

# МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ №2.2.6

---

## Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости

---

*Автор:* Алексей Домрачев 615 группа

*Преподаватель:* Александр Дмитриевич Калашников



20 марта 2017 г.

## 1. Начальные сведения

### Цель работы

1. Измерение скорости падения шариков при разной температуре жидкости;
2. Вычисление вязкости жидкости по закону Стокса и расчет энергии активации.

### В работе используются

Стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин); термостат; секундомер; горизонтальный компаратор; микроскоп; мелкие шарики (диаметром около 1 мм).

### Экспериментальная установка

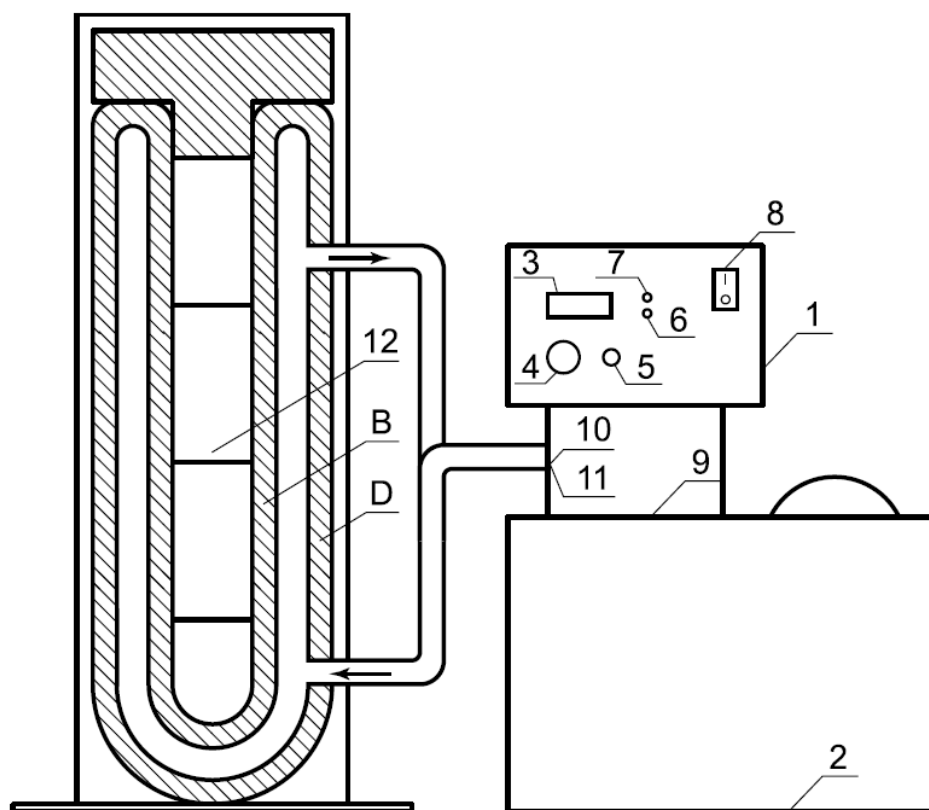


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости

Данная лабораторная работа предусматривает следующую методику измерений: проводятся измерения диаметра шарика  $d$ , далее шарик опускается в нагретый глицерин и записываются температура глицерина и время его падения от засечки 1 до 2 и от 2 до 3 -  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

## 2. Работа и измерения

### 2.1. Измерения шариков

№	диаметр, мм	№	диаметр, мм
1	1.95	7	1.85
2	1.90	8	1.80
3	1.90	9	1.95
4	2.00	10	1.95
5	1.95	11	2.00
6	1.90	12	1.85

Таблица 1: размеры стеклянных шариков

№	диаметр, мм	№	диаметр, мм
1.1	0.80	7.1	0.85
1.2	0.85	7.2	0.80
2.1	1.00	8.1	0.95
2.2	0.90	8.2	1.00
3.1	0.70	9.1	0.90
3.2	0.70	9.2	0.95
4.1	0.80	10.1	0.90
4.2	0.75	10.2	0.95
5.1	0.80	11.1	0.95
5.2	0.75	11.2	0.95
6.1	0.90	12.1	0.95
6.2	0.95	12.2	0.90

Таблица 2: размеры металлических шариков

Средний диаметр стеклянного шарика:  $\langle d_{\text{ст.}} \rangle = 1,92$  мм;

Средний диаметр металлического шарика:  $\langle d_{\text{мет.}} \rangle = 0,86$  мм.

## 2.2. Расчет вязкости жидкости для каждой из температур

Температура 28 °C				Плотность глицерина 1257 кг/м <sup>3</sup>		
Тип шариков	№	$t_{1 \rightarrow 2}$ , с	$t_{2 \rightarrow 3}$ , с	$t_{\Sigma}$ , с	$\eta$ , кг/м·с	$\sigma_{\eta}$ , кг/м·с
Стеклянные шарики	1	9.57	9.23	18.81	0.262	0.013
	2	9.03	8.54	17.58	0.232	0.012
	3	8.62	8.45	17.08	0.226	0.012
Металлические шарики	1	11.15	11.53	22.68	0.271	0.033
	2	11.33	12.74	30.07	0.381	0.040
	3	10.08	12.01	22.09	0.190	0.027
$\langle \eta \rangle = 0.260$ кг/м·с $\langle \sigma_{\eta} \rangle = 0.023$ кг/м·с						
Температура 35 °C; 308 K				Плотность глицерина 1254 кг/м <sup>3</sup>		
Тип шариков	№	$t_{1 \rightarrow 2}$ , с	$t_{2 \rightarrow 3}$ , с	$t_{\Sigma}$ , с	$\eta$ , кг/м·с	$\sigma_{\eta}$ , кг/м·с
Стеклянные шарики	4	7.88	7.67	15.55	0.228	0.011
	5	7.27	6.91	14.18	0.336	0.017
	6	6.54	6.58	13.12	0.292	0.015
Металлические шарики	4	10.08	12.01	22.09	0.233	0.030
	5	8.24	7.88	16.12	0.170	0.022
	6	6.67	6.83	13.50	0.203	0.022
$\langle \eta \rangle = 0.244$ кг/м·с $\langle \sigma_{\eta} \rangle = 0.020$ кг/м·с						
Температура 45 °C				Плотность глицерина 1250 кг/м <sup>3</sup>		
Тип шариков	№	$t_{1 \rightarrow 2}$ , с	$t_{2 \rightarrow 3}$ , с	$t_{\Sigma}$ , с	$\eta$ , кг/м·с	$\sigma_{\eta}$ , кг/м·с
Стеклянные шарики	7	4.94	4.75	9.69	0.122	0.007
	8	3.99	4.23	8.22	0.098	0.005
	9	3.95	3.92	7.87	0.110	0.006
Металлические шарики	7	6.06	6.07	12.13	0.145	0.018
	8	4.30	4.38	8.68	0.145	0.015
	9	6.40	8.16	14.56	0.203	0.022
$\langle \eta \rangle = 0.137$ кг/м·с $\langle \sigma_{\eta} \rangle = 0.012$ кг/м·с						
Температура 55 °C				Плотность глицерина 1246 кг/м <sup>3</sup>		
Тип шариков	№	$t_{1 \rightarrow 2}$ , с	$t_{2 \rightarrow 3}$ , с	$t_{\Sigma}$ , с	$\eta$ , кг/м·с	$\sigma_{\eta}$ , кг/м·с
Стеклянные шарики	10	2.74	2.83	5.57	0.078	0.004
	11	2.85	2.86	5.71	0.084	0.004
	12	2.40	2.79	5.19	0.066	0.004
Металлические шарики	10	3.19	3.18	6.37	0.096	0.010
	11	3.22	3.16	6.38	0.101	0.011
	12	3.17	3.14	6.31	0.095	0.010
$\langle \eta \rangle = 0.087$ кг/м·с $\langle \sigma_{\eta} \rangle = 0.007$ кг/м·с						

Время релаксации  $\ll$  времени падения шарика, поэтому можем считать, что шарик падает без ускорения, погрешность измерения установившейся скорости определяется погрешностью измерения времени, а именно реакцией человека:

$$v_{\text{уст}} = \frac{s}{t}; \quad \sigma_{v_{\text{уст}}} = v_{\text{уст}} \cdot \frac{\sigma_t}{t}. \quad (1)$$

Вязкость жидкости можно определить по закону Стокса:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot g \cdot d^2 \cdot \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v_{\text{уст}}}. \quad (2)$$

Погрешность измерения вязкости считается из погрешности измерения диаметра шарика и установившейся скорости:

$$\sigma_\eta = \eta \cdot \sqrt{4 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v_{\text{уст}}}}{v_{\text{уст}}}\right)^2}. \quad (3)$$

### 2.3. Расчет числа Рейнольдса $Re$ , времени релаксации $\tau$ и пути релаксации $S$ для каждого эксперимента

Рассчитаем число Рейнольдса и время релаксации по известным формулам:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho_{\text{ж}}}{2 \cdot \eta}; \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 \cdot \rho}{\eta}; \quad (5)$$

погрешность времени релаксации определяется из погрешности измерения диаметра шарика и вязкости глицерина:

$$\sigma_\tau = \tau \cdot \sqrt{4 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2}; \quad (6)$$

Интегрируя уравнение полученное из II закона Ньютона, получим формулу для пути релаксации  $S$ :

$$v(t) = v_{\text{уст}} - [v_{\text{уст}} - v(0)] \cdot e^{-t/\tau}; \quad (7)$$

$$S = v_{\text{уст}} t; \quad (8)$$

погрешность  $S$  определяется из погрешности измерения времени:

$$\sigma_S = S \sqrt{\left(\frac{\sigma_{v_{\text{уст}}}}{v_{\text{уст}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2} = S \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sigma_t}{t}. \quad (9)$$

Тип шариков	№	t, с	d, мм	$\rho_{\text{ж}}$	$\eta, \text{кг/м}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{кг/м}\cdot\text{с}$	$Re \cdot 10^{-2}$	$\tau, \text{мс}$	$\sigma_{\tau}, \text{с}$	S, мкм	$\sigma_S, \text{мкм}$
Стекланные шарики	1	18.81	1.95	1257	0.262	0.013	2.48	1.01	0.07	10.8	0.8
	2	17.58	1.90		0.232	0.012	2.93	1.09	0.08	12.4	0.9
	3	17.08	1.90		0.226	0.012	3.09	1.12	0.08	13.1	1.0
Металлические шарики	1	22.68	0.83	1254	0.271	0.033	0.87	0.18	0.03	1.6	0.3
	2	30.07	0.95		0.381	0.040	0.52	0.17	0.02	1.1	0.2
	3	22.09	0.70		0.190	0.027	1.05	0.18	0.04	1.6	0.3
Стекланные шарики	4	15.55	2.00	1250	0.228	0.011	3.54	1.22	0.08	15.7	1.1
	5	14.18	1.95		0.336	0.017	2.57	0.79	0.06	11.1	0.8
	6	13.12	1.90		0.292	0.015	3.11	0.86	0.06	13.1	1.0
Металлические шарики	4	22.09	0.78	1246	0.233	0.030	0.95	0.18	0.03	1.6	0.3
	5	16.12	0.78		0.170	0.022	1.77	0.25	0.04	3.1	0.6
	6	13.50	0.93		0.203	0.022	2.12	0.29	0.04	4.4	0.7
Стекланные шарики	7	9.69	1.85	1250	0.122	0.007	9.78	1.95	0.15	40.2	3.2
	8	8.22	1.80		0.098	0.005	13.97	2.3	0.17	55.9	4.2
	9	7.87	1.95		0.110	0.006	14.08	2.4	0.18	61.0	4.6
Металлические шарики	7	12.13	0.83	1246	0.145	0.018	2.95	0.33	0.06	5.4	0.9
	8	8.68	0.98		0.145	0.015	4.84	0.46	0.07	10.5	1.5
	9	14.56	0.93		0.203	0.022	1.96	0.29	0.04	4.0	0.6
Стекланные шарики	10	5.57	1.95	1246	0.078	0.004	27.96	3.37	0.24	121.2	8.9
	11	5.71	2.00		0.084	0.004	25.98	3.30	0.23	115.5	8.1
	12	5.19	1.85		0.066	0.004	33.65	3.59	0.29	138.3	11.3
Металлические шарики	10	6.37	0.93	1246	0.096	0.010	9.47	0.62	0.09	19.6	2.9
	11	6.38	0.95		0.101	0.011	9.18	0.62	0.09	19.4	2.9
	12	6.31	0.93		0.095	0.010	9.61	0.62	0.09	19.8	3.0

Таблица 3

## 2.4. Расчет энергии активации

$\ln \eta$	$1/T \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$
-1,347	3,322
-1,411	3,247
-1,988	3,145
-2,442	3,049

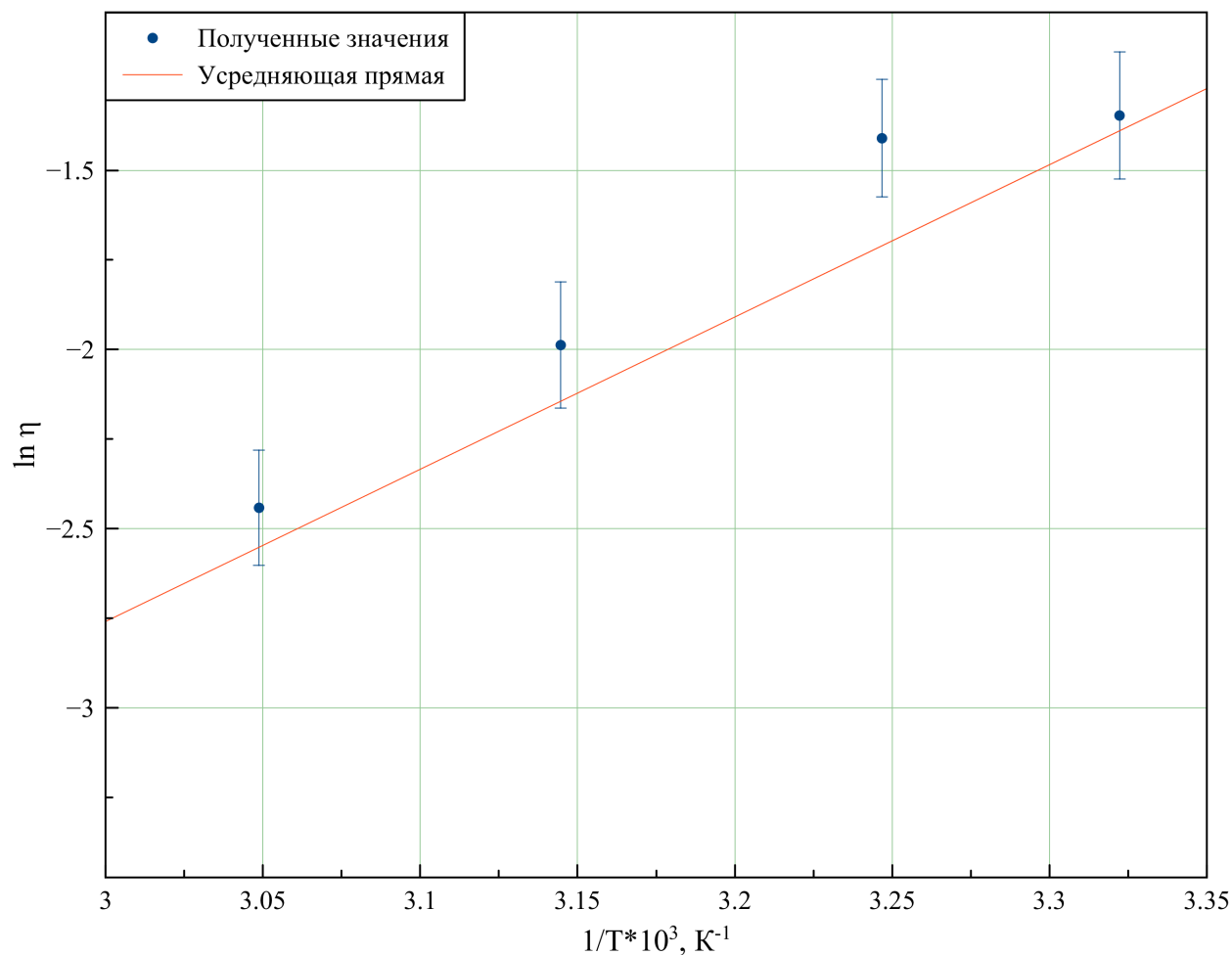


Рис. 2: график зависимости  $\ln \eta$  от  $1/T$

Рассчитаем угловой коэффициент графика с помощью МНК:

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \frac{-5.689 + 3.191 \cdot 1.797}{10.191 - 3.191^2} = 4.25; \quad (10)$$

погрешность определения углового коэффициента:

$$\sigma_b = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2} = 0.45. \quad (11)$$

По данной нам формуле рассчитаем энергию активации:

$$W = k \cdot \frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)} \cdot 10^3 = k \cdot 4.25 \cdot 10^3 = 5.87 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}; \quad (12)$$

погрешность измерения энергии активации:

$$\sigma_W = W \cdot \frac{\sigma_b}{b} = 0.62 \cdot 10^{-20}; \quad (13)$$

В итоге получим:  $W = 5.87 \pm 0.62 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$

### 3. Сравнение полученных данных с теоретическими

Была получена зависимость вязкости глицерина от температуры, которая соотносится с табличными данными для концентрации глицерина 95%.