

Лабораторная работа 2.2.6

Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости

Шерхалов Денис Б02-204

11 апреля 2023 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: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин); термостат; секундомер; горизонтальный компаратор; микроскоп; мелкие шарики (диаметром 1-2 мм).

1. Введение

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 флуктуации — увеличиться на некоторую величину W , называемую энергией активации. Температурная зависимость вязкости жидкости при достаточно грубых предположениях можно описать формулой

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

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

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

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

$$F = 6\pi\eta rv \quad (3)$$

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

$$v_{\text{уст}} = \frac{2}{9}gr^2\frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta}, \quad \tau = \frac{2r^2\rho}{9\eta} \quad (4)$$

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

$$Re = \frac{\rho_{\text{ж}}vd}{\eta}, \quad S = v_{\text{уст}}\tau$$

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

Экспериментальная установка Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). Диаметр сосуда ≈ 3 см, длина $h = 20$ 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. Изменяя 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.

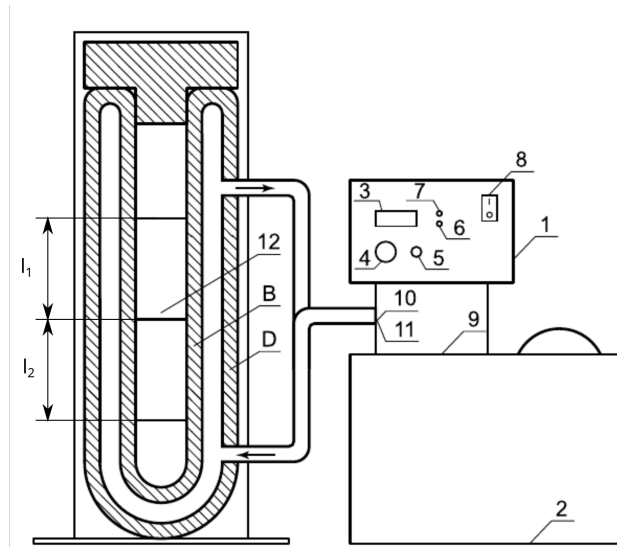


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости.

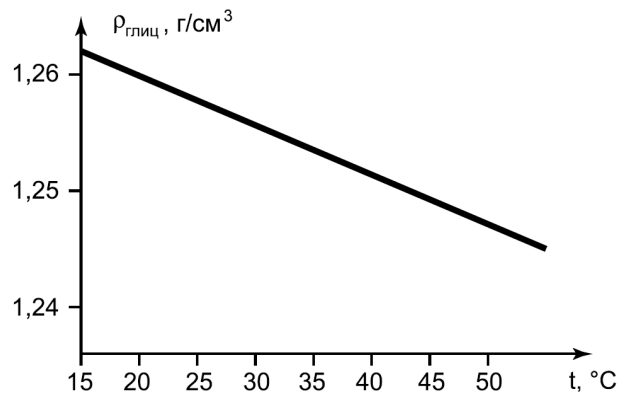


Рис. 2: Зависимость плотности глицерина от температуры.

2. Выполнение

1. Отберём 20 шариков – 10 стеклянных и 10 стальных. Измерим их размеры с помощью микроскопа. Будем измерять в двух перпендикулярных плоскостях и усреднять.

$$\rho_{\text{стекло}} = 2.5 \text{ г/см}^3 \quad \rho_{\text{сталь}} = 7.8 \text{ г/см}^3$$

2. Измерим установившиеся скорости падения шариков и вычислим вязкость η по формуле (5). Измерения выполним для 5 значений температуры в интервале от комнатной до 60°C . Для каждого значения температуры определим плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}$ по графику, приложенному к работе (рис. 2).

Таблица 1: Значение плотности глицерина в зависимости от температуры

T, °C	20.5	31.0	40.8	50.1	60.0
$\rho_{\text{ж}}, \text{ г/см}^3$	1.260	1.255	1.250	1.245	1.240

3. Оценим погрешности:

$$\Delta t_{\text{пад}} = 0.2 \text{ с}, \quad \Delta T = 0.5 \text{ K}$$

$$\Delta v_{\text{уст}} = \Delta t_{\text{пад}} \frac{h}{t_{\text{пад}}^2}$$

$$\Delta \eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v_{\text{уст}}^2} \Delta v_{\text{уст}}$$

4. Теперь построим график $\ln \eta(T^{-1})$ (График №1).

$$\left(\frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)} \right)_{\text{сталь}} = (6686 \pm 142) \text{ K} \Rightarrow W_{\text{сталь}}/k = (6686 \pm 142) \text{ K}$$

$$\left(\frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)} \right)_{\text{стекло}} = (6329 \pm 36), \text{ K} \Rightarrow W_{\text{стекло}}/k = (6361 \pm 36) \text{ K}$$

$$\left(\frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)} \right)_{\text{средн}} = (6524 \pm 162), \text{ K} \Rightarrow W_{\text{средн}}/k = (6524 \pm 162) \text{ K}$$

Таблица 2: Измерения времени для стальных шариков

№	$T, ^\circ C$	$d, \text{мм}$	$t_{\text{пад}}, \text{с}$	$v, \text{см/с}$	$\Delta v, \text{см/с}$	$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	$\Delta \eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	$\tau, \text{мс}$	Re	$S, \mu\text{м}$
1	20.5	0.80	81.77	0.245	0.001	933	2	0.30	0.003	0.73
2		0.90	72.55	0.276	0.001	1048	3	0.33	0.003	0.92
3	31.0	0.70	69.66	0.287	0.001	609	2	0.35	0.004	1.00
4		0.70	63.06	0.317	0.001	551	2	0.39	0.005	1.22
5	40.8	0.80	29.34	0.682	0.004	335	2	0.83	0.020	5.64
6		0.90	23.41	0.854	0.007	339	3	1.04	0.028	8.86
7	50.1	0.85	9.82	2.037	0.041	127	3	2.47	0.170	50.3
8		0.88	10.02	1.996	0.040	139	3	2.42	0.158	48.3
9	60.0	0.80	6.03	3.317	0.110	69	2	4.02	0.477	133.3
10		0.65	9.60	2.083	0.043	73	2	2.52	0.231	52.6

Таблица 3: Измерения для стеклянных шариков

№	$T, ^\circ C$	$d, \text{мм}$	$t_{\text{пад}}, \text{с}$	$v, \text{см/с}$	$\Delta v, \text{см/с}$	$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	$\Delta \eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	$\tau, \text{мс}$	Re	$S, \mu\text{м}$
1	20.5	2.00	67.28	0.297	0.001	910	3	0.611	0.008	1.82
2		2.05	68.60	0.292	0.001	975	3	0.599	0.008	1.75
3	31.0	2.00	36.16	0.553	0.003	491	3	1.132	0.028	6.26
4		2.10	36.03	0.555	0.003	539	3	1.136	0.027	6.30
5	40.8	2.05	18.39	1.088	0.012	263	3	2.216	0.106	24.10
6		2.10	17.88	1.119	0.013	269	3	2.279	0.109	25.49
7	50.1	2.05	8.70	2.299	0.053	125	3	4.665	0.469	107.3
8		2.05	8.80	2.273	0.052	127	3	4.612	0.458	104.8
9	60.0	2.05	5.44	3.676	0.135	79	3	7.432	1.190	273.2
10		2.10	5.29	3.781	0.143	80	3	7.642	1.228	288.9

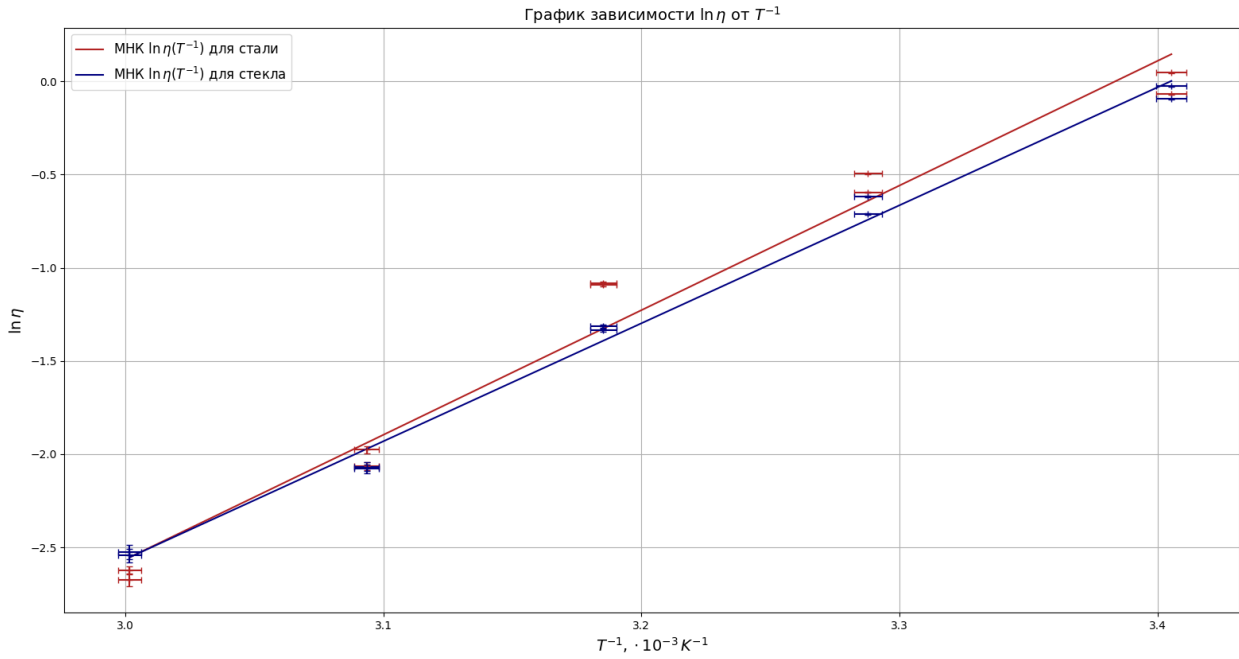


Рис. 3: График №1 $\ln \eta(T^{-1})$

3. Вывод

Во-первых, так как в каждом опыте значение числа Рейнольдса Re было очень маленьким (меньше 1.5), поэтому можно считать, что обтекание шарика жидкостью действительно имело ламинарный характер и формула Стокса справедлива в данной лабораторной работе.

Так же мы вычислили вязкость исследуемой жидкости (глицерина) по закону Стокса, например при $T = 323 \text{ K}$ $\eta = (130 \pm 7) \text{ мПа}\cdot\text{с}$, что соответствует табличному значению раствора глицерина. И вычислили энергию активации глицерина $W = (90 \pm 2) \text{ зептоДж}$.