

# Работа 2.2.6 Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости

18 февраля 2022 г.

## 1 Аннотация

В работе проводится измерение скорости падения шариков из разных материалов в жидкости (глицерин) различной температуры. Затем по установившейся скорости при помощи формулы Стокса определяется вязкость жидкости и энергия активации молекул.

## 2 Теоретические сведения

Для перехода в новое состояние молекула должна получить энергию активации  $W$ . По формуле Больцмана

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

Тогда график  $\ln(\eta)$  в зависимости от  $(1/T)$  - прямая, по угл. коэфф. можно определить  $W$ .

Для определения вязкости жидкости применим формулу Стокса:

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

Найдём уравнение движения шарика в жидкости:

$$v(t) = v_y - [v_y - v(0)]e^{-t/\tau} \quad (3)$$

$$v_y = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta} \quad (4)$$

Отсюда вязкость равна

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v_y} \quad (5)$$

Энергию активации молекул можно найти из равенства

$$W = k \frac{d \ln(\eta)}{d(1/T)} \quad (6)$$

где  $k = 1,38 * 10^{-23}$  - постоянная Больцмана

## 3 Оборудование и инструментальные погрешности

**Линейка:**  $\Delta = \pm 1$  мм

**Микроскоп с градуировкой:**  $\Delta = \pm 0,05$  мм

**Термометр на термостате:**  $\Delta = \pm 0,1$  К

**Секундомер:**  $\Delta = \pm 0,1$  с

Схема установки изображена на рисунке 1

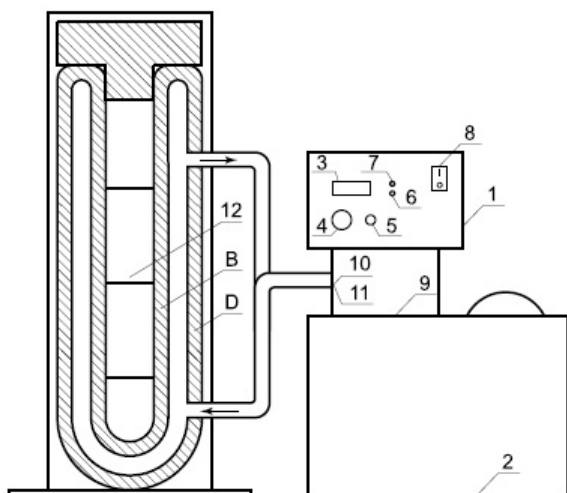


Рис. 1: Установка для определения вязкости жидкости

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Определение вязкости

С помощью формулы 5 определим вязкость жидкости в зависимости от температуры. При расчётах учтём зависимость плотности глицерина от температуры. При оценке погрешностей используем формулу:

$$\sigma_{\eta} = \eta \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2} \quad (7)$$

Расчёты проведены в системе единиц СГС:  $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ пуаз}$ .

Температура, С	23.2	30.1	40.0	50.0	60.0
Вязкость 1 опыт, пуаз	$4.5 \pm 0.2$	$2.7 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.1$	$0.94 \pm 0.05$	$0.58 \pm 0.03$
Вязкость 2 опыт, пуаз	$3.9 \pm 0.5$	$2. \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.1$	$0.91 \pm 0.05$	$0.50 \pm 0.03$
Вязкость 3 опыт, пуаз	$4.3 \pm 0.5$	$2.5 \pm 0.3$	$1.2 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.1$	$0.40 \pm 0.05$
Вязкость 4 опыт, пуаз	$4.6 \pm 0.2$	$2.4 \pm 0.4$	$0.9 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.1$	$0.46 \pm 0.06$
Средняя вязкость, пуаз	<b>4.24</b>	<b>2.57</b>	<b>1.29</b>	<b>0.845</b>	<b>0.475</b>

Можно заметить, что более высокие погрешности в 3-м и 4-м опытах; это связано с малым размером металлического шарика.

### 4.2 Определение чисел Рейнольдса; оценка времени и пути релаксации

Число Рейнольдса можно определить следующим образом:

$$Re = \frac{vR\rho}{\eta} \quad (8)$$

, где  $v$  - характерная скорость течения,  $R$  - радиус шарика,  $\rho$  - плотность жидкости, а  $\eta$  - вычисленный нами коэффициент вязкости. Найдём  $Re$  для каждой температуры. Результаты в таблице 1.

Далее в таблице 2 оценим время и путь релаксации по формулам

$$\tau = \frac{V\rho}{6\pi\eta r} = \frac{2r^2\rho}{9\eta} \quad (9)$$

$$S_{\text{уст}} = V_{\text{уст}} * \tau \quad (10)$$

Температура, С	23.2	30.1	40.0	50.0	60.0
Re, опыт 1	0.024	0.057	0.18	0.48	1.4
Re, опыт 2	0.0072	0.059	0.21	0.59	1.4
Re, опыт 3	0.0086	0.025	0.070	0.23	0.82
Re, опыт 4	0.023	0.013	0.077	0.12	0.53

Таблица 1: Числа Рейнольдса в каждом опыте

Температура, С	№ опыта	Время релаксации, $10^{-4}$ с	Путь релаксации, $10^{-4}$ см
23.2	1	15	12
	2	7	4
	3	8	5
	4	15	12
30.1	1	23	28
	2	24	30
	3	14	15
	4	8.5	6
40.0	1	43	93
	2	45	101
	3	22	38
	4	21	37
50.0	1	68	233
	2	77	300
	3	42	144
	4	26	57
60.0	1	119	729
	2	114	662
	3	76	480
	4	59	289

Таблица 2: Время и путь релаксации в разных опытах

### 4.3 Применимость формулы Стокса

Формула 2 применима только к ламинарному течению жидкости. В таком случае  $Re \leq 10$ . Это условие выполнено во всех опытах. В теории, формула Стокса применима в этих опытах. На практике,  $\eta$  в пределах погрешности опыта зависит от формы шариков.

Путь релаксации должен быть значительно меньше расстояния от поверхности до первой риски - выполнено во всех опытах.

### 4.4 Определение энергии активации

При помощи метода наименьших квадратов построим прямую  $y = kx + b$ . Как видно из информации на графике 2,  $k = 5784 \pm 223$ . Тогда определим энергию активации из формулы 6, а погрешность найдём по формуле

$$\sigma_W = W \frac{\sigma_k}{k} \quad (11)$$

Таким образом,  $W = 79 * 10^{-21} \pm 3 * 10^{-21}$

## 5 Вывод

В ходе этой работы по установившейся скорости падения шариков в жидкости установили её вязкость по формуле Стокса, в зависимости от температуры, проанализировав применимость формулы в каждом опыте; а также определили энергию активации молекул глицерина.

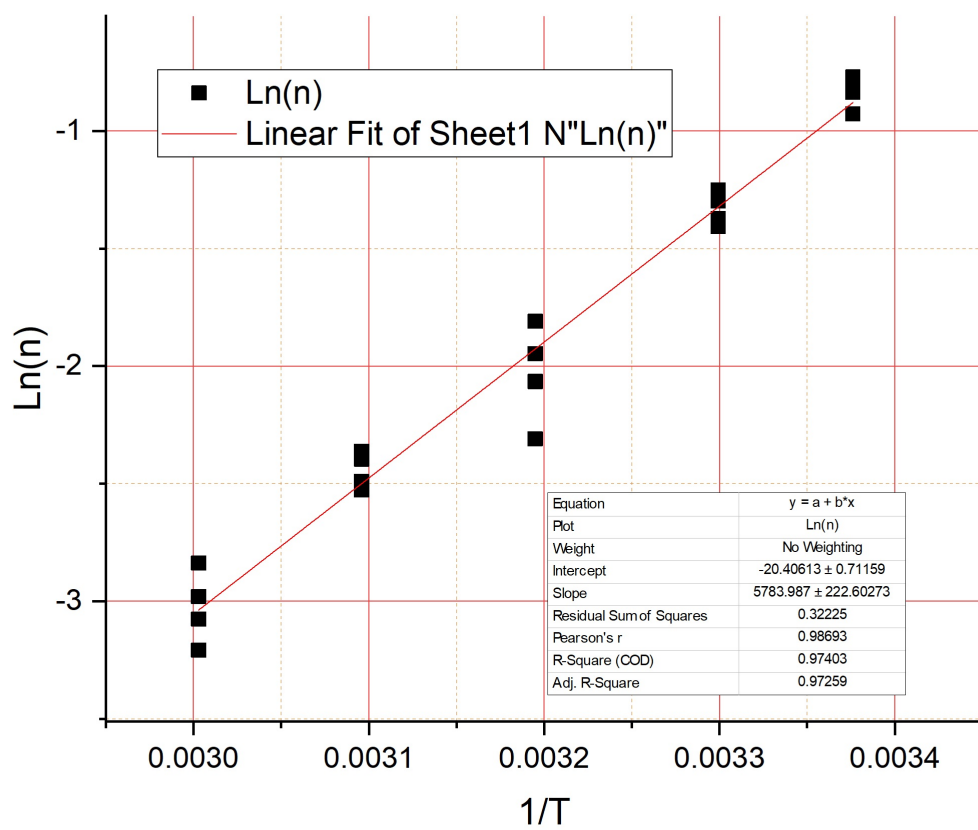


Рис. 2: График зависимости  $Ln(\eta)$  от  $1/T$