

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

Мухаметзянов Дамир, Лангман Александр

15 февраля 2023 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

Для того чтобы перейти в новое состояние, молекула жидкости 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. Температурная зависимость вязкости жидкости при достаточно грубых предположениях можно описать формулой

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

Из формулы (1) следует, что существует линейная зависимость между величинами $\ln \eta$ и $1/T$, и энергию активации можно найти по формуле

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

1.2 Измерение вязкости

По формуле Стокса, если шарик радиусом r и со скоростью v движется в среде с вязкостью η , и при этом не наблюдаются турбулентных явлений, тормозящую силу можно найти по формуле (3)

$$F = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

Для измерения вязкости жидкости рассмотрим свободное падение шарика в жидкости. При медленных скоростях на шарик действуют силы Архимеда и Стокса, выражения для которых мы знаем. Отсюда находим выражения для установившейся скорости шарика и вязкости жидкости

$$v_{\text{уст}} = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta} \quad (4)$$

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

Как видим, измерив установившуюся скорость шарика и параметры системы можно получить вязкость по формуле (5).

1.3 Экспериментальная установка

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд В, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин). Диаметр сосуда ≈ 3 см, длина ≈ 25 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, h время падения определяют установившуюся скорость шарика $v_{\text{уст}}$. Сам сосуд В помещен в рубашку Д, омываемую водой из термостата. При работающем термостате температура воды в рубашке Д, 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.

2 Ход работы

2.1 Подготовительные работы

Для начала отбираем 20 шариков, и измеряем их диаметры. Диаметры измеряем в трех случайных направлениях и усредняем. Это делается по той причине, что некоторые шарики (в частности металлические) имеют неидеальную геометрию. Эти измерения слабо отличались и в таблицу сразу заносились данные, усредненные в уме. Погрешности измерения диаметров $\sigma_d = 0.05$ мм. Плотности шариков в эксперименте

$$\begin{aligned} \rho_{\text{стекло}} &= 2.5 \text{ г/см}^3 \\ \rho_{\text{металл}} &= 7.8 \text{ г/см}^3 \end{aligned}$$

№	$\langle d \rangle$ мм	№	$\langle d \rangle$ мм
s1	2	m1	0.75
s2	2	m2	0.85
s3	2	m3	1
s4	2.1	m4	0.9
s5	2	m5	0.75
s6	2.05	m6	0.775
s7	2.1	m7	0.8
s8	2.2	m8	0.75
s9	2.1	m9	0.95
s10	2.1	m10	0.75

Таблица 1: Измеренные диаметры шариков. S - стеклянные, m - металлические

Измеряем длины частей цилиндра установки

$$l_1 = l_2 = (10 \pm 0.1)\text{см}$$

2.2 Измерение установившихся скоростей

Мы знаем путь, который проходит шарик от одной отметки цилиндра к другой. Осталось измерить время прохождения между этими отметками для получения скорости. Анализируя полученные значения получаем следующие данные (см. таблицу 2). Как видим скорости t_1 и t_2 всегда близки. Отсюда можно предположить что на рассматриваемых участках скорость не меняется. В дальнейшем будем считать это предположение справедливым, которое в дальнейшем подтверждается малостью времени и пути релаксации.

Для каждого измерения считаем v , η , Re , τ , S где v это скорость шарика на участке 1+2, τ это время релаксации (см. формулу 6), а $S = v\tau$ это путь релаксации.

$$\tau = \frac{2r^2\rho}{9\eta} \quad (6)$$

Плотность жидкости берем из графика 2

Данные всех расчетов приведены в таблице 3

№	$T, ^\circ C$	t_1	t_2	№	$T, ^\circ C$	t_1	t_2
s1	20	38:40	1:17:13	m1	20	54:30	1:50:64
s2	20	39:08	1:18:43	m2	20	40:53	1:21:92
s3	30	20:97	41:36	m3	30	18:91	38:08
s4	30	20:25	39:95	m4	30	20:75	41:37
s5	40	10:96	22:17	m5	40	12:04	25:00
s6	40	10:72	21:96	m6	40	13:78	27:37
s7	50	5:93	11:81	m7	50	8:97	17:97
s8	50	5:26	10:94	m8	50	8:87	17:72
s9	60	3:13	6:16	m9	60	3:55	6:65
s10	60	3:05	5:88	m10	60	4:71	9:53

Таблица 2: Измеренные времена падения шариков.

Как видим, времена и пути релаксации очень малые величины, поэтому предположение что установившейся скорость достигается на участках 1 и 2 оправдано. Как видим, числа Рейнольдса в основном меньше 1. Можно предположить что формула Стокса работает, но окончательный вердикт вынесет график зависимости $\ln(\eta)(1/T)$. Собственно построим график этой зависимости.

Построив графики и аппроксимировав точки прямой линей методом минимума хи квадрат получаем следующие данные (см. графики в конце)

Для стеклянных шариков

$$W/k = (5610 \pm 43)K$$

$$\bar{\chi}_{\text{стекло}} = 7.6$$

Для металлических шариков

$$W/k = (5610 \pm 34)K$$

$$\bar{\chi}_{\text{металл}} = 6$$

Для всех шариков вместе

$$W/k = (5488 \pm 63)K$$

$$\bar{\chi}_{\text{смеш}} = 11.47$$

Так как у графика со всеми шариками $\bar{\chi}$ большой, то ее в счет мы не возьмем. Так как у стеклянных шариков ошибки немного занижены ($\bar{\chi} =$

№	$T, ^\circ C$	$v, \text{см/с}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{мс}$	$S, \mu\text{м}$
s1	20	0.26	417	0.02	0.53	0.01
s2	20	0.26	424	0.02	0.52	0.01
s3	30	0.48	224	0.08	0.99	0.05
s4	30	0.51	233	0.08	1.05	0.05
s5	40	0.9	121	0.28	1.84	0.17
s6	40	0.95	120	0.30	1.94	0.19
s7	50	1.7	71	0.89	3.43	0.58
s8	50	1.83	72	0.94	3.72	0.68
s9	60	3.25	37	3.24	6.57	2.13
s10	60	3.4	36	3.56	6.89	2.34
m1	20	0.18	443	0.02	0.07	0.001
m2	20	0.24	422	0.02	0.09	0.002
m3	30	0.53	271	0.07	0.20	0.011
m4	30	0.48	239	0.08	0.19	0.009
m5	40	0.8	100	0.30	0.31	0.025
m6	40	0.73	110	0.25	0.28	0.021
m7	50	1.11	82	0.50	0.43	0.048
m8	50	1.12	71	0.59	0.44	0.05
m9	60	2.07	62	1.24	0.81	0.168
m10	60	2.1	38	2.04	0.82	0.17

Таблица 3: Значения вязкостей в экспериментах

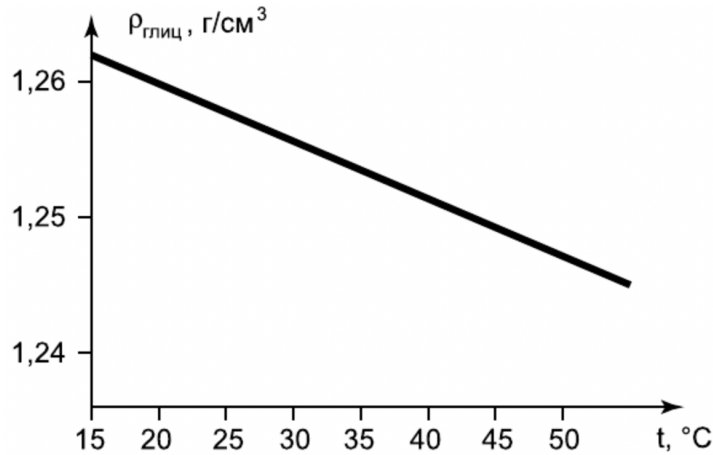


Рис. 2: Плотность глицерина при различных температурах.

7.6), то учитывая близость значений W для металлических и стеклянных шариков возьмем W как среднее этих двух. Получаем ответ

$$W/k = (5610 \pm 43)\text{K} \quad (7)$$

3 Обсуждение результатов

Сравним наши результаты с более точными результатами^[1]. На графике (3) видно, что значение вязкостей заметно отличаются при низких температурах, при которых наш метод работает лучше всего. Различие можно объяснить различием состава глицерина и, возможно, неравномерностью нагрева в нашей установке, т.к. при низких температурах вязкость меняется резко, и неравномерная температура может серьезно повлиять на среднюю вязкость.

На графике (4), что связь между $\ln(\eta)$ и $1/T$ линейная лишь в некотором приближении. Если попытаться аппроксимировать точки линейей методом хи квадрат, то для энергии активации получаем $W/k = (6517 \pm 2)\text{K}$, $\bar{\chi} = 59.0$. Наша энергия активации отличается от последней на $\varepsilon = 13\%$, что так же можно объяснить предыдущими аргументами. Значение $\bar{\chi}$ наводит на то, что линейная модель не описывает данную зависимость.

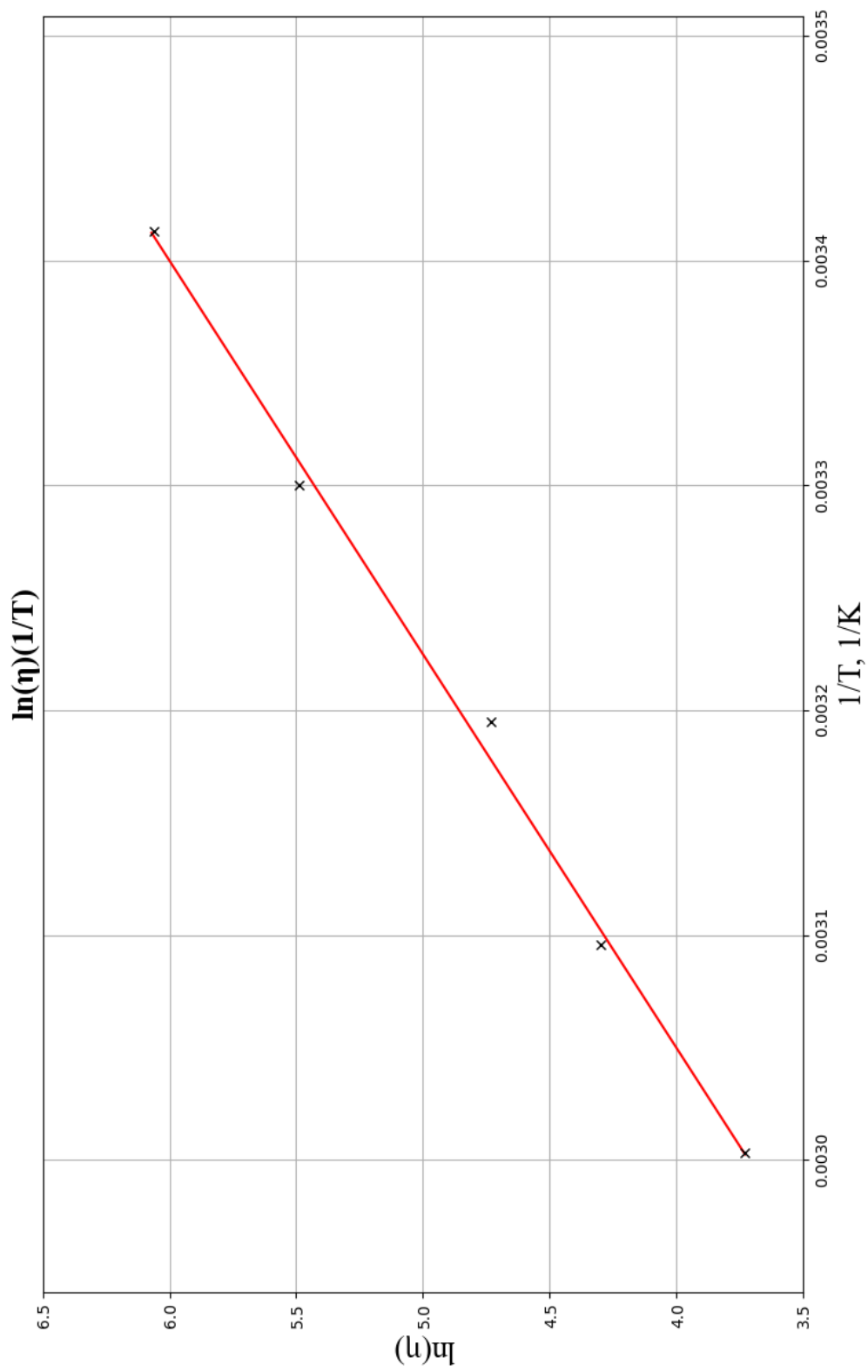


Рис. 3: Линеаризованный график для данных из работы [1]

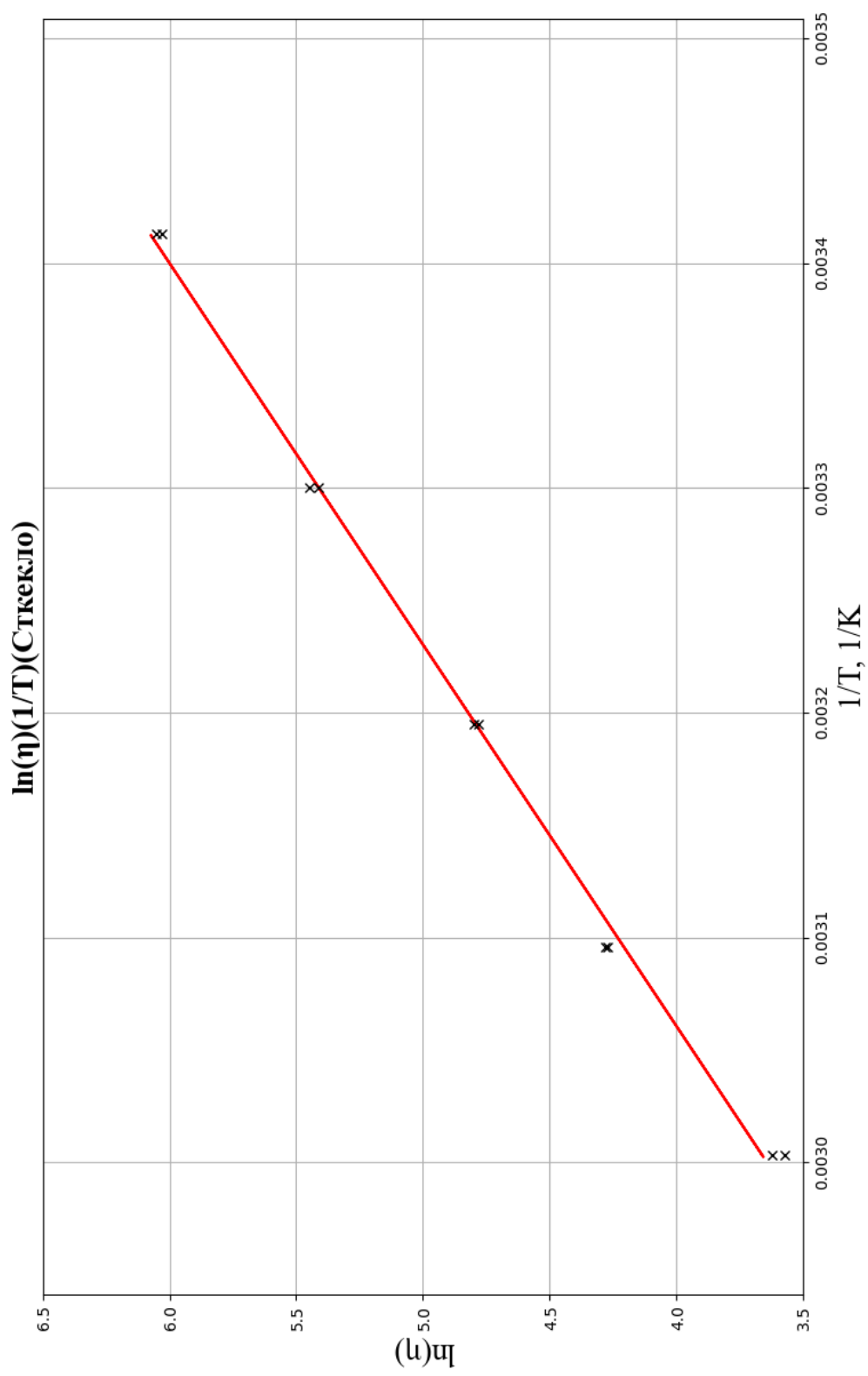


Рис. 4: График со стеклянными шариками

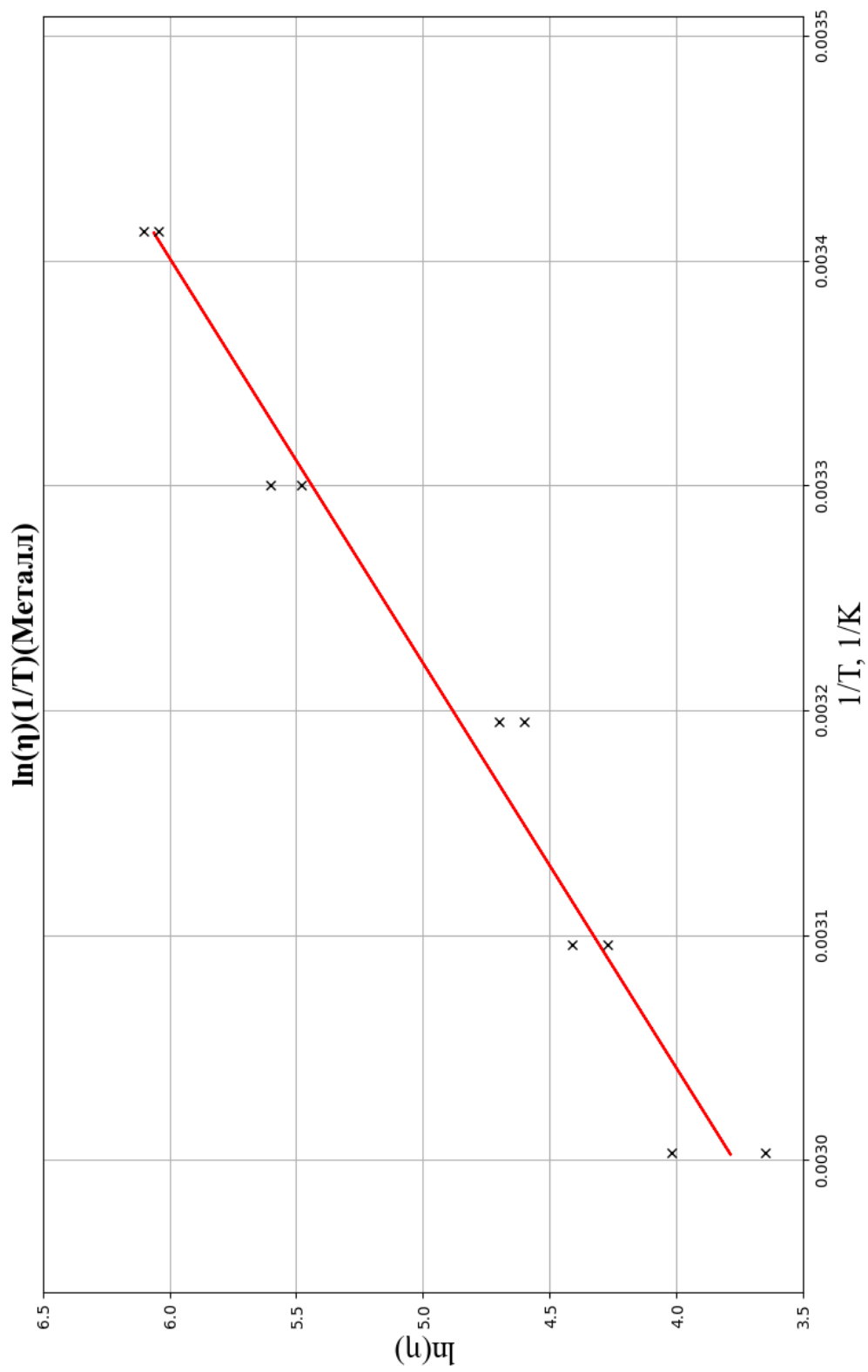


Рис. 5: График с металлическими шариками

