

# Лабораторная работа № 2.2.6: *Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости.*

Зотов Алексей, 497

20 октября 2016 г.

## 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:** Стекланный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин); термостат; секундомер; микроскоп; мелкие стекланные и стальные шарики (диаметром около 1 мм).

**Теория.** Молекулы, медленно перемещаясь внутри жидкости, пребывая часть времени около определённых мест равновесия и образуя картину меняющейся со временем пространственной решётки. Для перехода в новое состояние, молекула должна преодолеть участки с большой потенциальной энергией, превышающей среднюю энергию молекул. Для этого тепловая энергия молекул должна увеличиться на величину  $W$ , называемую энергией активации.

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

Энергию активации молекулы жидкости можно получить, отложив  $y(\frac{1}{T}) = \ln \eta$ , как угловой коэффициент получившейся прямой.

Для исследования температурной зависимости вязкости жидкости используется метод Стокса, основанный на измерении скорости свободного падения шарика в жидкости.

При ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью, сила сопротивления выражается как:

$$F = 6\pi\eta rv \quad (2)$$

На шарик действуют три силы: сила тяжести, архимедова сила, сила вязкости, зависящая от скорости. Тогда уравнение движения шарика в жидкости по второму закону Ньютона выглядит как:

$$Vg(\rho - \rho_{lq}) - 6\pi\eta rv = V\rho \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

где  $V$  — объем шарика,  $\rho$  — его плотность,  $\rho_{lq}$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения.

Отсюда находим:

$$v(t) = v_{st} - [v_{st} - v(0)]e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Где  $v(0)$  — скорость шарика в момент начала его движения,  $v_{st}$  — установившаяся скорость,  $\tau$  — время релаксации.

$$v_{st} = \frac{Vg(\rho - \rho_{lq})}{6\pi\eta rv} = \frac{2}{9}gr^2 \frac{(\rho - \rho_{lq})}{\eta}, \quad \tau = \frac{V\rho}{6\pi\eta rv} = \frac{2r^2\rho}{9\eta} \quad (5)$$

Как видно, скорость шарика экспоненциально приближается к установившейся скорости. Установление скорости определяется величиной  $\tau$ , имеющей размерность времени и называемой временем релаксации. Если время падения в несколько раз больше времени релаксации, процесс установления скорости можно считать закончившимся. Измеряя на опыте установившуюся скорость, можно определить вязкость жидкости по формуле:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{(\rho - \rho_{lq})}{v_{st}} \quad (6)$$

## Экспериментальная установка

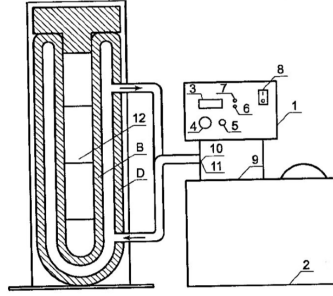


Рис. 1. Установка для определения коэффициента вязкости жидкости

### Схема установки

$$L_1 = L_2 = 10 \text{ см.}$$

### Применимость формулы Стокса

Определим характер обтекания:

$$Re = \frac{vr\rho_{lq}}{\eta} \quad (7)$$

Обтекание является ламинарным при  $Re < 10$

Определим также допустимое расстояние между границей жидкости и верхней меткой:

$$S = v_{st}\tau\left(\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau}\right) \quad (8)$$

**Ход работы.** Будем считать  $v_{st} = \frac{L}{t_2 - t_1}$ , то есть как скорость на втором участке.  
Определим погрешность:

$$\left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2 = 2^2\left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + \varepsilon_{\rho_{gl}}^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\rho_{gl}} = 0.05, \sigma_{dx} = 0.05 \text{ мм}, \sigma_t = 0.1 \text{ с}, \sigma_T = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Из (1) получим:

$$\ln \eta = \frac{W}{k} \cdot \frac{1}{T} + \text{const} \quad (10)$$

тогда  $W = a \cdot k$ , где  $ax + b$  - зависимость  $\ln \eta(x = \frac{1}{T})$

Найдем :

$$a = \left\langle \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right\rangle, y_i = \ln \eta_i, x_i = \frac{1}{T_i} \quad (11)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{n} \sqrt{\sum \sigma^2 \left( \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)} \quad (12)$$

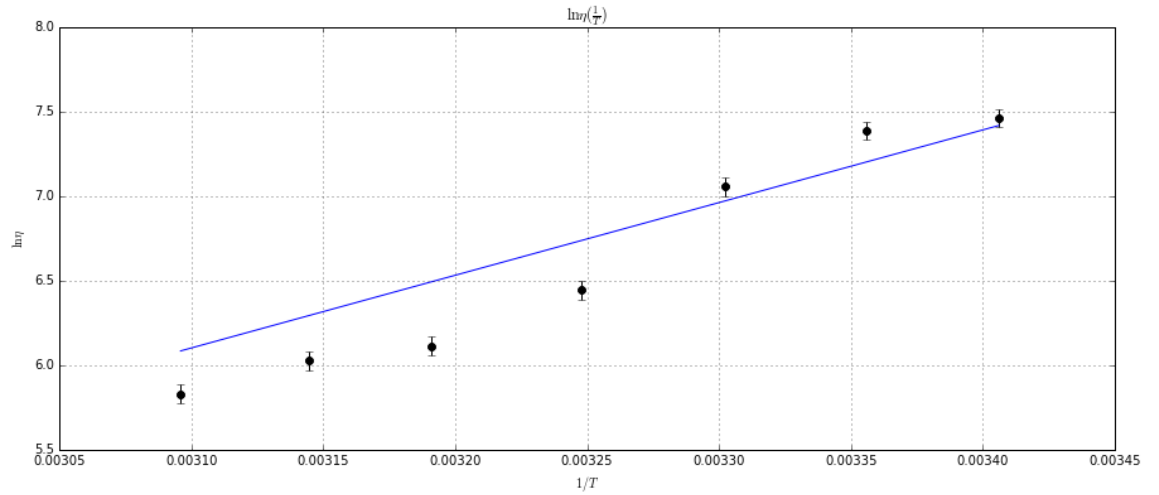
$$\varepsilon_{\frac{\Delta y}{\Delta x}}^2 = \varepsilon_{\Delta y}^2 + \varepsilon_{\Delta x}^2 \quad (13)$$

### 1. Стеклянные шарики.

$$\rho = \rho_{ст} = 2.5 \text{ г/см}^3$$

### Стеклянные шарики

$T, C^o$	20.6	20.6	25.0	29.8	29.8	34.9	34.9	40.4	40.4	45.0	45.0	50.0	50.0
$t_1, c$	15.2	15.5	13.6	9.9	9.4	6.2	6.3	4.6	4.7	3.7	3.3	2.9	2.8
$t_2, c$	30.9	31.4	27.2	20.0	18.8	11.9	12.2	8.7	8.7	7.2	6.7	5.9	5.6
$dx, mm,$	0.8	0.77	0.9	0.83	0.85	0.9	0.83	0.8	0.75	0.73	0.7	0.7	0.7
$v_{st}, cm/c$	0.64	0.63	0.74	0.99	1.06	1.75	1.69	2.44	2.5	2.86	2.94	3.33	3.57
$\rho_{gl} g/cm^3,$	1.263	1.263	1.26	1.258	1.258	1.254	1.254	1.251	1.251	1.248	1.248	1.245	1.245
$\eta, мПа \cdot c$	1777.4	1713.3	1619.6	1148.1	1175.3	618.7	640.4	468.7	435.2	420.8	408.8	344.6	337.5
$\sigma_\eta, мПа \cdot c$	124.7	121.6	112.5	81.0	81.2	45.1	46.6	34.7	32.6	31.4	30.7	26.7	26.2
$\varepsilon_\eta$	0.07	0.071	0.069	0.071	0.069	0.073	0.073	0.074	0.075	0.075	0.075	0.077	0.078
$S_\tau, см$	0.131	0.13	0.151	0.203	0.219	0.359	0.347	0.498	0.511	0.582	0.599	0.678	0.726
$Re$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7	1.3	1.4	1.8	1.9	2.5	2.8



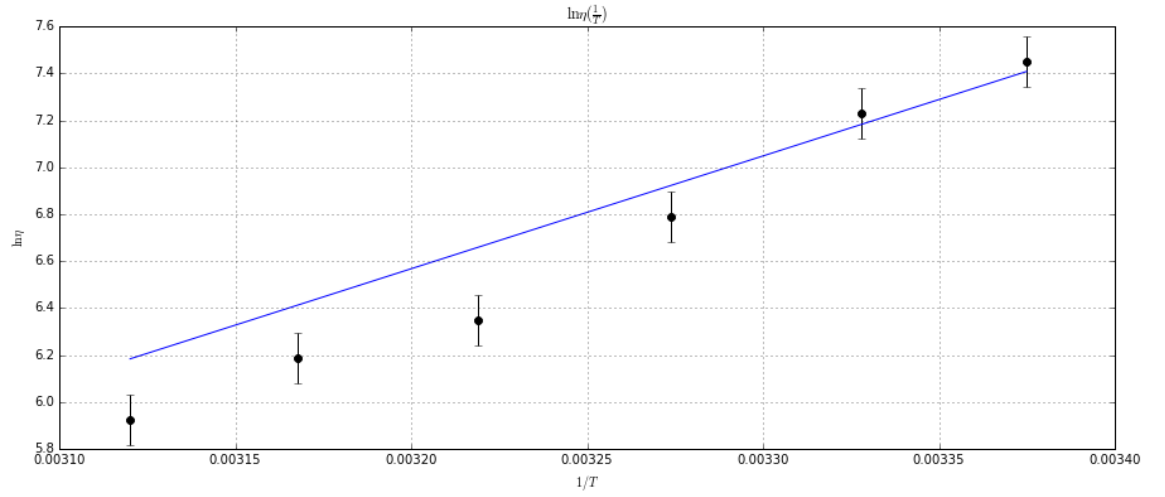
$$\sigma_{tg\alpha} = 124.6, \varepsilon_{tg\alpha} = 0.024$$

$$\operatorname{tg} \alpha \approx 5104.87 \implies W = (7.05 \pm 0.17) * 10^{-20} [\text{Дж}] \approx 0.44 [\text{эВ}].$$

### 2. Металлические шарики. $\rho = \rho_{\text{ir}} = 7.8 \text{ г/см}^3$

#### Металлические шарики

$T, C^o$	21.7	24.9	25.0	30.0	30.0	34.9	35.0	40.3	40.4	45.0	45.0	50.0	50.0
$t_1, c$	21.6	18.6	14.6	10.0	9.3	6.0	7.9	4.9	6.7	4.6	6.2	4.7	3.4
$t_2, c$	43.2	36.0	29.3	20.8	19.5	12.3	14.5	10.3	13.6	10.1	12.1	9.5	6.8
$dx, mm,$	0.8	0.77	0.9	0.83	0.85	0.9	0.83	0.8	0.75	0.73	0.7	0.7	0.7
$v_{st}, cm/c$	0.46	0.57	0.68	0.93	0.98	1.59	1.52	1.85	1.45	1.82	1.69	2.08	2.94
$\rho_{gl} g/cm^3,$	1.262	1.26	1.26	1.257	1.257	1.254	1.254	1.251	1.251	1.248	1.248	1.245	1.245
$\eta, мПа \cdot c$	1968.3	1469.3	1695.9	1060.2	1050.1	727.5	648.2	492.9	553.6	418.2	412.5	335.8	237.8
$\sigma_\eta, мПа \cdot c$	265.1	204.7	207.0	138.6	134.6	89.4	85.1	67.0	79.2	61.5	62.8	51.3	36.7
$\varepsilon_\eta$	0.135	0.139	0.122	0.131	0.128	0.123	0.131	0.136	0.143	0.147	0.152	0.153	0.154
$S_\tau, см$	0.056	0.07	0.083	0.113	0.119	0.193	0.184	0.225	0.176	0.221	0.206	0.253	0.357
$Re$	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.5	1.1



$$\sigma_{tg\alpha} = 293.5, \varepsilon_{tg\alpha} = 0.05$$

$$\operatorname{tg} \alpha \approx 5906.8 \implies W = (8.16 \pm 0.40) * 10^{-20} [\text{Дж}] \approx 0.51 [\text{эВ}].$$

При рассчитанной достаточно малой погрешности в 2 – 5%, мы получили достаточно большую разницу результатов (около 12 - 14 %). Это может говорить о том, что несферическая форма металлических шариков (для которых применима формула Стокса) внесла большую погрешность, чем мы учли.