

## Лабораторная работа 2.2.5

### «Определение вязкости жидкости по скорости истечения через капилляр»

Осташкин Максим  
Б01-407

27 февраля 2025 г.

## 1 Измерение вязкости воды

### 1.1 Теоретическое введение

Формула Пуазейля для расхода жидкости через сечение трубки:

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4 \quad (1)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vR\rho}{\eta} = \frac{2\rho v^2}{\eta \frac{v}{R}}$$

Согласно уравнению Бернулли,

$$\frac{\rho v^2}{2} = P_0 - P \quad (2)$$

В гладких трубах круглого сечения переход от ламинарного движения к турбулентному происходит при  $Re \approx 1000$ .

Ламинарное движение жидкости при переходе ее из широкого сосуда в капилляр устанавливается не сразу, а после того, как она пройдет расстояние  $a$

$$a = 0,2R * Re \quad (3)$$

### 1.2 Экспериментальная установка

Установка для измерения вязкости воды изображена на рис. 1. Вода заполняет сосуд Мариотта и вытекает через калиброванную капиллярную трубку, укрепленную в нижней части его боковой стенки. Сосуд Мариотта позволяет поддерживать постоянным перепад давления  $P_1 - P_2$  на концах капилляра, несмотря на то, что уровень жидкости при ее вытекании понижается. Это достигается с помощью трубки В, открытой в атмосферу и проходящей через пробку, герметично закрывающую сосуд.

Величина перепада давления  $P_1 - P_2$  определяется высотой столба воды  $h$  между осью капиллярной трубки А и нижним концом вертикальной трубки В. Высота столба измеряется с помощью микроскопа М, укрепленного на вертикально перемещающемся плунжере. Смещение плунжера определяется по миллиметровой шкале, снабженной нониусом. Объем вытекшей жидкости измеряется мензуркой П. Время истечения определяется по секундомеру. Длина капиллярной трубки измеряется миллиметровой линейкой, диаметр — микроскопом.

### 1.3 Ход работы

1. С помощью микроскопа определим радиус трубки:  $R = 0,4$  мм.

Длина капилляра указана на установке:  $l = 13,5$  см

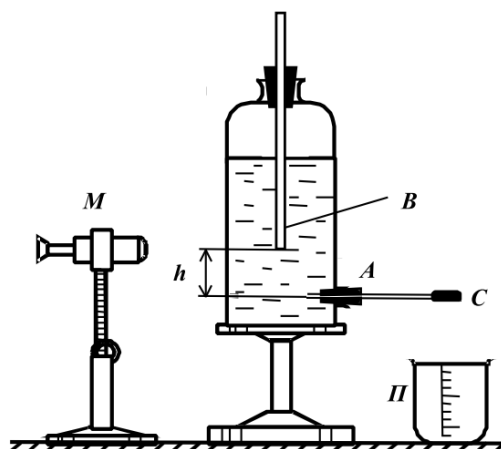


Рис. 1: Схема установки для определения вязкости воды

- Убедимся, что расход воды при одинаковой величине  $h$  не зависит от уровня жидкости. При  $h = 39$  см объём  $20 \text{ см}^3$  вытек из сосуда сначала за 410 с, затем за 412 с. Условие выполняется.
- Перепад давлений  $\Delta P = P_1 - P_2$  между концами капилляра, выраженный в миллиметрах водяного столба, не равен  $\rho gh$ , а содержит поправку  $\Delta h$ , обусловленную силами поверхностного натяжения. Чтобы её определить, будем опускать трубку В до тех пор, пока вода не перестанет вытекать из капилляра, что свидетельствует о уравнивании давления столба воды  $\Delta h$  между осью капилляра и нижним торцом трубки В силами поверхностного натяжения пузырька воздуха, возникшего на конце трубки В, и капли жидкости на конце трубки С.

$$\Delta h = 7 \text{ мм} \quad (4)$$

- Измерим расход воды при нескольких значениях  $h$ . Результаты занесём в таблицу 1. По формуле для числа Рейнольдса  $Re = \frac{vR}{\eta} = \frac{QR\rho}{S\eta} = \frac{V\rho}{\pi R\eta t}$  удостоверимся, что в каждом из опытов в капилляре устанавливается ламинарное течение. По формуле  $a = 0,2R * Re$  оценим длину участка капилляра, по прохождении которого устанавливается ламинарное течение. Результаты также занесём в таблицу 1.

Таблица 1: Зависимость расхода воды от перепада давлений в сосуде Мариотта

h, мм	t, с	Q, см <sup>3</sup> /с	Re	a, мм
47,3	510	0,0392	31,207	2,497
59,2	430	0,0465	37,013	2,961
62,1	420	0,0476	37,894	3,032
82	300	0,0667	53,052	4,244

- Представим полученные результаты на графике  $Q(h)$  - рис. 2. По расчётам, представленным в п. 3.4, ламинарное течение устанавливается практически сразу же во всех опытах, поэтому наблюдаем чёткую линейную зависимость. Формула Пуазейля для расхода:

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4 = \pi \frac{(h - \Delta h)\rho g}{8\eta l} R^4; \quad (5)$$

На графике  $\Delta h$  отсекается аппроксимирующей прямой при  $Q = 0$  и  $\Delta h = 7$  мм. Определённое экспериментально значение  $\Delta h = 7$  мм примерно ему равно.

По углу наклона прямой определим величину  $\eta$

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho g}{8lQ'(h)} = 0.00846\Pi, \quad (6)$$

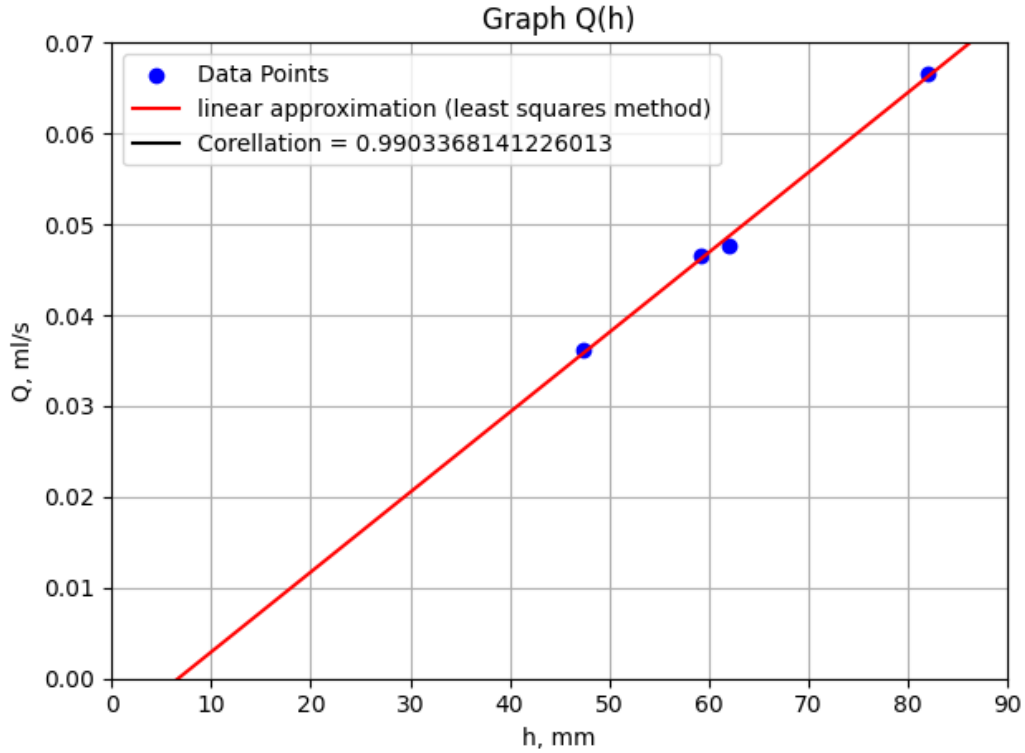


Рис. 2: График зависимости расхода воды от высоты столба воды в сосуде

где  $Q'(h) = 0,00879 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Оценим погрешность определения вязкости по формуле

$$\sigma\eta = \eta \sqrt{\left(\frac{\sigma h}{h}\right)^2 + 4^2 \left(\frac{\sigma R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma l}{l}\right)^2} = 0,000364 \Pi \quad (7)$$

Для воды температуры  $25^\circ\text{C}$  значение вязкости  $\eta = 0,00891 \Pi$ .

С учётом погрешности величина, определённая экспериментально, и табличная величина равны.

$\eta_{th} = 0,00891 \Pi$	$\eta_{ex} = 0,0085 \pm 0,0003 \Pi$
---------------------------	-------------------------------------

## 2 Измерение вязкости водного раствора глицерина вискозиметром Оствальда

### 2.1 Теоретическое введение

В этой части работы измеряется скорость вытекания жидкости из объема  $\Pi_1$ . так как такое движение жидкости не описывается формулой (1) полностью (разность давлений определяется уровнем жидкости, который непрерывно меняется), применяя ее к небольшим отрезкам времени, необходимо заменить  $Q_v$  на  $-dV/dt$  и  $P_1 - P_2$  на  $\rho h(v)g$ , получим

$$-\frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4}{8l} \frac{h(V)\rho g}{\eta} \text{ или } -\frac{8l}{\pi R^4} \frac{dV}{h(V)} = \frac{\rho g}{\eta} dt \quad (8)$$

Интегрируя от  $V = V_0$  до  $V = V_1$  и от  $t = 0$  до  $t = t_1$  получим, что

$$\frac{\rho_1}{\eta_1} t_1 = \frac{\rho_2}{\eta_2} t_2 = \frac{\rho_3}{\eta_3} t_3 = \dots \quad (9)$$

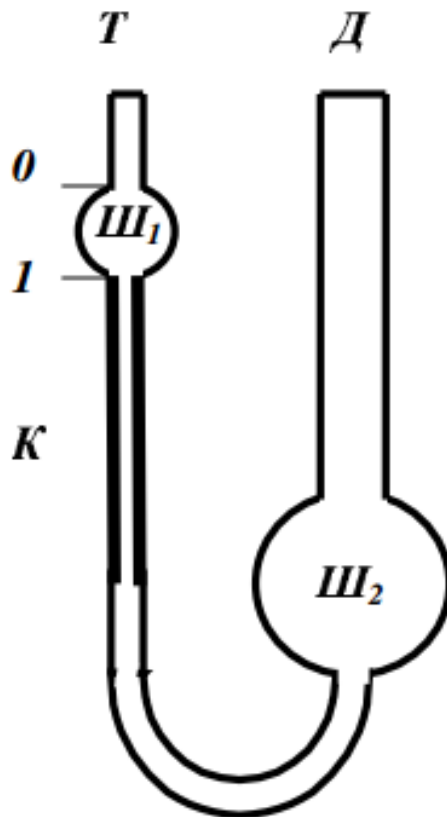


Рис. 3: Вискозиметр Оствальда

Проведя опыты с водой, а затем с исследуемой жидкостью, получим

$$\eta_x = \eta_0 \frac{\rho_x t_x}{\rho_0 t_0} \quad (10)$$

## 2.2 Экспериментальная установка

Вискозиметр Оствальда представляет собой стеклянную трубку с расширением наверху. С помощью резиновой груши, подсоединенной резиновой трубкой к отверстию 1, засасывают воду так, чтобы ее мениск поднялся несколько выше метки М1. Сняв грушу с трубки и удерживая вискозиметр в вертикальном положении, дают возможность воде свободно протекать через шарик 4. Когда мениск проходит метку М1, включают секундомер, и выключают его, когда мениск проходит метку М2. Таким образом измеряют время  $t_0$ , за которое объем воды  $V$ , заключенный между метками, протекает через капилляр. В вискозиметре Оствальда диаметр капилляра и перепад давления на нем подобраны так, что течение жидкости в капилляре всегда является ламинарным.

## 2.3 Ход работы

1. Определим время перетекания воды между метками. Измерения проводим 10 раз, затем усредняем значения. Те же измерения проводим с 10-, 20-, 30-% растворами глицерина. Результаты измерений занесём в таблицу 2.
2. По формуле из 4.1 определим вязкости растворов глицерина различной концентрации.

$$\eta_x = \eta_0 \frac{\rho_x t_x}{\rho_0 t_0} \quad (11)$$

Таблица 2: Время протекания жидкостей между метками

Вода, t, с	Глицерин 10%, t, с	Глицерин 20%, t, с	Глицерин 30%, t, с
$\rho = 997,13 \text{ кг/м}^3$	$\rho = 1019,2 \text{ кг/м}^3$	$\rho = 1041,5 \text{ кг/м}^3$	$\rho = 1064,6 \text{ кг/м}^3$
8,94	12,19	15,69	21,75
9,34	12,34	15,31	21,62
9,28	12,31	15,44	21,35
9,41	12,27	15,31	21,47
$\bar{t} = 9,243 \text{ с}$	$\bar{t} = 12,278 \text{ с}$	$\bar{t} = 15,438 \text{ с}$	$\bar{t} = 21,548 \text{ с}$
$\sigma_t = 0,1 \text{ с}$	$\sigma_t = 0,03 \text{ с}$	$\sigma_t = 0,09 \text{ с}$	$\sigma_t = 0,09 \text{ с}$

Погрешность измерений оценим по формуле

$$\sigma\eta_x = \eta_x \sqrt{\left(\frac{\sigma\eta_0}{\eta_0}\right)^2 + 4^2 \left(\frac{\sigma t_x}{t_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t_0}{t_0}\right)^2} \quad (12)$$

$$\eta_{10} = 11,5 \pm 0,5 \text{ мП}$$

$$\eta_{20} = 14,7 \pm 0,7 \text{ мП}$$

$$\eta_{30} = 21,0 \pm 0,9 \text{ мП}$$

Сравним полученные нами результаты с табличными значениями (лабораторный практикум под редакцией проф. А.Д.Гладуна, 2012г, с.275)

Вязкость водного раствора глицерина										
(указан весовой процент глицерина)										
t	10%	25%	50%	80%	95%	96%	97%	98%	99%	100%
20	1,31	2,09	6,03	61,8	544	659	802	971	1194	1495
25	1,15	1,81	5,02	45,7	365	434	522	627	772	942
30	1,02	1,59	4,23	34,8	248	296	353	423	510	662

Рис. 4: Табличные значения вязкости глицерина разной концентрации (в  $10^{-3}\text{Нс/м}^2$  или 10П)

В пределах погрешности результаты для 10-%, 20-% и 30% растворов сходятся.

### 3 Вывод

В ходе работы были определены вязкости различных жидкостей. Вязкость воды измерялась независимо от других жидкостей – абсолютным методом, через скорость ее истечения через капилляр. Вязкости растворов глицерина определялись в сравнении с вязкостью воды. В ходе работы были получены значения, близкие к табличным при комнатной температуре, при этом относительная погрешность измерения вязкости составила менее 5% для каждой жидкости, что говорит о неплохой точности ее измерения приведенными способами.