

Отчет о выполнении лабораторной работы 2.2.6
Определение энергии активации по температурной
зависимости вязкости жидкости

Варламов Антоний, группа Б02-928

20 февраля 2020 г.

Цель работы: Измерение скорости падения шариков при разной температуре жидкости; Вычисление вязкости жидкости по закону Стокса и расчет энергии активации.

В работе используются: Стеклоанный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин), термостат, секундомер, горизонтальный компаратор, микроскоп, мелкие шарики.

1 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 :

$$\eta \approx Ae^{\frac{W}{kT}}$$

Из формулы (1) следует, что при повышении температуры вязкость должна резко понижаться.

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

$$F = 6\pi\eta r v,$$

где η - вязкость жидкости, v – скорость шарика, r – радиус шарика.
Рассматривая свободное падение шарика в вязкой жидкости, получаем уравнение:

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

Решая данное уравнение относительно скорости, получаем:

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

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

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

2 Экспериментальная установка

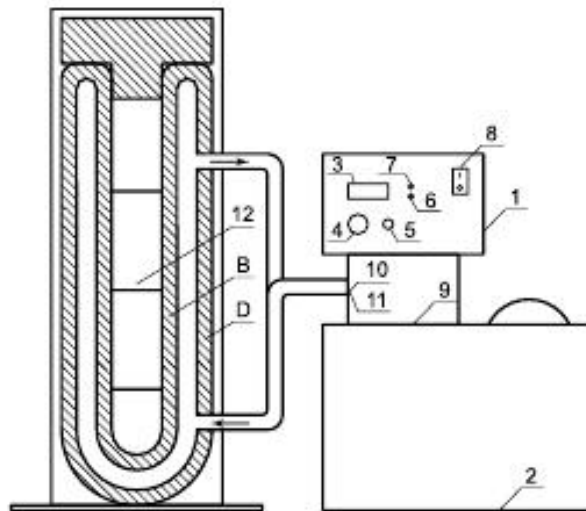


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

3 Экспериментальные данные

Перед проведение эксперимента проведем измерения шариков, используемых в данном эксперименте.

Измерение диаметров шариков будем проводить с помощью микроскопа для двух групп шаров: стеклянных и металлических. Результаты занесем в таблицу (1)

№ измерения	Диаметр стеклянного шарика, дел	Диаметр металлического шарика, дел
1	80	37
2	80	42
3	78	41
4	83	43
5	82	40
6	78	40
7	83	45
8	85	43
9	83	35
10	83	35
11	82	44
12	84	37
13	84	45
14	80	43
15	85	41
16	85	44
17	85	40

Таблица 1: Результаты измерения диаметров шариков

Определим средние значения диаметров и погрешности их прямого измерения.

$$\overline{d_{\text{стекл}}} = 82; \quad \overline{d_{\text{металл}}} = 41$$

$$\sigma_{\text{стекл}} = 2,3; \quad \sigma_{\text{металл}} = 3,3$$

Как видно из (3), случайная погрешность измерения диаметра шариков сильно больше систематической ошибки измерительного прибора, поэтому полная погрешность измерения диаметра \approx случайной погрешности.

Затем проведем несколько серий измерений. Для каждой температуры проведем 8 измерений: по 4 для каждого типа шаров. результаты занесем в таблицы (2, 3). Кроме того, в данные таблицы занесем также значения скоростей движения шаров, учитывая, что за измеренное время шары проходят расстояние $s = 9,9$ см. Определим среднюю скорость, а также погрешность косвенного измерения средней скорости. Полученные данные будем использовать при расчете вязкости глицерина.

$t_1, \text{ c}$	$t_2, \text{ c}$	$v, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\overline{v}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\sigma_{\overline{v}}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$t_1, \text{ c}$	$t_2, \text{ c}$	$v, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\overline{v}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\sigma_{\overline{v}}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$
$t = 20^{\circ}\text{C}$					$t = 45^{\circ}\text{C}$				
16,05	16,24	0,613	0,61	0,01	3,39	3,48	2,882	3,04	0,19
16,06	16,60	0,606			3,46	3,27	2,942		
16,79	16,49	0,595			3,32	3,26	3,009		
16,16	16,52	0,606			3,05	2,93	3,311		
$t = 27,5^{\circ}\text{C}$					$t = 50^{\circ}\text{C}$				
11,16	11,05	0,891	0,89	0,04	2,56	2,79	3,701	3,80	0,07
11,63	11,03	0,874			2,55	2,64	3,815		
10,16	10,53	0,957			2,56	2,59	3,845		
10,66	10,29	0,945			2,52	2,63	3,845		
$t = 35^{\circ}\text{C}$					$t = 55^{\circ}\text{C}$				
7,97	7,91	1,247	1,29	0,04	1,86	1,93	5,224	5,13	0,08
7,70	7,84	1,274			1,84	1,98	5,183		
7,59	7,39	1,322			1,93	1,98	5,064		
7,54	7,34	1,331			2,01	1,90	5,064		
$t = 40^{\circ}\text{C}$					$t = 60^{\circ}\text{C}$				
4,52	4,43	2,212	2,24	0,03	1,81	1,66	5,706	5,82	0,09
4,50	4,45	2,212			1,71	1,70	5,806		
4,29	4,43	2,271			1,70	1,68	5,858		
4,39	4,34	2,268			1,65	1,69	5,928		

Таблица 2: Результаты измерения времени прохождения стеклянных шариков по сосуду с глицерином при различной температуре.

$t_1, \text{ c}$	$t_2, \text{ c}$	$v, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\overline{v}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\sigma_{\overline{v}}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$t_1, \text{ c}$	$t_2, \text{ c}$	$v, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\overline{v}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$	$\sigma_{\overline{v}}, \frac{\text{CM}}{\text{c}}$
$t = 20^{\circ}\text{C}$					$t = 45^{\circ}\text{C}$				
20,44	20,48	0,48	0,48	0,04	3,84	3,45	2,72	2,89	0,21
18,28	17,31	0,56			3,53	3,58	2,78		
18,72	18,18	0,54			3,11	3,10	3,19		
20,19	20,37	0,49			3,32	3,57	2,87		
$t = 27,5^{\circ}\text{C}$					$t = 50^{\circ}\text{C}$				
11,02	10,82	0,91	0,91	0,06	2,58	2,89	3,62	3,90	0,24
11,92	11,86	0,83			2,63	2,56	3,82		
11,90	12,01	0,83			2,46	2,55	3,95		
10,45	10,55	0,94			2,28	2,44	4,19		
$t = 35^{\circ}\text{C}$					$t = 55^{\circ}\text{C}$				
10,45	10,55	0,94	1,05	0,23	1,89	2,11	4,95	4,99	0,50
10,96	10,84	0,91			2,03	2,10	4,79		
10,29	10,20	0,97			1,69	1,79	5,69		
7,08	7,17	1,39			2,27	2,11	4,52		
$t = 40^{\circ}\text{C}$					$t = 60^{\circ}\text{C}$				
5,08	4,84	2,00	2,06	0,14	1,84	2,08	5,05	4,99	0,07
4,39	4,62	2,20			1,92	2,07	4,96		
4,62	4,57	2,15			1,97	1,95	5,05		
5,18	5,23	1,90			1,98	2,05	4,91		

Таблица 3: Результаты измерения времени прохождения металлических шариков по сосуду с глицерином при различной температуре.

Определим значения вязкости глицерина в зависимости от температуры, а также тела, которое движется внутри глицерина. В теории, мы должны получить идентичные данные, так как вязкость не зависит от материала тела, движущегося в жидкости.

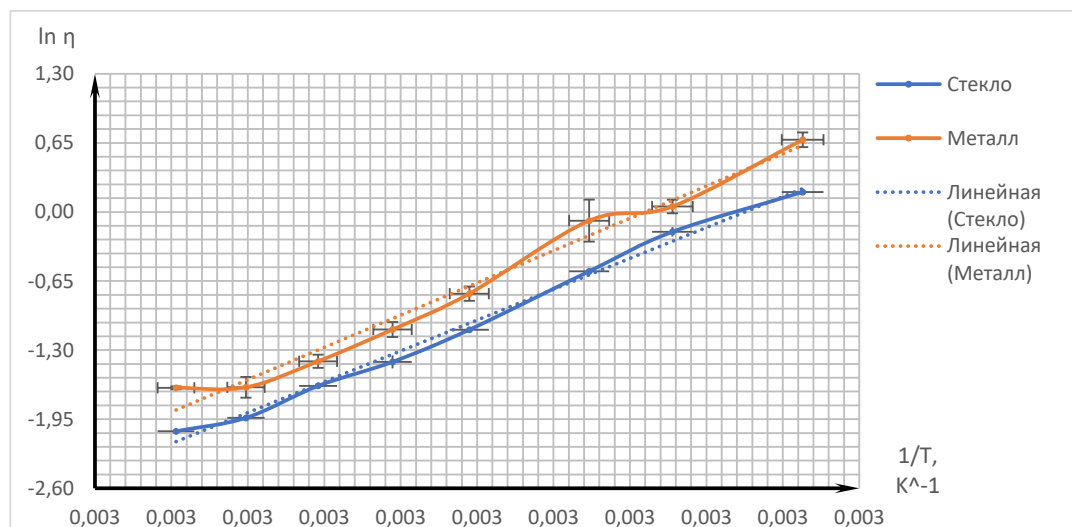


Рис. 2: Графики зависимости логарифма вязкости от обратной температуры для двух серий измерений

Как видно из графиков, результаты, полученные с помощью металлических и стеклянных шаров дают одинаковые значения энергии активации, так как линейные приближения имеют одинаковый угол наклона, но стеклянные шарики позволяют вычислить вязкость воздуха точнее металлических. Для дальнейших расчетов будем использовать результаты, полученные на стеклянных шариках.

Используя значения углового коэффициента прямых, полученные с помощью МНК, определим значения энергии активации:

$$W = kT \cdot \alpha$$

$$W = 7,95 \cdot 10^{-20}$$

Пользуясь МНК, также определяем погрешность определенной величины:

$$\sigma_W = 2,12 \cdot 10^{-21}$$

В итоге, полученное значение: $W = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-20} \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$;

Перейдем к определению числа Рейнольдса – Re , для каждой серии опытов. Для этого вычислим вязкость глицерина при различных температурах. Данные (вместе со справочными) занесем в таблицу (4).

Температура °C	20	27,5	35	40	45	50	55	60
η , Па · с	1207	830	572	330	244	195	144	127

Таблица 4: Значения вязкости глицерина для различных температур.

Результаты определения чисел Рейнольдса занесем в таблицу (5).

Кроме того, полезно также определить значения времени релаксации шариков при движении в глицерине. Данные занесем в таблицу (6)

№ серии	$Re_{\text{стекло}}$	$Re_{\text{металл}}$
1	0,01	0,01
2	0,02	0,02
3	0,05	0,04
4	0,14	0,13
5	0,26	0,24
6	0,40	0,41
7	0,73	0,71
8	0,94	0,81

Таблица 5: Значения чисел Рейнольдса для различных серий измерений

№ серии	$\tau_{\text{стекло}}, \text{с}$	$\tau_{\text{металл}}, \text{с}$
1	0,55	0,78
2	0,79	1,14
3	1,15	1,65
4	2,00	2,86
5	2,70	3,86
6	3,39	4,84
7	4,57	6,54
8	5,19	7,42

Таблица 6: Значения времени релаксации для различных серий измерений

4 Заключение

1. В ходе выполнения работы была подтверждена теория силы вязкого трения, определяемая по формуле Стокса.
2. Получены значения вязкости исследуемого образца (Глицерина) в зависимости от температуры. Данные значения хорошо согласуются с известными данными. Погрешность определения вязкости глицерина не превышает 30% (Наибольшая относительная погрешность определения вязкости - при температуре 60 °C, сразу по нескольким причинам:

Во-первых, как видно из таблицы (5), при данной температуре уже нельзя считать движение шариков ламинарным.

Во-вторых, само значение вязкости уже на порядок меньше, чем, например, при температуре 20 °C, при практически не отличающейся абсолютной погрешности.

В-третьих, большую погрешность в определение вязкости внесли металлические шарики, так как большое количество металлических шариков представляли несферические тела, на поверхности которых имелись выступы и раковины (Данный факт приводил к прилипанию пузырей воздуха к поверхности шарика, что существенно влияло на скорость движения шарика). Кроме того, относительно большую погрешность дало измерение времени движения, так как скорость была довольно большой, при малом значении вязкости.

Кроме того, самое большое значение абсолютной погрешности измерения вязкости в серии с температурой 35°C, что объясняется ошибкой измерения.

3. Полученные значения чисел Рейнольдса позволяют утверждать, что при достаточно большой вязкости жидкости и малых геометрических размерах тела движение

можно считать ламинарным.

4. Полученные значения времени релаксации позволяют утверждать, что измеренное время прохождения конечного участка пути достоверны, так как время движения тел до начала данного участка больше, чем время релаксации.
5. Несмотря на довольно большую погрешность итогового значения вязкости, геометрические размеры сосуда не оказали значимого влияния на движение шариков.
6. Наибольшие вклады в погрешности косвенных измерений внесли погрешности измерения времени движения шариков (случайные ошибки).