

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

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

Серебренников Даниил  
Группа Б02-826

Долгопрудный, 2019 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 Теоретическая часть

## 1.1 Энергия активации

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 ( $\sim 10^{12}$  Гц), и с амплитудой, определяемой размерами объема, предоставленного ей соседними молекулами. 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.

Для того чтобы перейти в новое состояние, молекула должна преодолеть участие 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

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

## 1.2 Формула Стокса

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

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

## 1.3 Расчетная формула вязкости

Измеряя на опыте установившуюся скорость падения шариков  $v$  и величины  $r$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$ , можно определить вязкость жидкости по формуле

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2\frac{\rho - \rho_0}{v} \quad (3)$$

## 2 Экспериментальная установка

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). Диаметр сосуда  $\approx 3$  см, длина  $\approx 40$  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. Изменяя расстояние между метками с помощью линейки, а время падения с помощью секундомера, определяют скорость шарика вуст. 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.

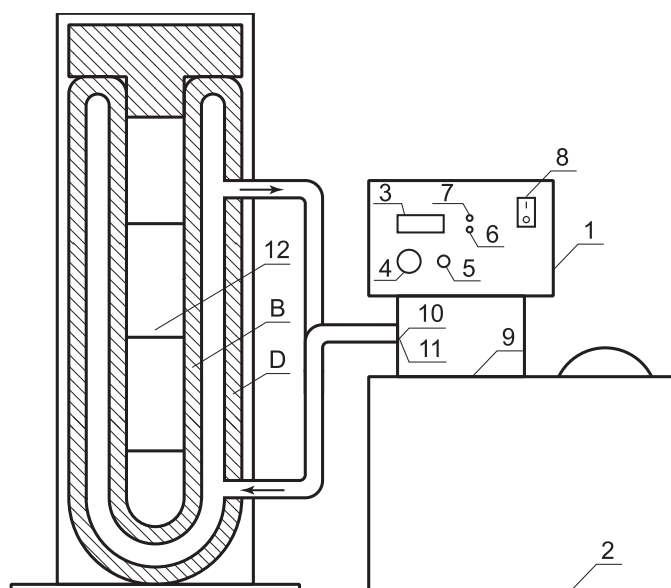


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости.

## 3 Модель эксперимента

1. Отберем 20 шариков различного диаметра и с помощью микроскопа измерим их средние диаметры
2. Измерим установившиеся скорости падения шариков и вычислим вязкость по формуле (3). Измерения выполним для 7 значений температуры в интервале от 25-55°C.
3. Для каждого из опытов вычислим значение числа Рейнольдса  $Re$ , оценим время релаксации  $\tau$  и путь релаксации  $S$ . Проанализируем применимость формулы Стокса в каждом эксперименте.
4. Построим график зависимости  $\ln \eta / \eta_0$  от  $1/T$ .
5. По угловому коэффициенту прямой  $\ln \eta / \eta_0(1/T)$  определим энергию активации  $W$ .
6. Оценим погрешность полученных результатов.

## 4 Экспериментальные данные

В таблице 1 приведены параметры установки и случайные ошибки измерения величин, определяемых в ходе эксперимента.

Таблица 1: Некоторые параметры установки и ошибки измерений.

	Температура $T$ , К	Диаметр шарика $d$ , мм	Плотность глицерина $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность стекла $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность стали $\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>
Величина	293,0	1,50	1260	2500	7800
Погрешность	0,1	0,05	0	0	0
$\varepsilon$ , %	0,03	3,3	0	0	0

В следующих таблицах 2 - 3 представлены результаты измерений и вычислений физических величин, значения которых необходимы для анализа применимости формулы Стокса в каждом эксперименте.

Таблица 2: Стекланный шарик.

$T$ , К	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$d$ , мм	$\eta$ , мПа·с	$\sigma_\eta$ , мПа·с	$Re$	$\tau$ , мс	$S$ , мм
297,8	26,16	52,72	2,06	770	40	0,0063	0,8	2,9
303,3	23,06	46	2,06	660	30	0,0085	0,94	3,8
308,2	17,69	34,4	2,08	490	20	0,0159	1,2	7,3
313,2	11,68	23,25	2,04	326	16	0,0340	1,8	15
318,2	9,56	17,06	2,2	245	11	0,0754	2,7	36
328	4,38	8,74	2,1	129	6	0,2356	4,7	108

Таблица 3: Железный шарик.

$T$ , К	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$d$ , мм	$\eta$ , мПа·с	$\sigma_\eta$ , мПа·с	$Re$	$\tau$ , мс	$S$ , мм
297,9	29,52	59,91	0,84	770	90	0,0022	0,4	1,3
303,3	22,08	43,94	0,92	660	70	0,0040	0,6	2,5
308,2	18,74	37,2	0,84	470	60	0,0061	7	3,5
313,2	12,43	25,36	0,9	380	40	0,0116	0,9	7,1
318,1	7,73	15,27	0,9	220	20	0,0343	1,6	21
323,1	5,72	11,3	0,88	155	18	0,0642	2,2	38
328,0	4,07	8,26	0,9	122	14	0,1120	2,9	68

На рис. 2 изображен график зависимости  $\ln \eta / \eta_0$  от  $1/T$ , где  $\eta_0 = 1480$  мПа·с - табличное значение вязкости глицерина при  $T = 293$  К.

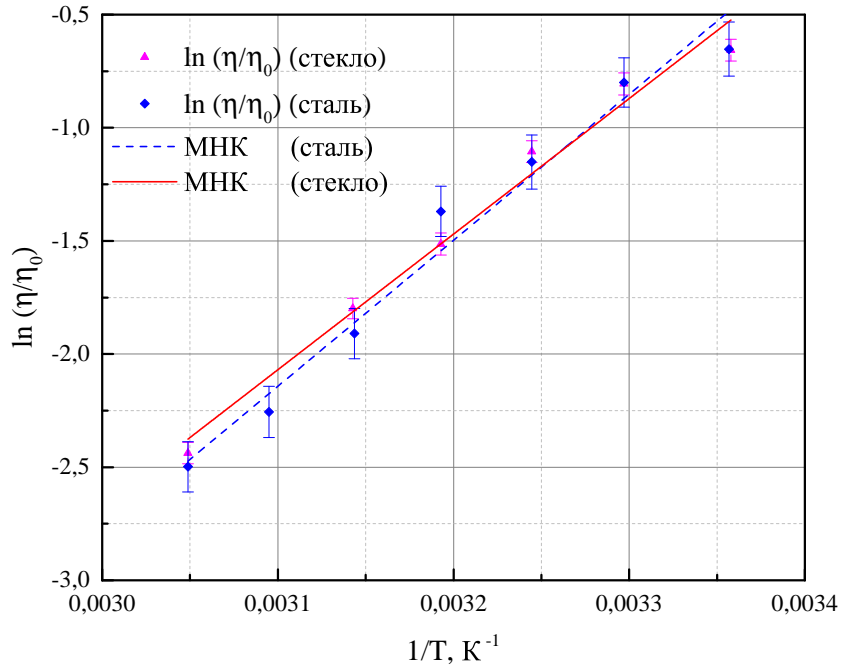


Рис. 2: Зависимость  $\ln \eta/\eta_0$  от  $1/T$ .

Наклоном графика (рис. 2) будет являться величина  $W/k$ . Значения экспериментальных точек и значение энергии активации представлены в таблицах 4 - 5.

Таблица 4: Стекланный шарик.

$1/T, K^{-1}$	$\ln \eta/\eta_0$	$\sigma_{\ln \eta/\eta_0}$	$W/k, K$	$W, зДж$	$\sigma_W, зДж$
0,00336	-0,66	0,05	6000	83	5
0,0033	-0,81	0,05			
0,00324	-1,11	0,05			
0,00319	-1,51	0,05			
0,00314	-1,80	0,05			
0,00305	-2,44	0,05			

Таблица 5: Железный шарик.

$1/T, K^{-1}$	$\ln \eta/\eta_0$	$\sigma_{\ln \eta/\eta_0}$	$W/k, K$	$W, зДж$	$\sigma_W, зДж$
0,00336	-0,65	0,12	6400	89	7
0,0033	-0,80	0,11			
0,00324	-1,15	0,12			
0,00319	-1,37	0,11			
0,00314	-1,91	0,11			
0,0031	-2,26	0,11			
0,00305	-2,50	0,11			

## 5 Обсуждение результатов

Обсуждение результатов хотелось бы начать с анализа формулы Стокса. В каждом опыте значение числа Рейнольдса  $Re$  было очень маленьким (меньше 0.5), поэтому можно считать, что обтекание шарика жидкостью действительно имело ламинарный характер и формула Стокса справедлива в данной лабораторной работе. Более того, время релаксации  $\tau < t_1$  и путь релаксации  $S < l$  в каждом из опытов, поэтому от второй до третьей отметки шарики однозначно двигались с установившейся скоростью. Значения вязкости в каждом из опытов или совпадают с табличными значениями в пределах погрешности, или незначительно отличаются. При  $T = 298\text{K}$  вязкость 99% водного раствора глицерина  $\eta = 772 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , а при  $T = 303\text{K}$  вязкость 100% водного раствора глицерина  $\eta = 662 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , исходя из этих данных, можно заключить, что у исследуемой нами жидкости весовой процент глицерина равен 99 - 100%.

Наибольший интерес представляет собой анализ конечного результата энергии активации  $W$  - энергии, приходящейся на одну молекулу глицерина для преодоления потенциального барьера, препятствующего занять «соседнее положение равновесия». Рассчитаем энергию, приходящую на один моль глицерина  $w = WN_A$ . Для расчета воспользуемся значением энергии активации, полученным при анализе графика зависимости  $\ln \eta/\eta_0$  от  $1/T$  для стальных шариков  $w \approx 54 \text{ кДж/моль}$ . Можно предположить, что перемещение молекулы в «другую» потенциальную яму может произойти благодаря разрыву химических связей с соседними молекулами. Глицерин  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$  – простейший представитель трёхатомных спиртов, в которых естественным образом возникают межмолекулярные водородные связи. Действительно, следствием полярности связи  $\text{O}-\text{H}$  и наличия неподеленных электронных пар на атоме кислорода является способность гидроксосоединений к образованию водородных связей. Среднее табличное значение энергии водородной связи  $\text{O}\cdots\text{H}$   $w_0 = 20 \text{ кДж/моль}$ . Грубой оценкой  $w/w_0$  получается, что в среднем одна молекула глицерина образует 3 водородные связи. Однако, рассматривая пространственную структуру молекулы глицерина, можно сказать, что она может образовать больше 3 водородных связей. Является ли наше предположение о том, на что идёт энергия активации ошибочным? Конечно, нет. Ведь можно ожидать, что энергия активации молекулы близка к энергии кипения жидкости, приходящейся на одну молекулу, которая однозначно связана с разрывом водородных связей. Табличное значение  $\Delta H = 61 \text{ кДж/моль}$ , откуда следует, что на 1 молекулу глицерина в среднем приходится 3 водородные связи.

## Выводы

- Проверили справедливость закона Стокса в условиях эксперимента.
- Вычислили вязкость исследуемой жидкости по закону Стокса, например при  $T = 298 \text{ K}$   $\eta = (770 \pm 40) \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , что соответствует табличному значению 99% раствора глицерина.
- Вычислили энергию активации глицерина  $W = (89 \pm 7) \text{ зДж}$ .
- Оценили сколько в среднем водородных связей приходится на одну молекулу глицерина – 3.