

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

Гёлецян А.Г.

22 июля 2022 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 турбулентные явления, 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, b время падения определяют установившуюся скорость шарика $v_{\text{уст}}$. 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.

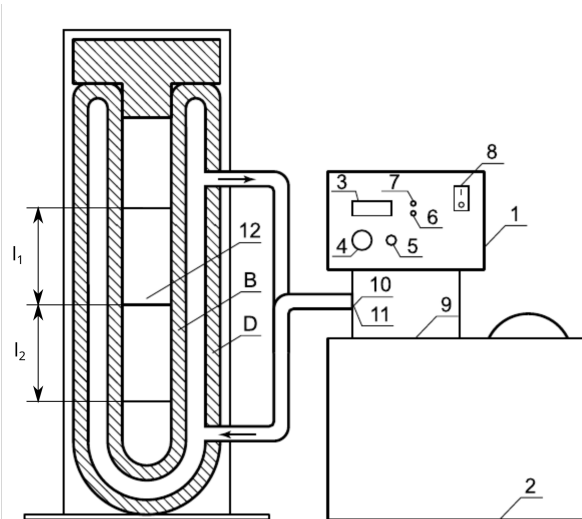


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости.

2 Ход работы

2.1 Подготовительные работы

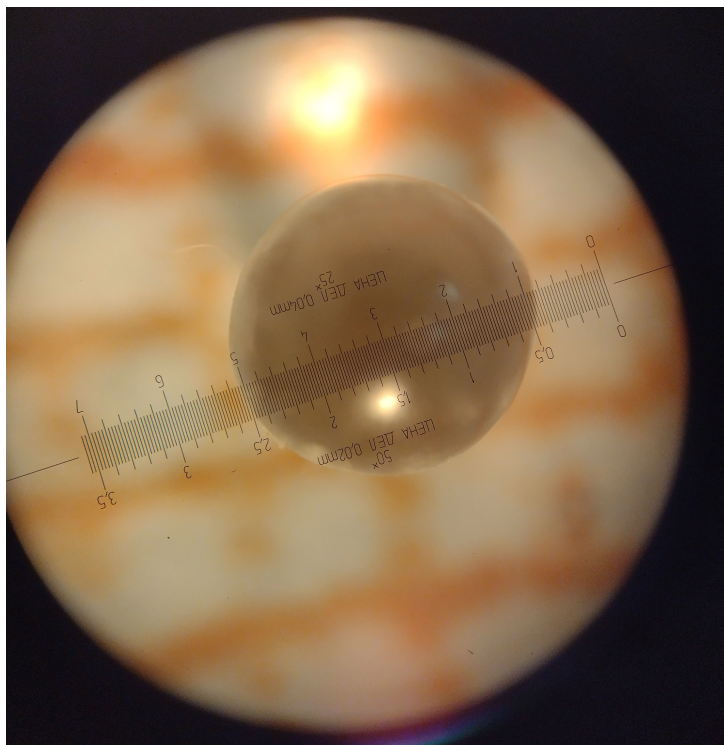


Рис. 2: Измерение диаметра шарика микроскопом.

Для начала отбираем примерно 25 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. Данные измерения приведены в таблице 1. В таблице шарики с номерами вида $s\#$ стеклянные, а вида $m\#$ металлические. Погрешности измерения диаметров $\sigma_d = 0.02\text{мм}$. Плотности шариков в эксперименте

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

№	d_1	d_2	d_3	$\langle d \rangle$	№	d_1	d_2	d_3	$\langle d \rangle$
	мм	мм	мм	мм		мм	мм	мм	мм
s1	2.10	2.04	2.10	2.08	m3	0.84	0.84	0.84	0.84
s2	2.08	2.06	2.06	2.07	m4	0.82	0.82	0.82	0.82
s3	2.10	2.10	2.10	2.10	m5	0.76	0.76	0.76	0.76
s4	2.06	2.08	2.08	2.07	m6	0.82	0.88	0.72	0.81
s5	2.06	2.08	2.06	2.07	m7	0.92	0.88	0.94	0.91
s6	2.08	2.08	2.08	2.08	m8	0.88	0.92	0.88	0.89
s7	2.04	2.06	2.08	2.06	m9	0.90	0.90	0.88	0.89
s8	2.04	2.10	2.08	2.07	m10	0.88	0.88	0.86	0.87
s9	2.10	2.08	2.06	2.08	m11	0.96	0.92	0.92	0.93
s10	2.08	2.08	2.08	2.08	m12	1.00	1.04	0.88	0.97
s11	2.10	2.10	2.10	2.10	m13	0.88	0.90	0.88	0.89
m1	0.66	0.70	0.70	0.69	m14	0.94	0.98	1.00	0.97
m2	0.68	0.66	0.68	0.67	m15	0.90	0.90	0.90	0.90

Таблица 1: Измеренные диаметры шариков.

Измеряем длины частей цилиндра установки (см. рис. 1)

$$l_1 = l_2 = (10.2 \pm 0.1)\text{см}$$

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. В данной работе время падения определяется изучением видеоматериала, содержащее движение шарика. Для уменьшения ошибки, возникающего вследствие паралакса, камера держится на уровне отметки. Анализируя полученные видеоматериалы получаем следующие данные (см. таблицу 2). Видео снималось с частотой 30 кадров в секунду, следовательно единица времени в таблице 1/30с. Как видим t_1 и t_2 всегда близки. Отсюда можно предположить что на рассматриваемых участках скорость не меняется. В дальнейшем будем считать это предположение правдивым, 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.

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

№	$T, ^\circ C$	t_1	t_2	№	$T, ^\circ C$	t_1	t_2
s1	30.86	459	452	m3	30.84	505	507
s2	30.86	455	453	m4	30.85	523	523
s3	41.53	255	252	m5	41.51	320	313
s4	41.50	249	250	m6	41.53	300	302
s5	50.93	146	150	m7	51.09	132	135
s6	51.05	139	146	m8	51.05	135	143
s7	62.00	84	88	m10	61.53	83	81
s8	61.97	81	87	m11	61.16	79	78
s9	61.85	79	81	m12	61.16	71	71
s10	68.40	60	61	m14	67.81	60	59
s11	68.47	59	61	m15	67.73	58	60

Таблица 2: Измеренные времена падения шариков в кадрах.

Плотность жидкости берем из графика 3

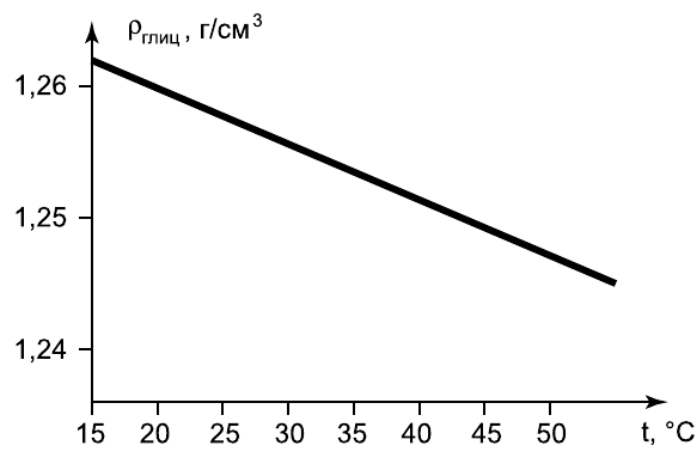


Рис. 3: Плотность глицерина при различных температурах.

Данные всех расчетов приведены в таблице 3

№	$T, ^\circ C$	$v, \text{см/с}$	$\Delta v, \text{см/с}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$\Delta\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	Re	$\tau, \text{мс}$	$S, \mu\text{м}$
s1	30.86	0.67	0.007	441	21	0.02	0.70	0.05
s2	30.86	0.67	0.007	435	8	0.02	0.70	0.05
s3	41.53	1.20	0.012	251	3	0.06	1.20	0.1
s4	41.50	1.21	0.013	240	5	0.07	1.20	0.1
s5	50.93	2.05	0.023	143	3	0.18	2.10	0.4
s6	51.05	2.13	0.024	139	2	0.20	2.20	0.5
s7	62.00	3.52	0.045	83	3	0.55	3.50	1.2
s8	61.97	3.61	0.047	81	4	0.57	3.60	1.3
s9	61.85	3.79	0.05	78	2	0.63	3.80	1.4
s10	68.40	5.01	0.077	59	1	1.09	5.00	2.5
s11	68.47	5.05	0.078	60	1	1.10	5.10	2.6
m3	30.84	0.60	0.006	420	4	0.01	0.10	0.006
m4	30.85	0.58	0.006	414	4	0.01	0.10	0.006
m5	41.51	0.96	0.01	215	2	0.02	0.20	0.02
m6	41.53	1.01	0.01	233	66	0.02	0.20	0.02
m7	51.09	2.27	0.025	130	12	0.10	0.40	0.09
m8	51.05	2.18	0.024	130	10	0.09	0.40	0.09
m10	61.53	3.70	0.049	73	3	0.27	0.70	0.3
m11	61.16	3.86	0.052	80	6	0.28	0.70	0.3
m12	61.16	4.27	0.06	79	19	0.33	0.80	0.3
m14	67.81	5.09	0.079	66	6	0.46	1.00	0.5
m15	67.73	5.14	0.08	56	1	0.51	1.00	0.5

Таблица 3: Значения вязкостей в экспериментах

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 линией методом минимума хи квадрат получаем следующие данные (см. графики в конце)

Для стеклянных шариков

$$W/k = (5653 \pm 4)\text{K}$$
$$\bar{\chi}_{\text{стекло}} = 3.4$$

Для металлических шариков

$$W/k = (5640 \pm 4)\text{K}$$
$$\bar{\chi}_{\text{металл}} = 1.5$$

Для всех шариков вместе

$$W/k = (5470 \pm 3)\text{K}$$
$$\bar{\chi}_{\text{смеш}} = 8.4$$

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 ($\bar{\chi} = 3.4$), то учитывая близость значений W для металлических и стеклянных шариков возьмем W как среднее этих двух. Получаем ответ

$$W/k = (5647 \pm 4)\text{K} \quad (7)$$

3 Обсуждение результатов

Сравним наши результаты с более точными результатами^[1]. На графике (4) 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 (5), что связь между $\ln(\eta)$ и $1/T$ линейная лишь в некотором приближении. Если попытаться аппроксимировать точки линейным 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.

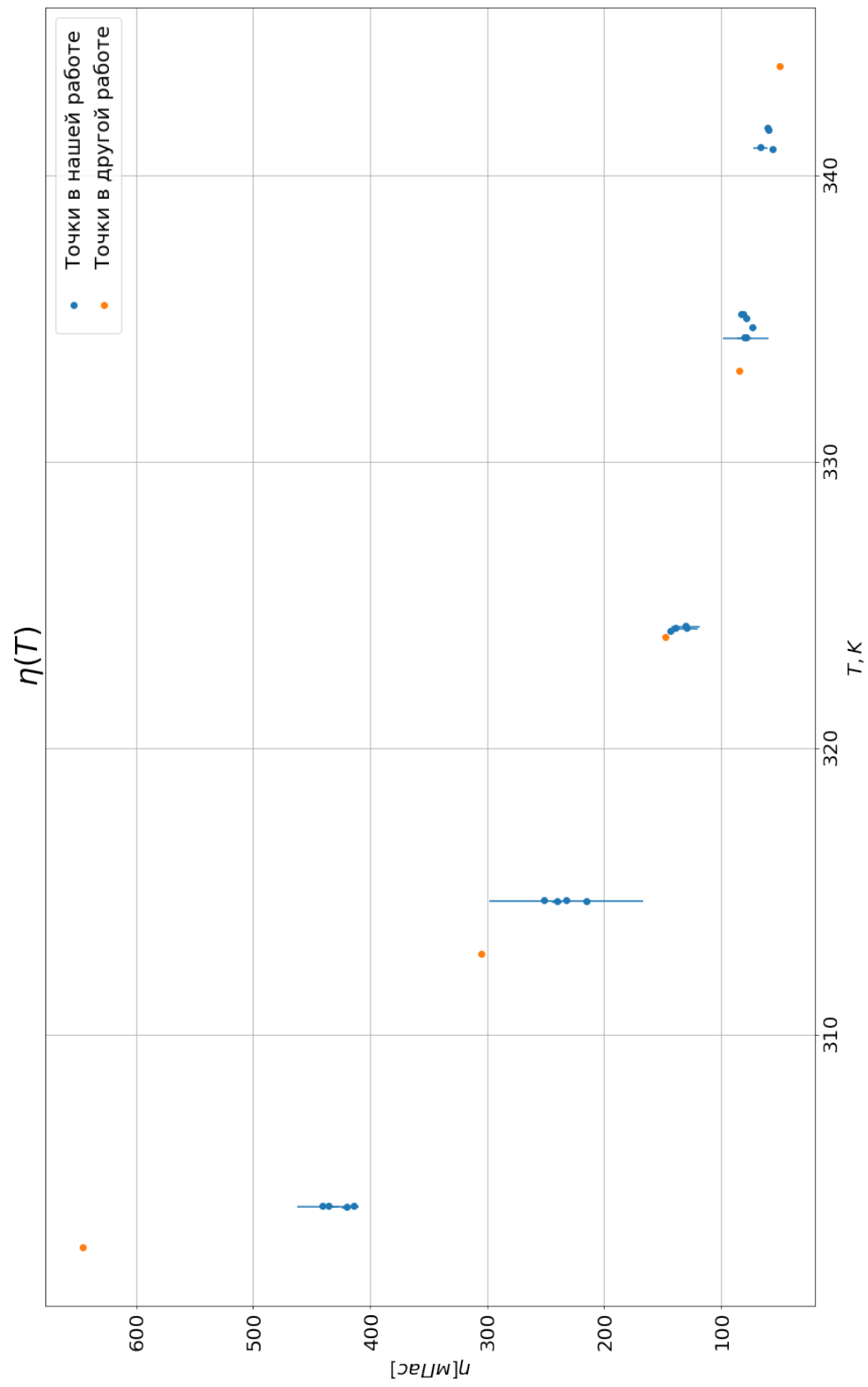


Рис. 4: Сравнение вязкостей в разных работах

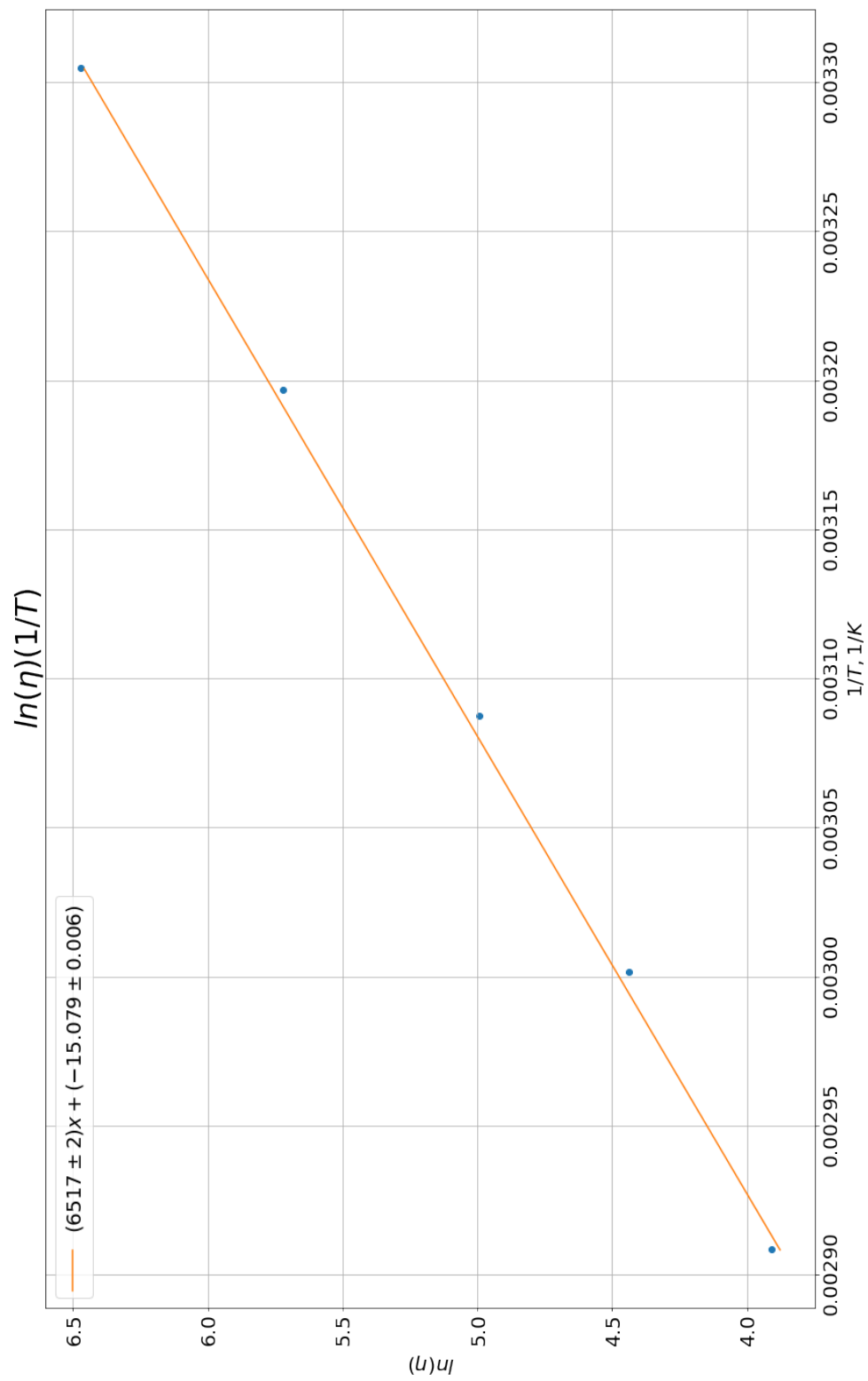


Рис. 5: Линеаризованный график для данных из работы [1]

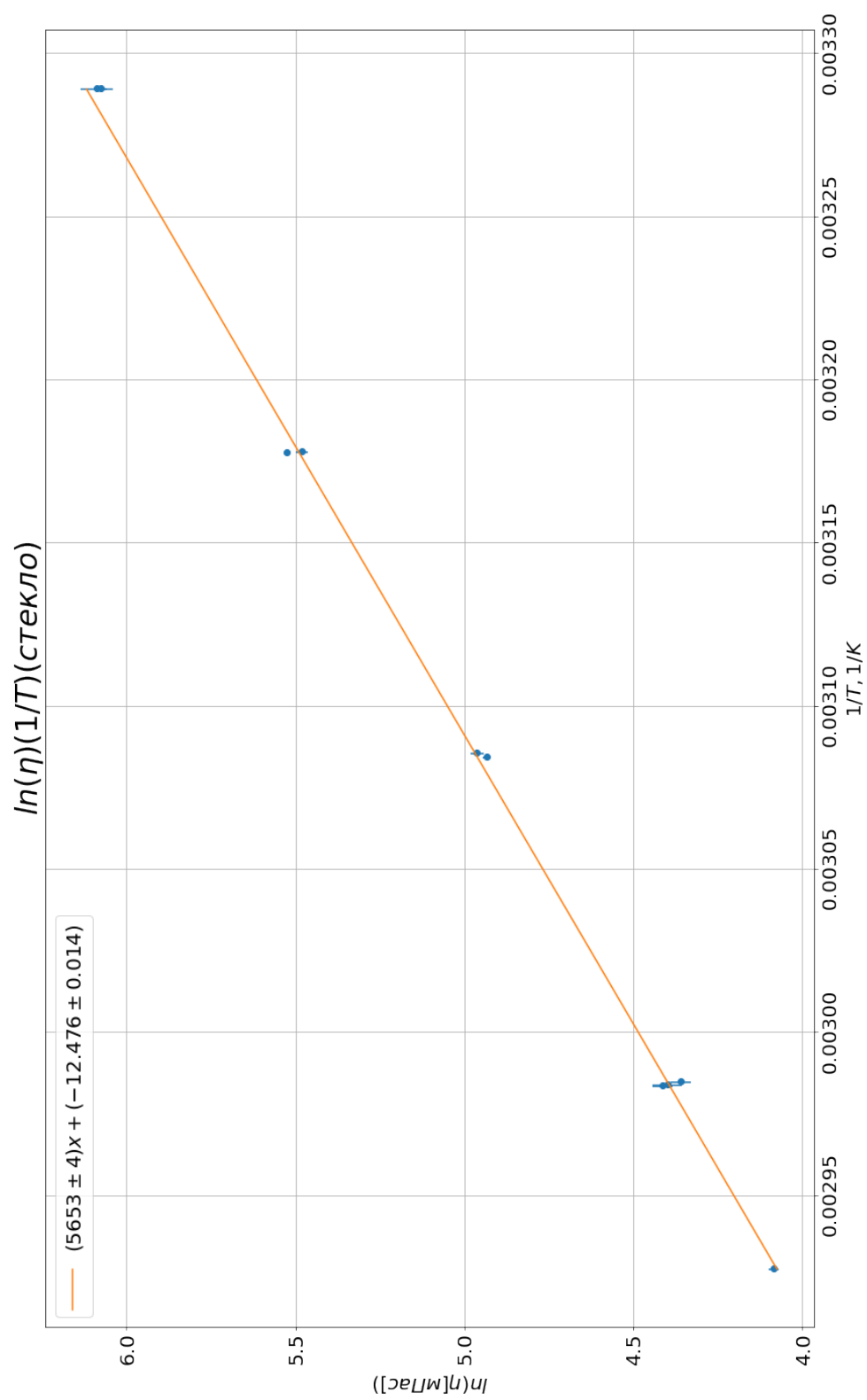


Рис. 6: График со стеклянными шариками

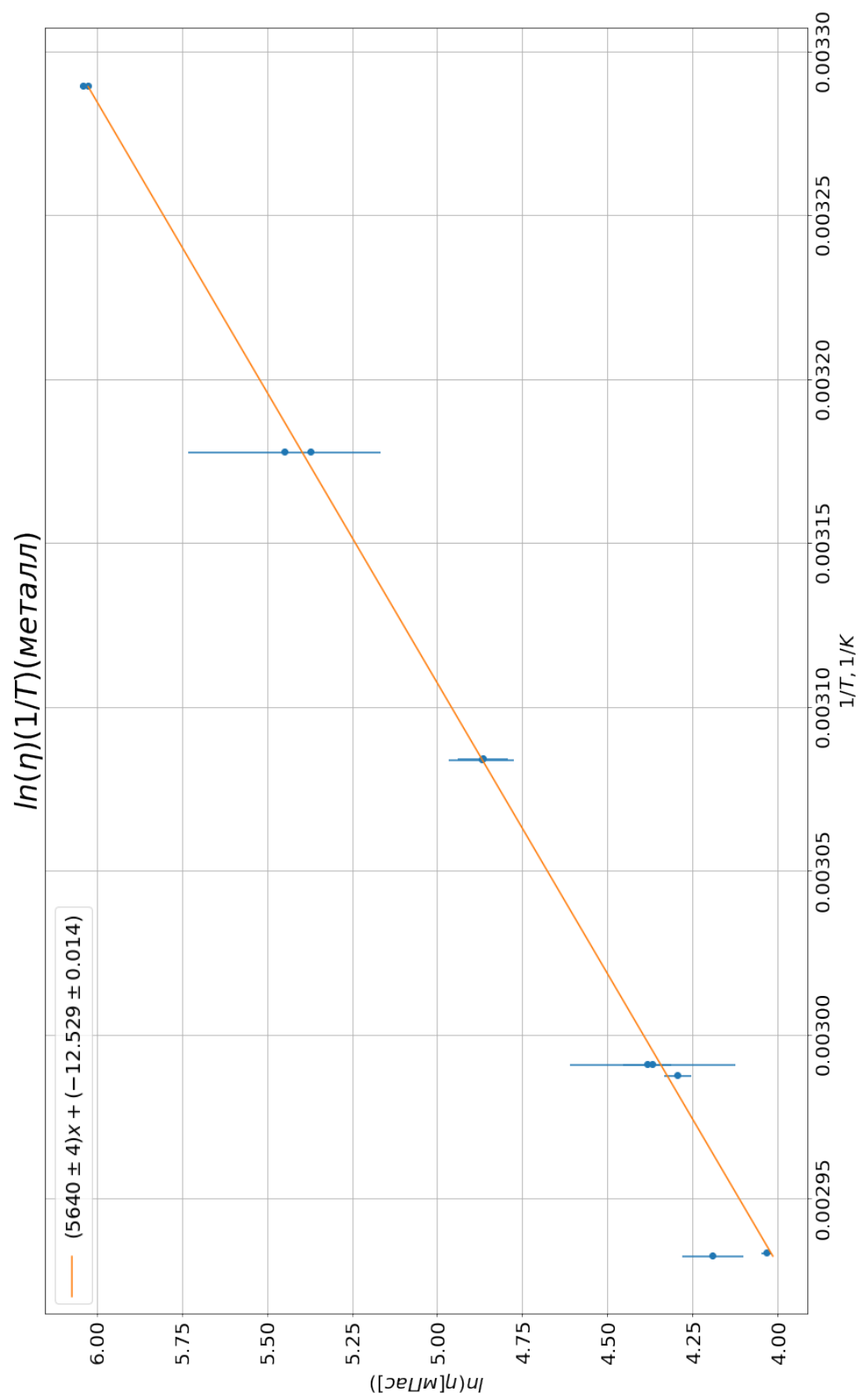


Рис. 7: График с металлическими париками

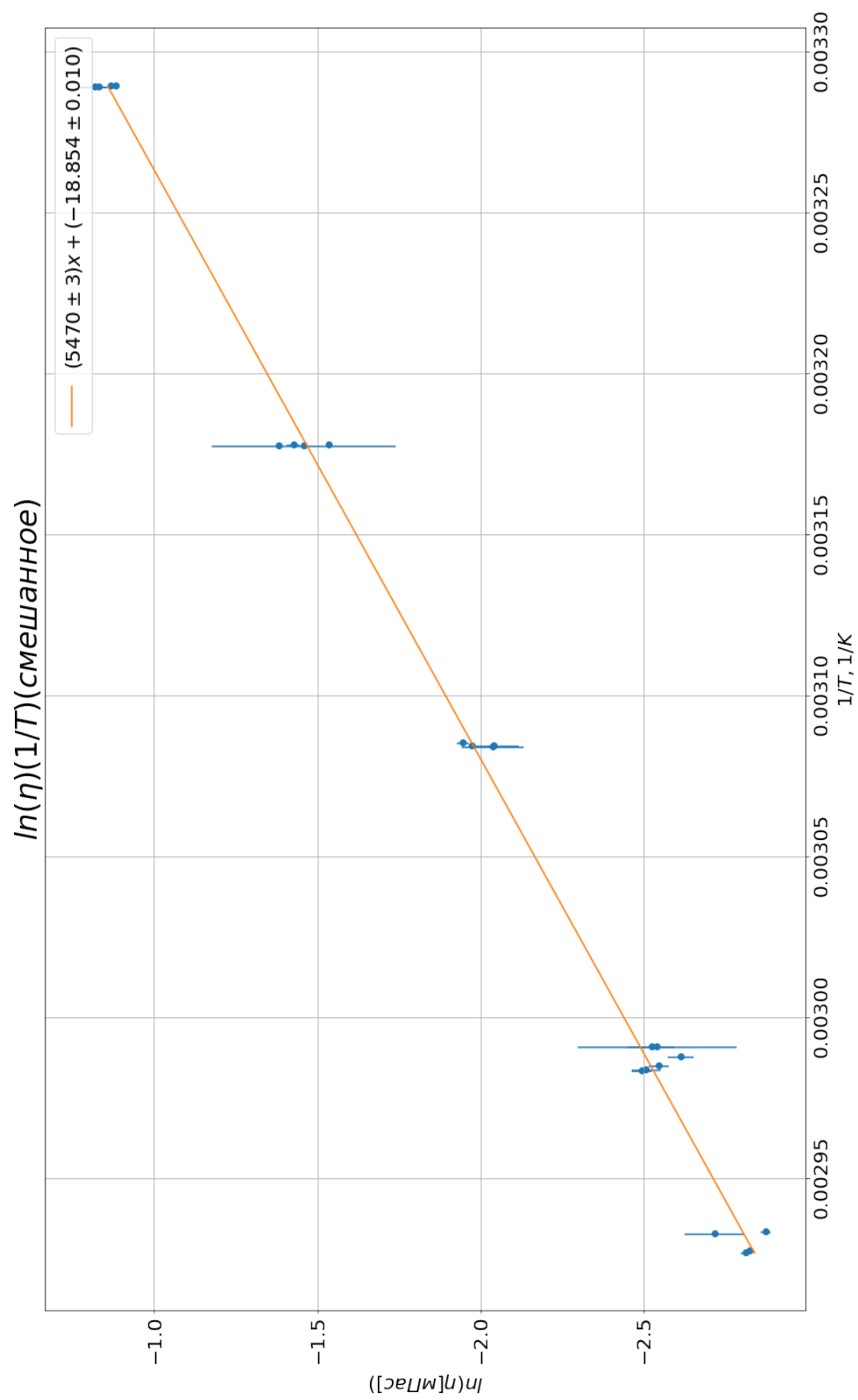


Рис. 8: График со всеми шариками

4 Ссылки

[1] Abel G.M.Ferreira, Ana P.V.Egas, Isabel M.A.Fonseca - The viscosity of glycerol, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2017.05.042>