

# Отчет о выполнении лабораторной работы 2.2.6

## Определение энергии активации

Тихонов Ярослав Б01-306

Март 2024

### 1 Аннотация

**Цель:** 1) измерение скорости падения шариков при разной температуре жидкости; 2) вычисление вязкости жидкости по закону Стокса и расчет энергии активации

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

### 2 Теория

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

Из этой формулы следует, что вязкость жидкости при повышении температуры должна резко уменьшаться. Если отложить на графике логарифм вязкости  $\ln \eta$  в зависимости от  $1/T$ , то согласно (1) должна получиться прямая линия, по угловому коэффициенту которой можно определить энергию активации молекулы  $W$  исследуемой жидкости. Экспериментальные исследования показывают, что в небольших температурных интервалах эта формула неплохо описывает изменение вязкости с температурой. При увеличении температурного интервала согласие получается плохим, что представляется вполне естественным, поскольку формула (1) выведена при очень грубых предположениях. Для исследования температурной зависимости вязкости жидкости в данной работе используется метод Стокса, основанный на измерении скорости свободного падения шарика в жидкости. Суть его заключается в следующем. На всякое тело, движущееся в вязкой жидкости, действует сила сопротивления. В общем случае величина этой силы зависит от многих факторов: от вязкости жидкости, от формы тела, от характера обтекания и т. д. Стоксом было получено строгое решение задачи о ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью. В этом случае сила сопротивления  $F$  определяется формулой Стокса

$$F = 6\pi\eta r v \quad (2)$$

Найдем уравнение движения шарика в жидкости:

$$Vg(\rho - \rho_l) - 6\pi\eta r v = V\rho \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

Решая данное уравнение найдем:

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

где  $v(0)$  - начальная скорость движения шарика,  $\tau$  - скорость релаксации,

$$v_{уст} = \frac{Vg(\rho - \rho_l)}{6\pi\eta r} = 2/9gr^2 \frac{(\rho - \rho_l)}{\eta}; \tau = \frac{V\rho}{6\pi\eta r} = 2/9 \frac{r^2\rho}{\eta} \quad (5)$$

Таким образом можно определить вязкость жидкости :

$$\eta = 2/9gr^2 \frac{(\rho - \rho_l)}{v_{уст}} \quad (6)$$

## 2.1 Замечание

Описанная выше методика определения вязкости правильна лишь в том случае, если выполнены предположения, сделанные при выводе формулы Стокса. Зависимость/независимость  $\eta$  от  $r$  служит индикатором правильности предложенной теории. В случае обнаружения систематической зависимости между этими величинами следует использовать более точную формулу:

$$\eta = 2/9gr^2 \frac{(\rho - \rho_l)}{v_{уст} [1 + 2.4(r/R)]} \quad (7)$$

где  $R$  - радиус сосуда

У нас  $r \ll R$ , поэтому можно использовать (6)

## 2.2 Экспериментальная установка

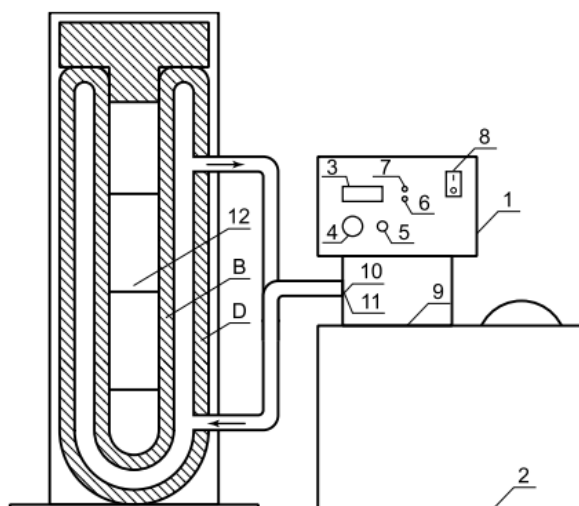
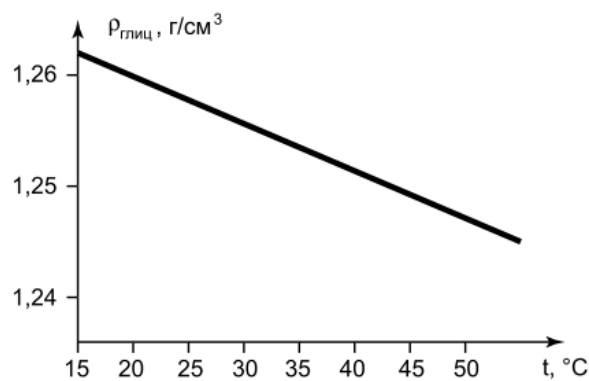


Рис. 1. Установка для определения коэффициента вязкости жидкости



## 3 Ход работы

Для каждого шарика мы измерили его диаметр.

Длина пути, которую шарик проходит с установившейся скоростью:

$s = 9.9$  см.

$$v_{уст} = \frac{(s/t_1) + (s/t_2)}{2}$$

№ измерения	$d_{glass}$ , мм	$d_{steel}$ , мм
1	2.10	0.7
2	2.15	0.9
3	2.15	0.8
4	2.15	0.75
5	2.10	0.9
6	2.05	0.6
7	2.15	0.75
8	2.10	0.7
9	2.20	0.7
10	2.00	0.75

Таблица 1: Диаметры шариков

## 4 Обработка измерений

По полученным данным вычислим  $\eta$ :

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
$\eta$ , Па · с	0.738	0.775	0.367	0.358	0.304	0.268	0.165	0.144	0.097	0.073

Таблица 2:  $\eta$ , стекло

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
$\eta$ , Па · с	0.657	0.727	0.265	0.329	0.312	0.177	0.159	0.129	0.076	0.107

Таблица 3:  $\eta$ , сталь

Число Рейнольдса получим по формуле:

$$Re = vr\rho_{ж}/\eta$$

T, K	298.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
Re	0.007	0.007	0.031	0.033	0.043	0.051	0.156	0.19	0.484	0.64

Таблица 4: Re, стекло

T, K	298.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
Re	0.002	0.003	0.016	0.009	0.017	0.015	0.037	0.046	0.131	0.082

Таблица 5: Re, сталь

Обтекание можно считать ламинарным при  $Re < 0.5$

Получается, обтекание было ламинарным всегда, кроме измерения для последней температуры для стеклянного шарика.

То есть формула Стокса для этого случая не применима.

Время релаксации оценим по формуле:

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{r^2 \rho}{\eta}$$

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
$\tau$ ,	0.79	0.771	1.627	1.668	1.919	2.125	3.620	4.051	6.300	7.610

Таблица 6:  $\tau$ , стекло

Оценим путь релаксации:

$$S = v\tau$$

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
$\tau$ , с	0.923	1.073	2.616	1.976	2.500	2.938	4.088	4.703	7.982	6.075

Таблица 7:  $\tau$ , сталь

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
s, м	0.003	0.003	0.014	0.015	0.019	0.023	0.069	0.085	0.216	0.286

Таблица 8: s, стекло

T, K	297.58	298.55	308.98	308.98	313.98	313.98	324	324	333.78	333.78
s, м	0.002	0.004	0.023	0.012	0.023	0.021	0.052	0.064	0.183	0.114

Таблица 9: s, сталь

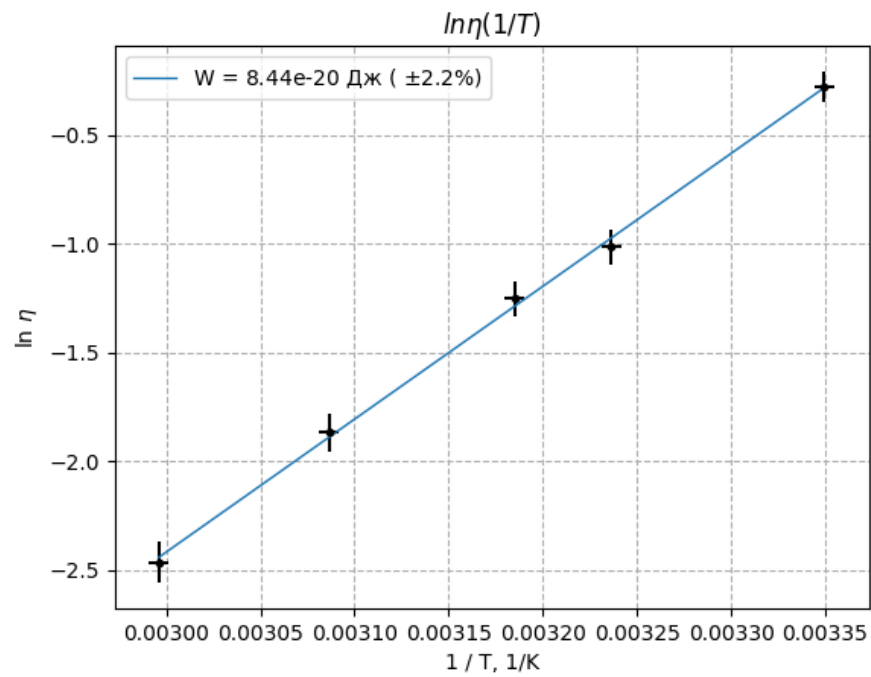


Рис. 1: для стекла

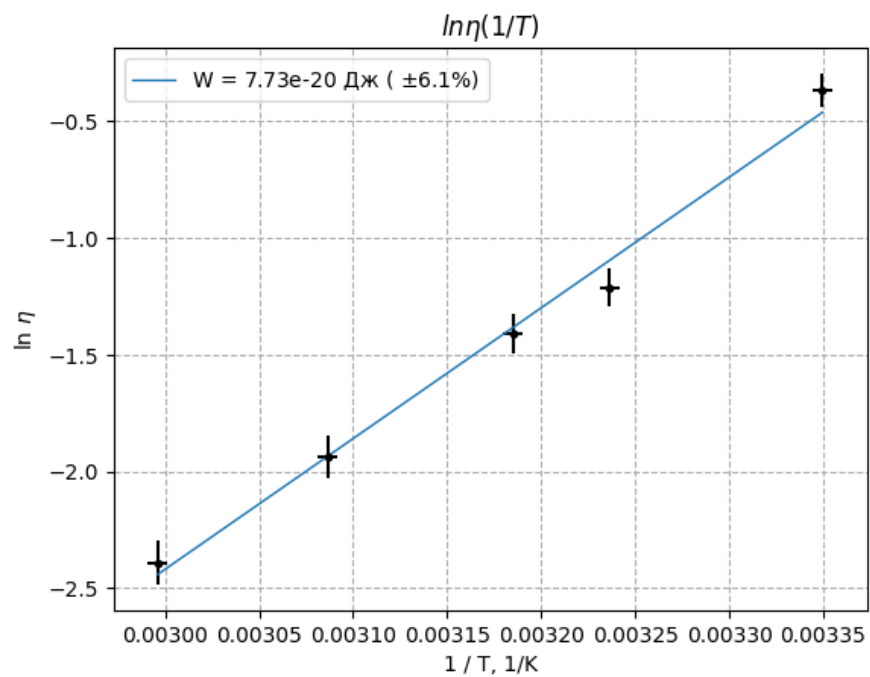


Рис. 2: для стали

Видим, что значения  $W$  совпадают в пределах погрешности. Найдём их общее значение усреднением.

Итого получаем энергию активации

$$W = (8.08 \pm 0.51) 10^{-20} \text{ Дж } (\varepsilon \approx 6.29\%)$$

## 5 Вывод

В ходе работы мы измерили скорости падения шариков при разных температурах глицерина; вычислили вязкости глицерина по закону Стокса при разных температурах и рассчитали энергию активации