

5. В чём заключается метод определения коэффициента теплопроводности в данной работе?

6. Вывести расчётную формулу (11) для определения коэффициента теплопроводности.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

### Определение коэффициента внутреннего трения жидкости

*Цель работы* – определить коэффициент внутреннего трения жидкости.

*Приборы и принадлежности:* стеклянный цилиндр с жидкостью, микроскоп, электронный секундомер, металлическая дробь, масштабная линейка.

### Теоретические сведения

При течении слоёв жидкости с различными скоростями (рис. 1) между ними возникает сила внутреннего трения, которую можно вычислить по закону Ньютона:

$$F = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \cdot \Delta S, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta v}{\Delta y}$  – градиент скорости;  $\Delta S$  – площадь соприкасающихся слоёв;

$\eta$  – коэффициент внутреннего трения или коэффициент динамической вязкости.

Из формулы (1)

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta y} \cdot \Delta S}.$$

Коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, возникающей на каждой единице поверхности соприкосновения двух слоёв, движущихся один относительно другого с градиентом скорости, равным единице.

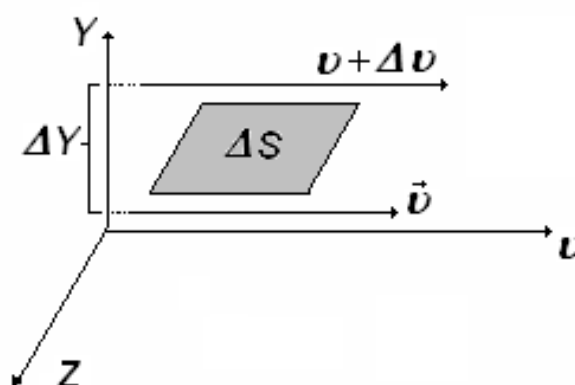


Рис. 1. Движение слоёв жидкости с различными скоростями

В системе СИ коэффициент динамической вязкости измеряется в Па·с. Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости и температуры. С увеличением температуры коэффициент динамической вязкости уменьшается.

В гидравлике и аэродинамике пользуются понятием кинематической вязкости:

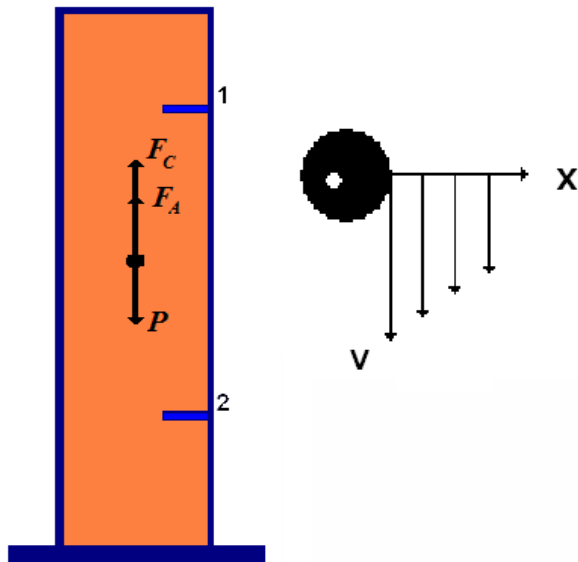
$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

В системе СИ единица кинематической вязкости имеет размерность:  $[\nu] = \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Определение коэффициента динамической вязкости может быть выполнено различными методами.

### ***Описание установки. Вывод расчётной формулы***

Рассмотрим метод Стокса. При движении шарика в вязкой среде слой жидкости, непосредственно прилегающий к шарiku, прилипает к его поверхности и увлекается им полностью. Остальные слои двигаются со всё уменьшающейся скоростью



(рис. 2). Если шарик падает равномерно в жидкости, не оставляя за собой завихрений (малая скорость, малые размеры шарика), то сила сопротивления, обусловленная внутренним трением жидкости и действующая на шарик, определяется по закону Стокса:

$$F_c = 6\pi\eta\nu r = 3\pi\eta D,$$

Рис. 2. Силы, действующие на шарик. Изменение скорости слоёв жидкости при движении шарика

где  $\nu$  – скорость падения шарика;  $r$  – его радиус;  $D$  – диаметр шарика;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

Кроме силы сопротивления на шарик действует сила тяжести

$$P = m_1 g,$$

где  $m_1 = \rho_1 \cdot V$ ;  $\rho_1$  – плотность шарика;  $V$  – объём шарика и архимедова сила  $F_a$ , численно равная весу вытесненной жидкости в объёме погруженного в неё тела:

$$F_a = m_2 g,$$

где  $m_2 = \rho_2 V$ ;  $\rho_2$  – плотность жидкости.

$$F_a = \frac{1}{6} \pi \cdot D^3 \rho_2 g.$$

Все три силы направлены по вертикали: сила тяжести  $P$  – вниз, архимедова сила  $F_a$  и сила сопротивления  $F_c$  – вверх.

В начале падения шарика  $P > F_a + F_c$  и его движение ускоренное. С увеличением скорости растёт сила сопротивления, и спустя некоторое время сила тяжести уравнивается архимедовой силой и силой сопротивления:

$$P = F_a + F_c. \quad (2)$$

В результате движение становится равномерным с постоянной скоростью  $v$ . Такое движение шарика называется установившимся.

Выражение (2) можно записать в виде

$$\frac{1}{6} \pi D^3 \rho_1 g = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_2 g + 3 \pi \eta v D,$$

откуда коэффициент трения равен

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho_2) D^2 g}{v}. \quad (3)$$

В лабораторной работе падение металлических шариков наблюдают в стеклянном цилиндре, наполненном исследуемой жидкостью (касторовым маслом). На цилиндре нанесены две горизонтальные метки 1 и 2 (см. рис. 2), расположенные друг от друга на расстоянии  $l$ .

### Справочные данные

|                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Плотность шарика (дробинки)        | $\rho_1 = 7200 \text{ кг/м}^3$ |
| Плотность касторового масла        | $\rho_2 = 960 \text{ кг/м}^3$  |
| Цена деления окулярного микрометра | $k = 100 \text{ мкм/дел}$      |

Таблица 1

#### Коэффициенты внутреннего трения касторового масла при различных температурах

| Жидкость         | $t, ^\circ\text{C}$ | $\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$ |
|------------------|---------------------|--------------------------------|
| Масло касторовое | 10                  | 2,44                           |
|                  | 20                  | 0,987                          |
|                  | 30                  | 0,455                          |
|                  | 50                  | 0,129                          |

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью микроскопа измерить диаметр шарика.
2. Опустить шарик в жидкость. В момент прохождения шариком верхней метки 1 включить электронный секундомер и выключить его при прохождении шариком метки 2. Определить время  $\tau$  прохождения шариком расстояния между метками.
3. С помощью линейки определить расстояния между метками  $l$ .
4. По термометру определить комнатную температуру  $t$ .
5. Полученные данные занести в табл. 2.
6. Повторить опыт (п. 1 и 2) ещё для двух шариков разных диаметров. Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

| $D, 10^{-3} \text{ м}$ | $\tau, \text{с}$ | $l, \text{м}$ | $\rho_1, \text{кг/м}^3$ | $\rho_2, \text{кг/м}^3$ | $v, \text{м/с}$ | $\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $\Delta\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $\varepsilon_\eta, \%$ | $t, ^\circ\text{C}$ |
|------------------------|------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------|
|                        |                  |               |                         |                         |                 |                                |                                      |                        |                     |
|                        |                  |               |                         |                         |                 |                                |                                      |                        |                     |
|                        |                  |               |                         |                         |                 |                                |                                      |                        |                     |

7. Вычислить скорость падения шарика по формуле  $v = \frac{l}{\tau}$ .

8. Рассчитать коэффициент внутреннего трения по формуле (3) для каждого шарика.

9. Вычислить абсолютную  $\Delta\eta$  и относительную  $\varepsilon_\eta$  погрешности коэффициента внутреннего трения по правилам расчёта погрешностей при невоспроизводимых контролируемых условиях согласно **примеру 4** (с. 17) и записать конечный результат в стандартной форме

$$\eta = (<\eta> \pm \Delta\eta) \text{ Па}\cdot\text{с}$$

$$\varepsilon_\eta = \dots \%$$

$$\alpha = \dots$$

**Примечание.** Для нахождения относительной приборной погрешности можно воспользоваться приближённой формулой

$$\varepsilon_{\eta_{np}} \approx \frac{2\Delta D_{np}}{<D>}.$$

10. Результаты расчётов занести в табл. 2.

11. Сравнить полученное при данной температуре среднее значение коэффициента внутреннего трения  $<\eta>$  касторового масла (с учётом абсолютной погрешности  $\Delta\eta$ ) со справочными данными (см. табл. 1) и сделать соответствующий вывод.

### Контрольные вопросы и задания

1. В чём суть явления внутреннего трения? Уравнение для этого явления. Физический смысл коэффициента динамической вязкости.

2. Как определяется коэффициент динамической вязкости по методу Стокса?

3. Вывести расчётную формулу (3) для определения коэффициента внутреннего трения.

### Библиографический список

1. *Яворский, Б. М.* Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

2. *Общая физика: руководство по лабораторному практикуму : учеб. пособие / под ред. И. Б. Крынецкого и Б. А. Струкова.* – М. : ИНФРА-М, 2008. – 599 с.

3. *Трофимова, Т. И.* Курс физики : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – М. : Академия, 2014. – 560 с.

4. *Детлаф, А. А.* Курс физики : учеб. пособие для студентов втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Академия, 2014. – 720 с.