

Московский физико-технический институт  
Факультет молекулярной и химической физики

Лабораторная работа №2.2.6  
«Определение энергии активации по температурной  
зависимости вязкости жидкости»

*Выполнил:*  
студент 1 курса  
642 группы ФМХФ  
Демьянов Георгий  
Сергеевич

Москва 2017

## Аннотация

В этом отчёте изложены результаты выполнения лабораторной работы «Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости». С помощью термостата изменялась температура в ёмкости с глицерином. При нескольких значениях температур в ёмкость бросали шарики из стекла и жести. Измеряли время их падения, из чего находили скорость движения шариков в глицерине. Отсюда получили значение энергии активации глицерина.

**Цель работы:** расчет энергии активации глицерина.

## 1. Теоретическое введение

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.

Как уже отмечалось, 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

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

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

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

где  $\eta$  — вязкость жидкости,  $v$  — скорость шарика,  $r$  — его радиус.

При свободном падении шарика в вязкой жидкости на шарик действуют три силы: сила тяжести, архимедова сила и сила вязкости, зависящая от скорости.

Найдем 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  $V$  — объем шарика,  $\rho$  — его плотность,  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения. Решая это уравнение, найдем

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

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

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

Как видно из (4), скорость шарика экспоненциально приближается к установившейся скорости  $v_{\text{уст}}$ . Установление скорости определяется величиной  $\tau$ , имеющей размерность времени и называемой временем релаксации. Если время падения в несколько раз больше времени релаксации, процесс установления скорости можно считать закончившимся.

Измеряя на опыте установившуюся скорость падения шариков  $v_{\text{уст}}$  и величины  $r$ ,  $\rho$ ,  $\rho_{\text{ж}}$ , можно определить вязкость жидкости по формуле, следующей из (5)

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

Полезно также найти путь релаксации  $S$ , путем интегрирования (4), полагая  $v(0) = 0$ :

$$S = v_{\text{уст}}\tau(t/\tau - 1 + e^{-t/\tau}) \Rightarrow S \gg \tau v_{\text{уст}}, t \gg \tau. \quad (7)$$

Теория взята из [1] — с. 74–76.

## 2. Экспериментальная установка

Схема прибора (в разрезе) показана на рис. 1.

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии друг от друга. Верхняя метка располагаться ниже уровня жидкости с таким расчётом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения этой метки успевала установиться.

Сам сосуд В помещён в рубашку Б, омываемую водой из термостата. При работающем термостате температура воды в рубашке Б, а потому и температура жидкости 12 равна температуре воды в термостате.

Радиусы шариков измеряются горизонтальным компаратором или микроскопом.

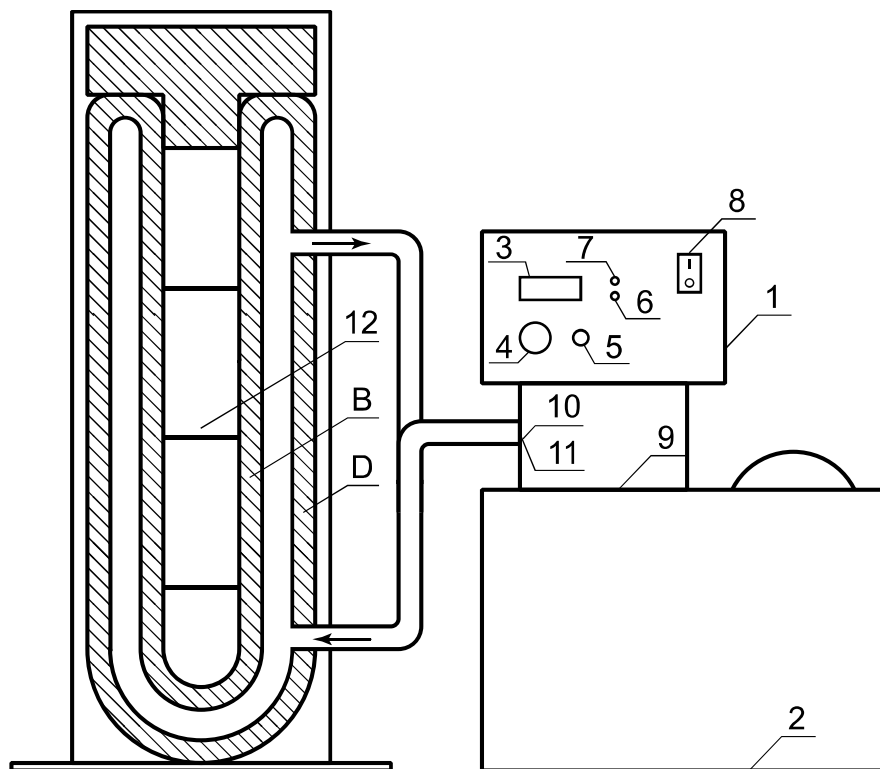
Ванна представляет собой емкость из нержавеющей стали, установленную в наружный кожух. В блоке терморегулирования расположены: насос для обеспечения перемешивания рабочей жидкости и перекачки её во внешний контур, нагреватель, датчик температуры, датчик уровня жидкости, элементы управления и индикации, необходимые для надёжной работы.

Описание взято из [1] — с. 76.

## 3. Обработка результатов измерений

### 3.1. Обработка результатов

Будем записывать температуру, которую нам показывает термостат. Также, измерим диаметр каждого шарика, запишем материал шарика. Измерим время, за которое шарик будет проходить



**Рис. 1.** Установка для определения коэффициента вязкости жидкости

- 1 — блок терморегулирования;
- 2 — ванна;
- 3 — индикаторное табло;
- 4 — ручка установки температуры;
- 5 — кнопка переключения режимов установки/контроля температуры;
- 6 — индикатор уровня жидкости;
- 7 — индикатор включения нагревателя;
- 8 — сетевой выключатель прибора;
- 9 — крышка;
- 10 — входной и выходной патрубки насоса;
- 11 — входной и выходной патрубки теплообменника
- 12 — жидкость

от одной метки на емкости с глицерином до другой. Весь эксперимент, кроме первого измерения, был отснят на камеру с частотой 60 кадров/с. С помощью графика  $\rho_{\text{ж}}(T)$  найдем значение плотности глицерина (рис. 2). Измерим расстояния между метками с помощью линейки. Значения плотности материала шарика возьмем из табличных данных.

Полученные данные занесем в таблицу 1.

Рассчитаем скорость движения шарика и её погрешность по формулам

$$v_{\text{уст}} = \frac{l}{t}, \quad \left( \frac{\sigma_{v_{\text{уст}}}}{v_{\text{уст}}} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_t}{t} \right)^2. \quad (8)$$

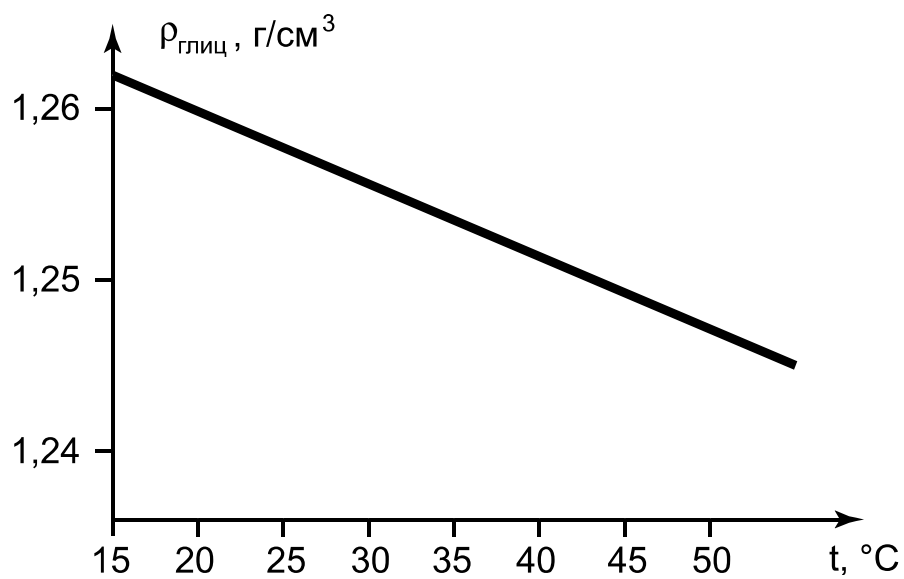
Далее, пользуясь (6), рассчитаем значения  $\eta$ , а погрешность найдем так:

$$\left( \frac{\sigma_{\eta}}{\eta} \right)^2 = 4 \left( \frac{\sigma_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\rho - \rho_{\text{ж}}}}{\rho - \rho_{\text{ж}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{v_{\text{уст}}}}{v_{\text{уст}}} \right)^2, \quad \sigma_{\rho - \rho_{\text{ж}}}^2 = \sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\rho_{\text{ж}}}^2.$$

Полученные значения внесем в таблицу 2.

№ эксп.	T, °C	$\sigma_{Tr}$ , °C	d, мм	$\sigma_{d1}$ , мм	материал	t, с	$\sigma_{t1}$ , с	$\rho_{жл}$ , г/см	$\sigma_{pжл}$ , г/см	$\rho_{матр}$ , г/см	$\sigma_{pматр}$ , г/см	l, см	$\sigma_{l1}$ , см
11	26.2	0.1	2.150	0.005	стекло	10.5	0.3	1.258	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
12	26.2	0.1	0.800	0.005	сталь	15.100	0.017	1.258	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
13	26.2	0.1	2.100	0.005	стекло	9.933	0.017	1.258	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
14	26.2	0.1	0.400	0.005	сталь	13.467	0.017	1.258	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
21	30.4	0.1	2.100	0.005	стекло	8.133	0.017	1.256	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
22	30.4	0.1	0.750	0.005	сталь	14.833	0.017	1.256	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
23	30.4	0.1	2.150	0.005	стекло	7.667	0.017	1.256	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
24	30.4	0.1	0.950	0.005	сталь	7.933	0.017	1.256	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
31	40.4	0.1	2.100	0.005	стекло	5.350	0.017	1.252	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
32	40.3	0.1	0.930	0.005	сталь	5.617	0.017	1.252	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
33	40.2	0.1	2.100	0.005	стекло	4.733	0.017	1.253	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
34	40.1	0.1	0.700	0.005	сталь	9.833	0.017	1.253	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
41	50.3	0.1	2.100	0.005	стекло	3.267	0.017	1.249	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
42	50.3	0.1	0.800	0.005	сталь	4.383	0.017	1.249	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
43	50.0	0.1	2.170	0.005	стекло	2.650	0.017	1.249	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
44	50.0	0.1	0.700	0.005	сталь	4.750	0.017	1.249	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
51	60.1	0.1	1.300	0.005	стекло	3.933	0.017	1.240	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
52	60.1	0.1	0.900	0.005	сталь	2.150	0.017	1.240	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05
53	60.1	0.1	2.150	0.005	стекло	1.780	0.017	1.240	0.005	2.5	0.1	10.00	0.05
54	59.9	0.1	0.970	0.005	сталь	1.617	0.017	1.240	0.005	7.8	0.1	10.00	0.05

Таблица 1. Табличные данные и значения, полученные при проведении эксперимента



**Рис. 2.** Зависимость плотности глицерина от температуры

№ эксп.	$v_{\text{уст}}$ см/с	$\sigma_{v_{\text{уст}}}$ см/с	$\eta$ , Па·с	$\sigma_{\eta}$ , Па·с
11	0.95	0.03	0.33	0.03
12	0.662	0.003	0.344	0.007
13	1.007	0.005	0.30	0.02
14	0.743	0.004	0.077	0.002
21	1.230	0.007	0.24	0.02
22	0.674	0.003	0.297	0.006
23	1.304	0.007	0.240	0.019
24	1.261	0.007	0.255	0.005
31	1.869	0.011	0.160	0.013
32	1.780	0.010	0.173	0.003
33	2.113	0.013	0.142	0.011
34	1.017	0.005	0.172	0.004
41	3.06	0.02	0.098	0.008
42	2.281	0.014	0.100	0.002
43	3.77	0.03	0.085	0.007
44	2.105	0.013	0.0830	0.0018
51	2.542	0.017	0.046	0.004
52	4.65	0.04	0.0622	0.0013
53	5.62	0.06	0.056	0.005
54	6.19	0.07	0.0543	0.0012

**Таблица 2.** Значения  $v_{\text{уст}}$  и  $\eta$

№ эксп.	Re	$\tau, \cdot 10^{-3} \text{ с}$	$S, \cdot 10^{-3} \text{ м}$
11	0.039	1.95	0.02
12	0.010	0.81	0.01
13	0.045	2.07	0.02
14	0.024	0.90	0.01
21	0.067	2.52	0.03
22	0.011	0.82	0.01
23	0.073	2.68	0.03
24	0.029	1.53	0.02
31	0.15	3.82	0.07
32	0.060	2.16	0.04
33	0.20	4.32	0.09
34	0.026	1.24	0.01
41	0.41	6.24	0.19
42	0.11	2.77	0.06
43	0.60	7.69	0.29
44	0.11	2.56	0.05
51	0.45	5.15	0.13
52	0.42	5.64	0.26
53	1.3	11.37	0.64
54	0.68	7.50	0.46

**Таблица 3.** Значения  $Re$ ,  $\tau$  и  $S$

Оценим значения числа  $Re = \frac{\rho_{ж} v r}{\eta}$ ,  $\tau$ ,  $S$  по формулам (5), (7) и занесем в таблицу 3.

Значения чисел  $Re \sim 0.5$ . Это свидетельствует о ламинарном течении, что действительно позволяет применить формулу Стокса. Малость значений времени и пути релаксации говорит о справедливости наших приближений, т.е. что к моменту прохождения метки старта скорость шарика приобретает установившийся характер.

Нанесём на график экспериментальные точки  $\ln \eta(\frac{1}{T})$  и проведём по ним прямую методом наименьших квадратов (МНК, рис. 3). Тогда коэффициент наклона прямой есть  $W/k$ .

Эксперимент 14 пришлось отбросить, т.к. значение слишком сильно отличается от остальных.

Из МНК, получим:

$$\frac{W}{k} = (532 \pm 6) \cdot 10 \text{ К} \Rightarrow W = (7.34 \pm 0.08) \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \underline{0.458 \pm 0.005 \text{ эВ}}. \quad (9)$$

### 3.2. Сравнение значения с другими данными

В работе «Измерение вязкости жидкостей по затуханию колебаний камертона» [2] было получено следующее значение энергии активации:

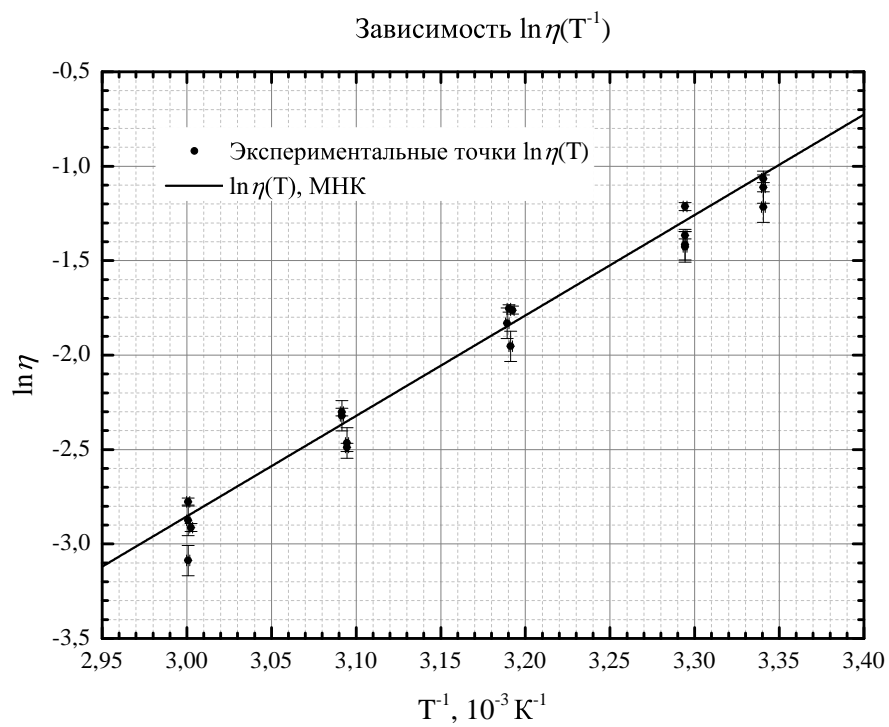
$$W = (7.247 \pm 0.017) \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = (0.4529 \pm 0.0011) \text{ эВ}.$$

Полученное в данной лабораторной работе значение находится в достаточном согласии с этим значением (отличие на 1.1 %).

В справочнике Григорьева «Физические величины» (таблица 16.17, [3]) приведены значения вязкости глицерина (таблица 4), откуда аналогично тому, что выполнялось в этой работе, можно получить значение энергии активации, равное:

$$W = (0.55 \pm 0.02) \text{ эВ},$$

которое достаточно сильно отличается от полученного в работе (на 20%). Это объясняется тем, что глицерин — гигроскопичное вещество, и в нашем случае он не был абсолютно чистый.



**Рис. 3.** Зависимость  $\ln \eta(\frac{1}{T})$

Т, К	$\eta$ , Па·с
293	1.48
303	0.6
316	0.33
323	0.18
333	0.102
343	0.059

**Таблица 4.** Табличные значения  $\eta(T)$



## 4. Заключение

В данной работе рассматривалось движение шарика в глицерине.

После измерения скорости движения шарика, было получено значение энергии активации глицерина, равное  $W = (0.458 \pm 0.005)$  эВ.

Это значение находится в допустимом согласовании с другими экспериментальными и табличными данными.

## Список литературы

- [1] Гладун А.Д. Лабораторный практикум по общей физике. Том 1. Термодинамика и молекулярная физика. Москва: МФТИ, 2012.
- [2] Никалевич Агафонов Иван. Измерение вязкости жидкостей по затуханию колебаний камертона.
- [3] Григорьев И.С. Мейлихов Е.З. Физические величины. 1991.