости на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости слоя, называется градиентом скорости.

Из уравнения (9.1) коэффициент вязкости определяется

$$\eta = \frac{F}{S \frac{\Delta \omega}{\Delta x}}. \quad (9.2)$$

*Коэффициент вязкости* – физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости равном единице.

Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости и от температуры.

## 2 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Коэффициент вязкости может быть определен методом падающего шарика в вязкой среде (метод Стокса).

Вискозиметр Стокса (рисунок 9.2) состоит из стеклянной высокой кюветы (1), заполненной вязкой жидкостью (глицерин, трансформаторное масло). На кювете имеются две метки (2). Одна расположена на несколько сантиметров ниже уровня жидкости, а другая – на несколько сантиметров выше дна. Металлический шарик опускают в жидкость и по быстроте его движения (падения) судят о вязкости жидкости.

При попадании твердого тела в жидкость молекулы жидкости мгновенно прилипают к поверхности, образуя мономолекулярный слой. В случае движения твердого тела в жидкости, молекулы этого слоя движутся вместе с телом с той же скоростью. При этом молекулы слоя будут увлекать соседние слои жидкости, так что между слоями возникнут силы вязкости, тормозящие движение тела. Опыты показывают, что силы сопротивления, действующие на тело, движущееся в жидкости, зависят от скорости движения тела, от геометрической формы и линейных размеров тела, состояния его поверхности и вязкости среды. Теоретические расчеты, выполненные Стоксом для тела сферической формы (шарика), дали следующие выражение для силы сопротивления  $F_c$ :

$$F_c = 6\pi\eta R v, \quad (9.3)$$

где  $R$  – радиус шарика;  $v$  – скорость его движения;  $\eta$  – коэффи-

ЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ.

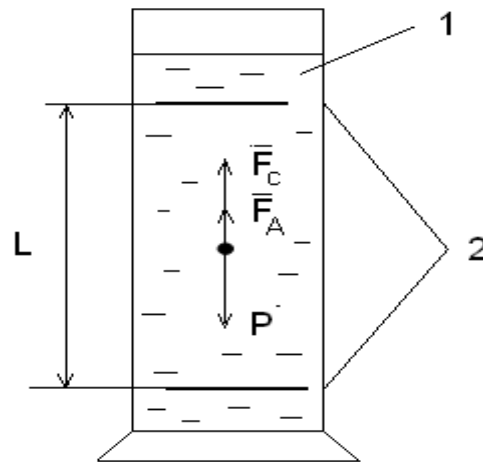


Рисунок 8.2 – Свободное падение шарика в вязкой среде

На шарик, падающий в жидкости, кроме силы сопротивления  $F_c$  действуют еще (рисунок 9.2) сила тяжести  $P$  и выталкивающая сила Архимеда  $F_A$  равные:

$$P = m_M \cdot g = \rho_M \cdot V_{ш} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_M \cdot g \quad (9.4)$$

$$F_A = m_{ж} \cdot g = \rho_{ж} \cdot V_{ш} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g, \quad (9.5)$$

где  $\rho_M$  и  $\rho_{ж}$  – соответственно плотности металла, из которого сделаны шарик и жидкость.

Силы  $P$  и  $F_A$  постоянные, а  $F_c$  зависит от скорости движения шарика. В начале падения скорость шарика мала и  $P - F_A > F_c$ , поэтому его движение будет ускоренным. По мере падения скорость шарика, а значит и  $F_c$ , будут возрастать и в некоторый момент

$$P - F_A > F_c, \quad (9.6)$$

после чего шарик начнет двигаться с постоянной скоростью  $v_0$ .

Подставив (9.3), (9.4) и (9.5) в (9.6), получим:

$$6\pi\eta r v_0 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_M g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g ,$$

откуда

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_M - \rho_{ж})}{v_0} g .$$

При равномерном движении  $v_0 = L/t$  ,

где  $L$  – расстояние между метками;  $t$  – время его прохождения шариком.

Тогда

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_M - \rho_{ж})}{L} \cdot g \cdot t . \quad (9.7)$$

Эта формула справедлива для шарика, падающего в безгранично простирающейся жидкости. Однако осуществить это практически невозможно, так как жидкость всегда в сосуде, который имеет стенки. Поэтому в формулу (9.7) вводится поправочный множитель  $1/(1 + 2,4 \frac{r}{R})$  , где  $R$  – радиус сосуда.

Окончательная формула для  $\eta$  имеет вид:

$$\eta = \frac{2}{9} (\rho_M - \rho_{ж}) \frac{g \cdot r^2 \cdot t}{L(1 + 2,4 \frac{r}{R})} . \quad (9.8)$$

### 3 РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Измерить микрометром диаметры шариков  $d$ .
2. Результаты измерений  $r$  ( $r = d/2$ ) занести в таблицу 9.1.
3. Осторожно опустить шарик в жидкость. Одновременно с опусканием фиксируют глазом верхнюю метку.
4. При прохождении шарика через верхнюю метку включить секундомер. Измерить время движения  $t$  шарика до нижней мет-

ки.

5. Опыт повторить 3–5 раз.
6. Линейкой измерить расстояние между метками  $L$ .
7. Измерить штангенциркулем радиус  $R$  кюветы.
8. По расчетной формуле произвести расчет  $\eta_i$  и заполнить таблицу 9.1.
9. Окончательный результат представить в виде:

$$\eta = (\langle \eta \rangle \pm \langle \Delta \eta \rangle) \frac{H \cdot c}{m^2}, \quad \varepsilon_\eta = \dots\%$$

Таблица 8.1 – Результаты измерений

№	$r$	$R$	$\rho_m$	$\rho_{жс}$	$L$	$t$	$v$	$\eta_i$	$\langle \eta \rangle$	$\Delta \eta_i$	$\langle \Delta \eta \rangle$	$\varepsilon_\eta$
1	0,0021	0,1	7880	1030	0,3	0,6						
2	0,0022	0,1	7880	1030	0,3	0,5						
3	0,0021	0,1	7880	1030	0,3	0,7						

### Контрольные вопросы

1. Какова природа сил вязкости в жидкостях?
2. Какова природа сил внутреннего трения в газах?
3. Что называется коэффициентом внутреннего трения?
4. Дайте определение закона Стокса.
5. Дайте определение закона Архимеда.
6. Приведите вывод расчетной формулы.