

Отчет о выполнении лабораторной работы 2.2.6

Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости.

Исламов Сардор, группа Б02-111

5 апреля 2022 г.

Аннотация. В ходе работы измерены скорости свободного падения шариков в жидкости при разной температуре. По полученным значениям по закону Стокса рассчитана вязкость и энергия активации исследуемой жидкости (глицерин).

Теоретическое введение

В отличие от твёрдых тел, жидкости обладают «рыхлой» структурой. В них имеются свободные места — «дырки», благодаря чему молекулы могут перемещаться, покидая своё место и занимая одну из соседних дырок. Таким образом, молекулы медленно перемещаются внутри жидкости, пребывая часть времени около определённых мест равновесия и образуя картину меняющейся со временем пространственной решётки. На современном языке принято говорить, что в жидкости присутствует ближний, но не дальний порядок, расположение молекул упорядочено в небольших объёмах, но порядок перестаёт замечаться при увеличении расстояния.

Для того, чтобы перейти в новое состояние, молекула 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. Вследствие этого переходы молекул из одного положения равновесия в другое происходят сравнительно редко и тем реже, чем больше энергия активации.

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:

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

Из формулы (1) 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,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

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

где η — вязкость жидкости, v — скорость шарика, r — его радиус.

Рассмотрим свободное падение шарика в вязкой жидкости. На шарик действуют три силы: сила тяжести, архимедова сила и сила вязкости, зависящая от скорости.

Найдём уравнение движения шарика в жидкости. По второму закону Ньютона:

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

где V — объём шарика, ρ — его плотность, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения. Решая это уравнение, найдём

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

В формуле (4) приняты обозначения: $v(0)$ — скорость шарика в момент начала его движения в жидкости,

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

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 расстоянии 10 см друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчётом, 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 помещён 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.

Радиусы шариков измеряются микроскопом. Для каждого шарика рекомендуется измерить несколько различных диаметров и вычислить среднее значение. Такое усреднение целесообразно, поскольку в работе используются шарики, форма которых может несколько отличаться от сферической.

Опыты проводятся при нескольких температурах в интервале от комнатной до $50\text{--}60^\circ\text{C}$.

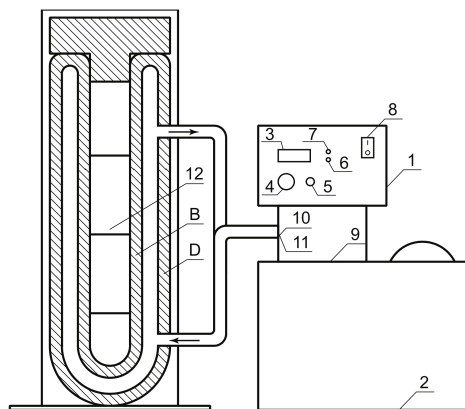


Рис. 1: Схема установки

Результаты измерений и обработка данных

Расстояние l между рисками = 10 ± 0.1 см. $\rho_{\text{стекло}} = 2.5$ г/см³, $\rho_{\text{сталь}} = 7.8$ г/см³

Несколько первых замеров времени произведем с нескольких секундомеров для вычисления погрешностей. $\sigma_t = 0.15$ с.

В таблице при каждой температуре результаты представлены сначала для двух стеклянных шариков, далее для двух стальных.

t_1 и t_2 - время прохождения шариком соответственно расстояний между первыми двумя и следующими двумя рисками (в первой таблице также t'_1 и t'_2 - время, замеренное вторым секундомером)

Стеклянные шарики будем считать симметричными. Для одного стального проведём несколько измерений диаметра с разных сторон для вычисления случайной погрешности.

r_1 , мм	r_2 , мм	r_3 , мм	$\langle r \rangle$, мм	$\sigma_r^{\text{сл}}$, мм	$\sigma_r^{\text{сист}}$, мм	σ_r , мм
0.425	0.425	0.45	0.433	0.008	0.0025	0.008

Число Рейнольдса будем рассчитывать по формуле $Re = vr\rho_{\text{ж}}/\eta$. В случае, если оно оказалось больше 0.5 коэффициент вязкости пересчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{(1 + 2.4 r/R)v_{\text{уст}}} \quad (6)$$

Занесем все значения в табл. 1

Путь релаксации в каждом опыте много меньше расстояния от уровня жидкости до первой риски, поэтому скорость шариков можно считать установившейся.

Построим теперь график зависимости $\ln \eta$ ($1/T$) (рис. 2)

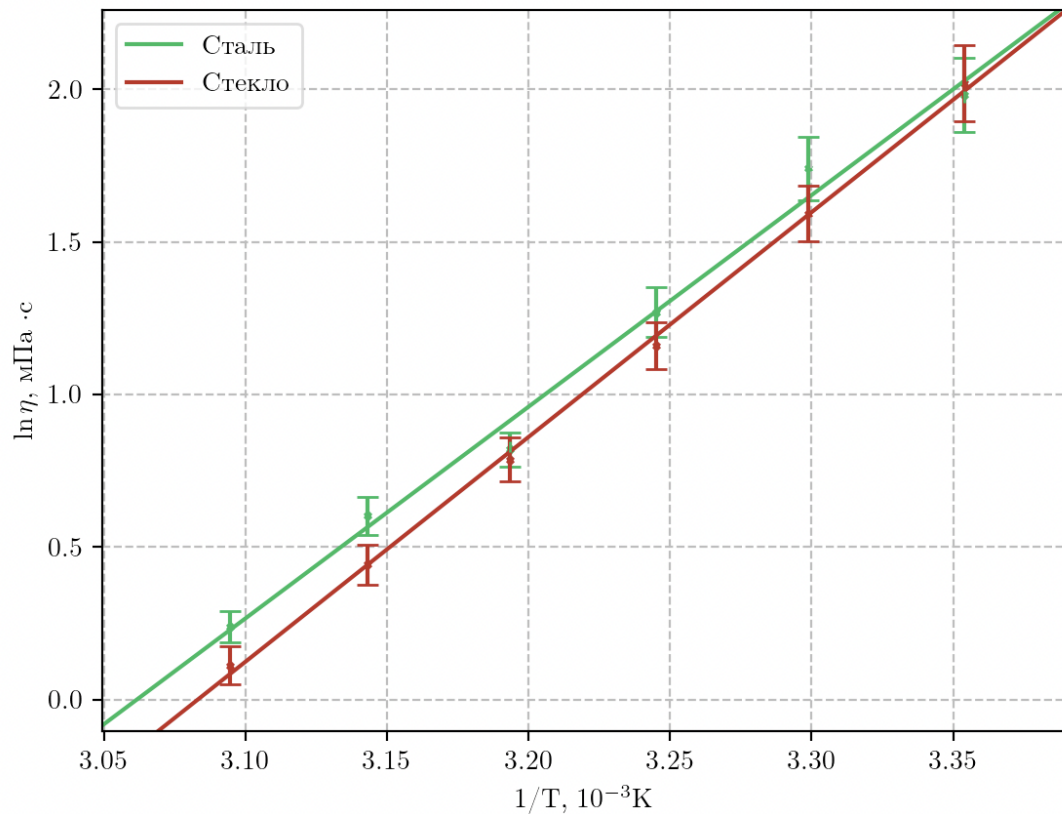


Рис. 2: Зависимость $\ln \eta(1/T)$

$T = 25.00^{\circ}C, \rho = 1.26 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t'_1, \text{ с}$	$t'_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$
1.05	24.4	24.68	24.76	24.7	24.64	734.19	8.6	0.073	0.42	1.71
1.075	24.56	24.91	24.94	24.48	24.72	772.29	9.04	0.071	0.42	1.69
0.45	25.43	25.54	25.19	25.65	25.45	734.82	8.92	0.03	0.08	0.3
0.35	40.86	41.05	41.68	40.6	41.05	716.91	8.31	0.015	0.05	0.12
$T = 30.00^{\circ}C, \rho = 1.26 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$		
1.05	17.49	17.36	17.42	519.31	6.86	0.146	0.59	3.41		
1.0	17.05	17.28	17.16	464.0	6.17	0.158	0.6	3.52		
0.45	19.49	19.8	19.64	567.17	7.42	0.051	0.1	0.51		
0.433	21.48	21.43	21.46	573.51	7.31	0.044	0.09	0.43		
$T = 35.00^{\circ}C, \rho = 1.25 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$		
1.025	10.98	10.64	10.81	309.49	5.3	0.383	0.94	8.72		
1.025	11.46	11.49	11.48	328.52	5.41	0.34	0.89	7.74		
0.45	11.97	12.01	11.99	346.69	5.69	0.135	0.16	1.35		
0.45	12.55	12.67	12.61	364.62	5.81	0.122	0.15	1.22		
$T = 40.00^{\circ}C, \rho = 1.25 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$		
1.025	8.06	8.11	8.09	213.93	4.88	0.685	1.36	16.87		
1.05	8.08	8.18	8.13	225.32	5.13	0.661	1.36	16.72		
0.35	12.34	12.6	12.47	218.12	3.55	0.161	0.16	1.25		
0.4	10.39	10.25	10.32	235.77	4.27	0.205	0.19	1.83		
$T = 45.00^{\circ}C, \rho = 1.25 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$		
1.025	6.07	5.81	5.94	157.17	4.62	1.268	1.86	31.26		
1.025	5.81	5.83	5.82	154.0	4.61	1.321	1.9	32.56		
0.425	6.65	6.74	6.7	172.67	4.29	0.46	0.29	4.34		
0.425	7.42	7.5	7.46	192.4	4.38	0.37	0.26	3.5		
$T = 50.00^{\circ}C, \rho = 1.24 \text{ г/см}^3$										
$r, \text{ мм}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\sigma_{\eta}, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{ мс}$	$S, 10^{-3} \text{ мм}$		
1.025	4.05	4.36	4.2	112.15	4.5	2.491	2.58	61.39		
1.0	4.49	4.27	4.38	111.4	4.29	2.353	2.47	56.48		
0.425	5.49	5.81	5.65	141.15	4.18	0.639	0.35	6.24		
0.35	6.67	6.52	6.6	112.39	2.92	0.57	0.3	4.55		

Таблица 1: Результаты измерений

05.04.22
W.

Угловой коэффициент α для стеклянных и стальных шариков найдём по МНК:

$$\alpha_{\text{стекло}} = 6977.5 \pm 142.5 \text{ K}, \alpha_{\text{сталь}} = 6852.4 \pm 283.7 \text{ K} \Rightarrow \alpha = 6914 \pm 316 \text{ K}$$

В таком случае энергия активации составит $W = k\alpha = (9.54 \pm 0.44) \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ ($\varepsilon \approx 5\%$).

Вывод

В ходе данной работы в большинстве опытов подтверждена справедливость формулы Стокса. Также определены время и путь релаксации, подтверждающие установление скорости шариков к началу измерений. Установлена зависимость вязкости глицерина от температуры. По значениям вязкости при малых температурах и сравнении их с табличными, можно предположить, что в работе использовался 99% водный раствор глицерина: при температуре $T = 25^\circ\text{C}$ $\eta = 772 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (для 100% раствора $\eta = 942 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), полученное значение $\eta_1 = (739 \pm 18) \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ($\varepsilon = 2\%$);

при $T = 30^\circ\text{C}$ $\eta = 510 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (для 100% $\eta = 662 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), полученное значение $\eta_2 = (531 \pm 14) \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ($\varepsilon = 3\%$).

Исходя из полученных значений установлена зависимость вязкости от температуры, и по ней найдена энергия активации глицерина $W = (9.54 \pm 0.44) \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ ($\varepsilon = 5\%$).