

Московский Физико-технический Институт
(Национальный исследовательский университет)

Отчет выполнении работы 2.2.6

Определение энергии активации по температурной
зависимости вязкости жидкости

Выполнили студентки 1 курса
ФБМФ, группа Б06-103
Попеску Полина
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

1 Введение

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); термомостат; секундомер; горизонтальный компаратор; микроскоп; мелкие шарики (диаметром 1-2 мм).

2 Теоретический материал

По своим свойствам жидкости сходны как с газами, так и с твердыми телами. Подобно газам, жидкости принимают форму сосуда, в котором они находятся. Подобно твердым телам, они обладают сравнительно большой плотностью, с трудом поддаются сжатию. Двойственный характер свойств жидкостей связан с особенностями движения их молекул. В газах молекулы движутся хаотично, в их расположении отсутствует порядок. В кристаллических твердых телах частицы колеблются около определенных положений равновесия – узлов кристаллической решетки. В жидкостях, как и в кристаллах, каждая молекула находится в потенциальной яме электрического поля, создаваемого окружающими молекулами. Молекулы колеблются со средней частотой, близкой к частоте колебаний атомов в кристаллических телах. Глубина потенциальной ямы в жидкостях больше средней кинетической энергии колеблющейся молекулы, поэтому молекулы колеблются вокруг более или менее стабильных положений равновесия. Однако у жидкостей различие между этими двумя энергиями невелико, так что молекулы нередко выскакивают из своей потенциальной ямы и занимают место в другой. В отличие от твердых тел, жидкости обладают рыхлой структурой. В них имеются свободные места – дырки, благодаря чему молекулы могут перемещаться, покидая свое место и занимая одну из соседних дырок. Таким образом, молекулы медленно перемещаются внутри жидкости, пребывая часть времени около определенных мест равновесия и образуя картину меняющейся со временем пространственной решетки. На современном языке принято говорить, что в жидкости присутствует ближний, но не дальний порядок, расположение молекул упорядочено в небольших объемах, но порядок перестает замечаться при увеличении расстояния.

Отмеченный характер движения молекул объясняет как медленность диффузии в жидкостях, так и большую (по сравнению с газами) их вязкость. В газах вязкость объясняется происходящим при тепловом движении молекул переносом количества направленного движения. В жидкостях такие переходы существенно замедлены. Количество молекул, имеющих энергии больше W , в соответствии с формулой Больцмана экспоненциально зависит от W . Температурная зависимость вязкости жидкости выражается формулой :

$$\eta \approx Ae^{\frac{W}{kT}} \quad (1)$$

Из данной формулы следует, что при повышении температуры вязкость должна резко понижаться. Если построить на графике логарифм вязкости $\ln \eta$ в зависимости от $1/T$, должна получиться прямая линия, по угловому коэффициенту которой можно получить энергию активации молекулы исследуемой жидкости:

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

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,двигающееся 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

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

где η - вязкость жидкости, v - скорость шарика, r - радиус шарика.

Рассматривая свободное падение шарика в вязкой жидкости, получаем уравнение:

$$Vg(\rho - \rho_{\text{ж}}) - 6\pi\eta rv = V\rho \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

Решая данное уравнение относительно скорости, получаем:

$$v(t) = v_{\text{уст}} - [v_{\text{уст}} - v(0)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

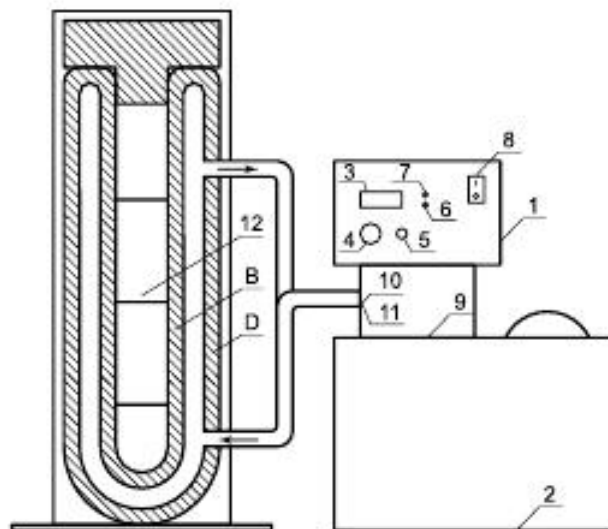
$$v_{\text{уст}} = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{r^2 \rho}{\eta} \quad (7)$$

3 Экспериментальная установка

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). Диаметр сосуда ≈ 3 см, длина ≈ 40 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. Измеряя расстояние между метками с помощью линейки, а время падения с помощью секундомера, определяют 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. 3.



4 Обработка результатов измерений

1. Параметры установки: плотность стекла – 2500 кг/м³, плотность стали – 7800 кг/м³. Расстояния между метками $L_1 = L_2 = 10 \pm 0,05$ см

Погрешности:

$$\Delta r = 0.05 \text{ мм}, \Delta t = 0.1 \text{ с}, \Delta T = 1 \text{ К}, \Delta l = 0.005 \text{ м}$$

Соответствие температуры и плотности глицерина, определенные по графику:

Таблица 1: Соответствие температуры плотности глицерина

t, °C	$\rho_{\text{гл}}$, кг/м ³
23,0	1259
30,4	1255
38,2	1252
46,4	1248
55,0	1244

2. Измерим установившиеся скорости падения шариков и вычислим вязкость по формуле (5). Выполним измерения для 5 значений температур в интервале от комнатной до 55°.

Погрешности для расчетов:

$$\Delta V_{\text{уст}} = V_{\text{уст}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}$$

$$\Delta \eta = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{2\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{\text{уст}}}{V_{\text{уст}}}\right)^2}$$

Таблица 2: Результаты измерений для стеклянного шарика

t, °C	$r_{\text{ш}}$, м	t_1	t_2	$V_{\text{уст1}}$, м/с	$V_{\text{уст2}}$, м/с	η_1 , кг/(м*с)	η_2 , кг/(м*с)	$\sigma \ln(\eta_1)$	$\sigma \ln(\eta_2)$
23,0	0,0011	28,4	28,8	0,00352	0,00347	0,93	0,94	0,08	0,09
23,0	0,00105	29,0	29,0	0,00345	0,00345	0,87	0,87	0,08	0,08
30,4	0,001	18,0	18,4	0,00556	0,00543	0,49	0,50	0,05	0,05
30,4	0,00095	18,6	18,9	0,00538	0,00529	0,46	0,46	0,05	0,05
38,2	0,001	9,2	9,0	0,01087	0,01111	0,25	0,24	0,03	0,02
38,2	0,001	9,3	9,0	0,01075	0,01111	0,25	0,24	0,03	0,02
46,4	0,001	5,6	6,1	0,01786	0,01639	0,15	0,17	0,02	0,02
46,4	0,0012	5,5	6,2	0,01818	0,01613	0,22	0,24	0,02	0,02
55,0	0,0012	3,6	3,0	0,02778	0,03333	0,14	0,12	0,01	0,01
55,0	0,001	3,2	3,5	0,03125	0,02857	0,09	0,10	0,01	0,01

Таблица 3: Результаты измерений для стального шарика

$t, ^\circ C$	$r_{ш}, м$	t_1	t_2	$V_{уст1}, м/с$	$V_{уст2}, м/с$	$\eta_1, кг/(м^*с)$	$\eta_2, кг/(м^*с)$	$\sigma \ln(\eta_1)$	$\sigma \ln(\eta_2)$
23,0	0,0004	42,4	42,4	0,00236	0,00236	0,97	0,97	0,24	0,24
23,0	0,0004	38,6	38,4	0,00259	0,00260	0,88	0,88	0,22	0,22
30,4	0,0004	17,0	17,4	0,00588	0,00575	0,39	0,40	0,10	0,10
30,4	0,00045	17,4	18,2	0,00575	0,00549	0,50	0,53	0,11	0,12
38,2	0,0004	11,9	12,2	0,00840	0,00820	0,27	0,28	0,07	0,07
38,2	0,00045	11,2	11,9	0,00893	0,00840	0,32	0,34	0,07	0,08
46,4	0,00045	6,0	6,0	0,01667	0,01667	0,17	0,17	0,04	0,04
46,4	0,00045	6,3	6,5	0,01587	0,01538	0,18	0,19	0,04	0,04
55,0	0,00035	5,5	6,1	0,01818	0,01639	0,10	0,11	0,03	0,03
55,0	0,0004	3,4	3,4	0,02941	0,02941	0,08	0,08	0,02	0,02

3. Для каждого из опытов вычислим значение числа Рейнольдса Re , оценим время релаксации τ и путь релаксации S .

Таблица 4: Стекланный шарик

t, C°	Re	$\tau, с$	$S, мм$
23,0	0,00510	0,00071	0,00247
23,0	0,00527	0,00071	0,00244
30,4	0,01365	0,00111	0,00604
30,4	0,01362	0,00108	0,00573
38,2	0,05678	0,00227	0,02520
38,2	0,05678	0,00227	0,02520
46,4	0,12281	0,00333	0,05467
46,4	0,09907	0,00328	0,05292
55,0	0,42044	0,00676	0,22532
55,0	0,37068	0,00579	0,16554

Таблица 5: Стальной шарик

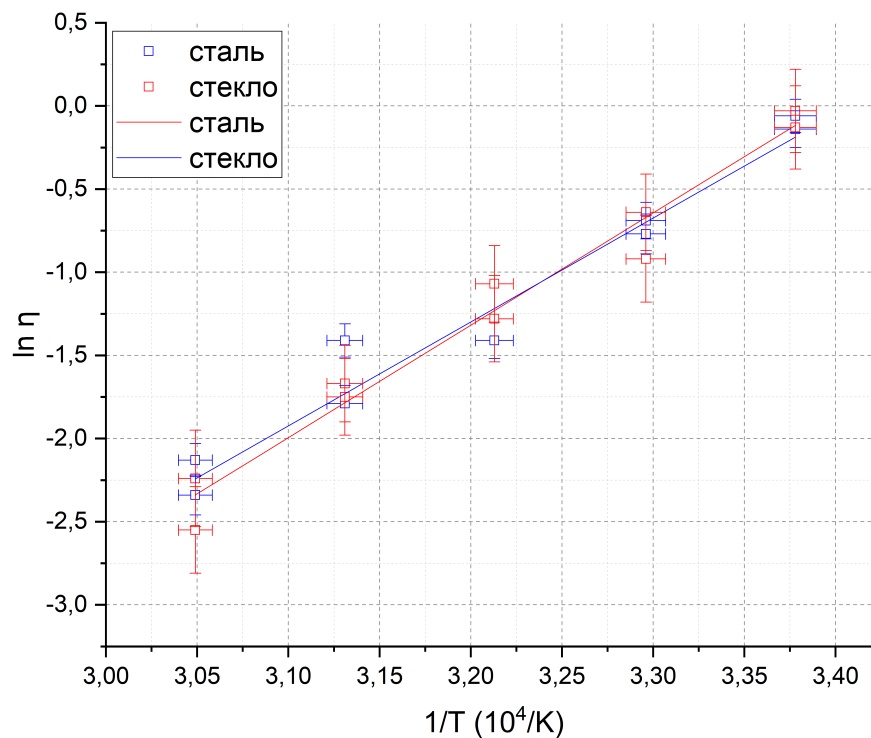
t, C°	Re	$\tau, с$	$S, мм$
23,0	0,00123	0,00029	0,00068
23,0	0,00150	0,00032	0,00082
30,4	0,00726	0,00070	0,00401
30,4	0,00590	0,00067	0,00367
38,2	0,01472	0,00099	0,00815
38,2	0,01376	0,00102	0,00857
46,4	0,05390	0,00202	0,03369
46,4	0,04593	0,00187	0,02871
55,0	0,06680	0,00199	0,03257
55,0	0,18813	0,00357	0,10485

Число Рейнольдса для всех случаев получилось очень мало, следовательно, течение можно считать ламинарным.

Время релаксации меньше времени прохождения шарика до первой отметки, следовательно, движение можно считать установившемся.

Таким образом, формула Стокса может быть применена.

4. Построим график зависимости $\ln \eta$ от $1/T$.



Наклон графика – величина W/k . Для стеклянного шарика получим: $k_{\text{стекло}} = (6755 \pm 456)$, $W_{\text{стекло}} = (93.3 \pm 6.3) \cdot 10^{-20}$ Дж/моль. Для стального: $k_{\text{сталь}} = (6246 \pm 393)$, $W_{\text{сталь}} = (86.2 \pm 5.4) \cdot 10^{-20}$ Дж/моль.

Тогда итоговая энергия активации

$$W = (89,8 \pm 5,9) \cdot 10^{-20} \text{ Дж/моль}$$

5 Вывод

В данной работе была проверена справедливость формулы Стокса. Были вычислены числа Рейнольдса для движения шарика в вязкой жидкости, время релаксации и путь. На основе их величин было определено, что течение можно считать ламинарным, движение шарика – установившемся.

Была определена энергия активации глицерина $W = (89,8 \pm 5,9) \cdot 10^{-20}$ Дж/моль.