

## Лабораторная работа №2.2.6

Определение энергии активации по температурной  
зависимости вязкости жидкости

Струков Олег Игоревич  
Б04-404

**Цель работы:** измерение скорости падения шариков при разной температуре жидкости; вычисление вязкости жидкости по закону Стокса и расчёт энергии активации.

**Оборудование:** стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин); термостат ( $\sigma_T = 0,1 \text{ К}$ ); телефон (для съёмки видео); микроскоп; мелкие стеклянные и стальные шарики диаметром 1-2 мм.

## Теоретическая часть

### Энергия активации

Для того чтобы перейти в новое состояние, молекула жидкости должна преодолеть участки с большой потенциальной энергией, превышающей среднюю тепловую энергию молекул. Для этого тепловая энергия молекул должна — вследствие флюктуации — увеличиться на некоторую величину  $W$ , называемую энергией активации. Температурная зависимость вязкости жидкости при достаточно грубых предположениях можно описать формулой

$$\eta = Ae^{W/kT} \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что существует линейная зависимость между величинами  $\ln \eta$  и  $1/T$ , и энергию активации можно найти по формуле

$$W = k \frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)} \quad (2)$$

### Измерение вязкости

По формуле Стокса, если шарик радиусом  $r$  и со скоростью  $v$  движется в среде с вязкостью  $\eta$ , и при этом не наблюдается турбулентных явлений, тормозящую силу можно найти по формуле (3)

$$F = 6\pi\eta \frac{d}{2}v \quad (3)$$

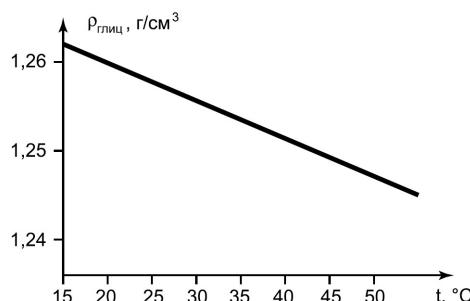
Для измерения вязкости жидкости рассмотрим свободное падение шарика в жидкости. При медленных скоростях на шарик действуют силы Архимеда и Стокса, выражения для которых мы знаем. Отсюда находим выражения для установившейся скорости шарика и вязкости жидкости

$$v_{\text{уст}} = \frac{2}{9}g \frac{d^2}{4} \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{2}{9}g \frac{d^2}{4} \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v_{\text{уст}}} \quad (5)$$

Как видим, измерив установившуюся скорость шарика и параметры системы можно получить вязкость по формуле (5).

Плотность глицерина в зависимости от температуры определяется из графика:



## Экспериментальная установка

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). Диаметр сосуда  $\approx 3$  см, длина  $\approx 25$  см. На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчетом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения этой метки успевала установиться. Измеряя расстояние между метками, в время падения определяют установившуюся скорость шарика  $v_{\text{уст}}$ . Сам сосуд В помещен в рубашку D, омываемую водой из термостата. При работающем термостате температура воды в рубашке D, а потому и температура жидкости 12 равна температуре воды в термостате. Схема прибора (в разрезе) показана на рис. 1.

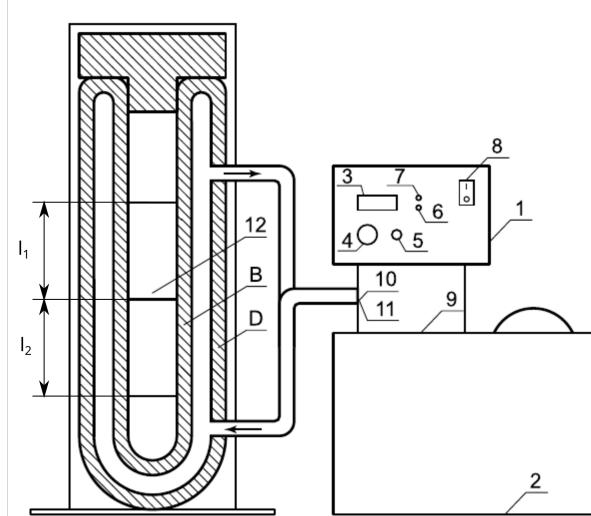


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости.

Число Рейнольдса можно найти следующим образом:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (6)$$

Для исследования применимости формулы Стокса можно вычислить путь S и время релаксации  $\tau$ , необходимые для достижения установившейся скорости.

$$\tau = \frac{V \rho}{6 \pi \eta r} = \frac{2 r^2 \rho}{9 \eta}, \quad S = v_{\text{уст}} \tau \left( \frac{\tau}{t} - 1 + e^{-t/\tau} \right) \quad (7)$$

Отсюда следует, что  $S \gg v_{\text{уст}} \tau$  при  $t \gg \tau$ .

## Ход работы

- Были выбраны по десять стеклянных и стальных шариков, измерены их средние диаметры. Приборная погрешность измерения равна удвоенной цене деления микроскопа:  $\sigma_d = 0,1$  мм. Результаты занесены в таблицу:

Номер	Диаметр стеклянного шарика, мм	Диаметр стального шарика, мм
1	2,10	0,80
2	2,20	0,85
3	2,00	0,85
4	2,15	0,90
5	2,00	0,90
6	2,10	0,80
7	2,10	0,70
8	2,20	0,65
9	2,10	0,75
10	2,15	0,85

2. Для вычисления вязкости глицерина  $\eta$  необходимо было измерить установившиеся скорости падения шариков в нём и его температуру. В таблицах приведены результаты измерений и вычислений, время указано для прохождения расстояния  $l = 0,206$  м. Плотность стекла  $\rho_{\text{стекло}} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>, стали  $\rho_{\text{сталь}} = 7800$  кг/м<sup>3</sup>

Данные для стеклянных шариков

Номер	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	d, мм	t, с	$v_{\text{уст}}, \text{м}/\text{с} \cdot 10^{-3}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
1	22,90	1258,0	2,10	60,72	$3,39 \pm 0,02$	$0,88 \pm 0,04$
2	22,90	1258,0	2,20	61,86	$3,33 \pm 0,02$	$0,98 \pm 0,04$
3	30,88	1254,5	2,00	36,79	$5,60 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,02$
4	30,88	1254,5	2,15	34,73	$5,93 \pm 0,03$	$0,52 \pm 0,02$
5	37,45	1252,5	2,00	25,34	$8,13 \pm 0,04$	$0,33 \pm 0,02$
6	37,45	1252,5	2,10	24,11	$8,54 \pm 0,04$	$0,35 \pm 0,02$
7	43,10	1250,5	2,20	15,99	$12,88 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,01$
8	43,10	1250,5	2,20	14,61	$14,10 \pm 0,07$	$0,23 \pm 0,01$
9	50,30	1247,0	2,10	8,94	$23,04 \pm 0,12$	$0,13 \pm 0,01$
10	50,30	1247,0	2,15	8,91	$23,12 \pm 0,12$	$0,14 \pm 0,01$

Данные для стальных шариков

Номер	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	d, мм	t, с	$v_{\text{уст}}, \text{м}/\text{с} \cdot 10^{-3}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
1	22,90	1258,0	0,80	69,24	$2,98 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,09$
2	22,90	1258,0	0,85	67,83	$3,04 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,10$
3	30,88	1254,5	0,85	38,90	$5,30 \pm 0,03$	$0,49 \pm 0,06$
4	30,88	1254,5	0,90	38,06	$5,41 \pm 0,03$	$0,53 \pm 0,06$
5	37,45	1252,5	0,90	25,88	$7,96 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,04$
6	37,45	1252,5	0,80	30,86	$6,68 \pm 0,03$	$0,34 \pm 0,04$
7	43,10	1250,5	0,70	29,94	$6,88 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,04$
8	43,10	1250,5	0,65	33,32	$6,18 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,04$
9	50,30	1247,0	0,75	14,63	$14,08 \pm 0,07$	$0,14 \pm 0,02$
10	50,30	1247,0	0,85	12,8	$16,09 \pm 0,08$	$0,16 \pm 0,02$

Погрешность измерения времени  $\sigma_t = 0,02$  с, погрешность пройденного расстояния  $\sigma_l = 0,001$  м, погрешности скорости  $\sigma_{v_{\text{уст}}}$  и вязкости  $\sigma_\eta$  были определены по следующим формулам:

$$\sigma_{v_{\text{уст}}} = v_{\text{уст}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2}, \quad \sigma_\eta = \eta \sqrt{4 \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v_{\text{уст}}}}{v_{\text{уст}}}\right)^2}$$

3. Для каждого из опытов было вычислено значение числа Рейнольдса  $Re$  по формуле (6), при этом диаметр сосуда составил  $D = (2,8 \pm 0,1)$  см, затем были определены время  $\tau$  и путь  $S$  релаксации по формулам (7). Результаты представлены в таблице:

Номер	Стекло			Сталь		
	Re	$\tau, \text{с} \cdot 10^{-3}$	$S, \text{м} \cdot 10^{-6}$	Re	$\tau, \text{с} \cdot 10^{-3}$	$S, \text{м} \cdot 10^{-6}$
1	$0,14 \pm 0,01$	$2,78 \pm 0,24$	$9,44 \pm 0,81$	$0,14 \pm 0,02$	$1,45 \pm 0,21$	$4,30 \pm 0,62$
2	$0,12 \pm 0,01$	$2,73 \pm 0,23$	$9,10 \pm 0,77$	$0,13 \pm 0,01$	$1,48 \pm 0,20$	$4,48 \pm 0,62$
3	$0,41 \pm 0,02$	$4,58 \pm 0,40$	$25,67 \pm 2,24$	$0,38 \pm 0,05$	$2,57 \pm 0,35$	$13,63 \pm 1,88$
4	$0,39 \pm 0,02$	$4,85 \pm 0,41$	$28,80 \pm 2,46$	$0,36 \pm 0,04$	$2,63 \pm 0,35$	$14,24 \pm 1,88$
5	$0,85 \pm 0,04$	$6,64 \pm 0,58$	$54,02 \pm 4,72$	$0,77 \pm 0,09$	$3,87 \pm 0,51$	$30,78 \pm 4,07$
6	$0,85 \pm 0,04$	$6,98 \pm 0,60$	$59,67 \pm 5,14$	$0,68 \pm 0,09$	$3,24 \pm 0,47$	$21,65 \pm 3,12$
7	$1,76 \pm 0,08$	$10,51 \pm 0,89$	$135,49 \pm 11,51$	$0,95 \pm 0,14$	$3,34 \pm 0,53$	$22,99 \pm 3,68$
8	$2,11 \pm 0,10$	$11,50 \pm 0,98$	$162,32 \pm 13,79$	$0,89 \pm 0,14$	$3,00 \pm 0,51$	$18,56 \pm 3,15$
9	$6,16 \pm 0,30$	$18,75 \pm 1,61$	$432,86 \pm 37,30$	$3,45 \pm 0,46$	$6,83 \pm 1,03$	$69,27 \pm 14,58$
10	$5,91 \pm 0,28$	$18,81 \pm 1,61$	$435,79 \pm 37,29$	$3,5 \pm 0,41$	$7,8 \pm 1,08$	$125,78 \pm 17,34$

Погрешности нахождения  $Re$ ,  $\tau$  и  $S$  были определены следующим образом:

$$\sigma_{Re} = Re \sqrt{\left(\frac{\sigma_{v_{\text{yct}}}}{v_{\text{yct}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2}, \quad \sigma_\tau = \tau \sqrt{4 \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2}, \quad \sigma_S = S \sqrt{\left(\frac{\sigma_{v_{\text{yct}}}}{v_{\text{yct}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2}$$

Поскольку полученные значения  $Re < 10$ , формула Стокса применима во всех рассматриваемых случаях.

4. Построены графики зависимости  $\ln \eta$  от  $1/T$ .

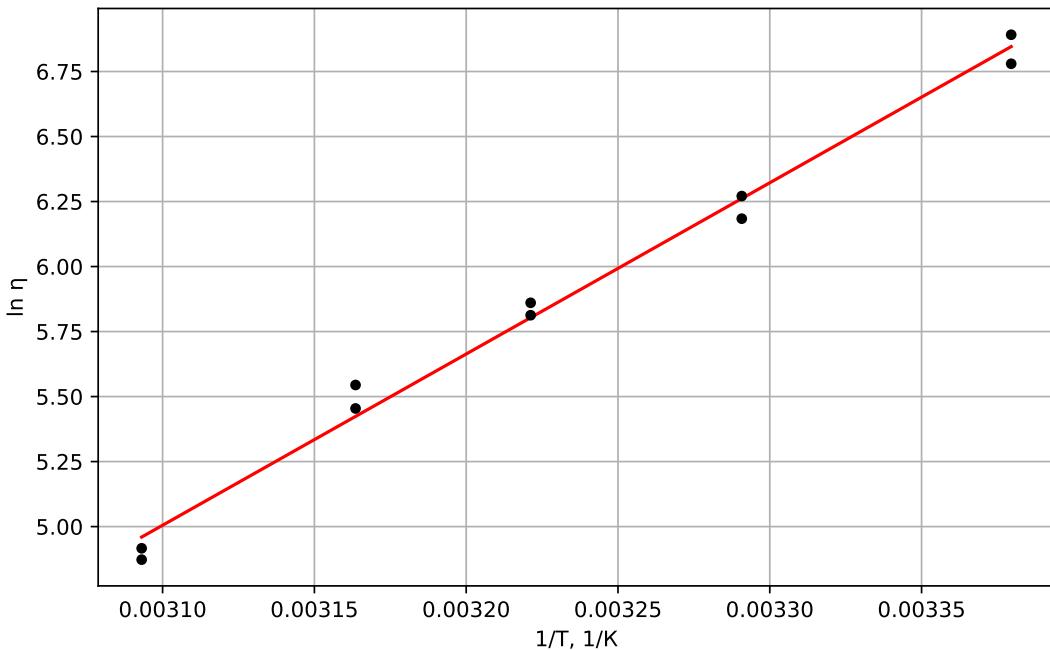


График зависимости  $\ln \eta$  от  $1/T$  для стеклянных шариков.

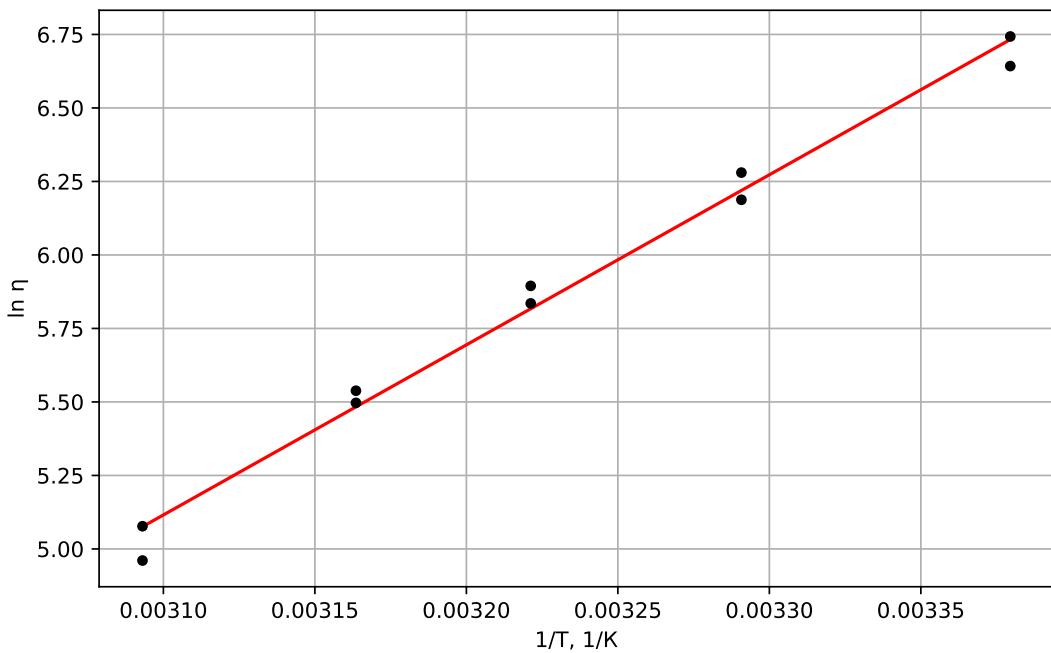


График зависимости  $\ln \eta$  от  $1/T$  для стальных шариков.

5. По угловым коэффициентам наклона прямых на графиках были найдены энергии активации в обоих случаях (формула 2):

$$k_{\text{стекло}} = 6585 \text{ K}, \quad \sigma_{k_{\text{стекло}}} = 207 \text{ K}, \quad k_{\text{сталь}} = 5785 \text{ K}, \quad \sigma_{k_{\text{сталь}}} = 172 \text{ K}$$

$$W_{\text{Стекло}} = (9,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-20} \text{ Дж}, \quad W_{\text{Сталь}} = (8,0 \pm 2) \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

## Вывод

В работе была исследована вязкость глицерина при разных температурах с помощью падающих в нём тел шарообразной формы, определены число Рейнольдса, время и путь релаксации для нескольких значений температуры, установлена применимость формулы Стокса в исследуемых условиях и в конечном итоге найдена его энергия активации, близкая к табличному значению  $W = 8,5 \cdot 10^{-20}$  Дж.