

---

## Лабораторная работа 2.3.1Б

### Современные средства получения и измерения вакуума

Карташов Константин Б04-005

---

## I. Анотация

### Цель работы:

1. Измерить объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки
2. Определить скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума

### Оборудование:

1. вакуумная установка Б
- 

## II. Теоретическая часть

Вакуумом называется состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе  $\lambda$  сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда  $d$ , в котором газ находится. Для воздуха при нормальных условиях  $\lambda \sim 10^{-5}$ .

Техническим вакуумом называют состояние газа при котором его давление меньше атмосферного ( $P < P_{\text{атм}}$ ).

Различают 3 вида технического вакуума:

1. Низкий, когда средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера объема, то есть  $\lambda < d$
2. средний  $\lambda \sim d$
3. высокий (глубокий)  $\lambda > d$ . Газ в этом состоянии называется ультраразреженным

Также для характеристики степень разреженности газового потока вакуумных систем можно использовать число Кнудсена

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

$\lambda$  – длина свободного пробега молекул газа,  $d$  – характерный размер системы.

Тогда в зависимости от значений числа Кнудсена можно выразить:

1. низкий вакуум –  $Kn \ll 1$
2. средний вакуум –  $Kn \sim 1$
3. высокий вакуум –  $Kn \gg 1$

Выпишем основные формулы, отображающие теоретические зависимости между исследуемыми величинами, необходимые в данной работе. Здесь и далее  $L$  – единица измерения длины,  $M$  – массы,  $T$  – времени в системе LMT

1. Быстрота откачивающего действия (скорость откачки) вакуумной системы  $S[L^3T^{-1}]$  – объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dT}$$

Следовательно быстродействие насоса  $S_n$  определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dt} \quad (2)$$

А эффективная скорость откачки камеры  $S_0$ :

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt} \quad (3)$$

2. Падение давления вдоль вакуумпровода  $\Delta P = P_1 - P_2$ . Определяется его пропускной способностью (проводимостью)  $U[L^3T^{-1}]$ :

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2}$$

где  $Q[L^2MT^{-3}]$  – поток газа через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

3. Величина  $Z[L^{-3}T]$ , обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U}$$

В общем случае указанные величины  $S$ ,  $U$ ,  $Q$ ,  $Z$  как и сами давления  $P_1$  и  $P_2$  зависят от времени. Но в конце процесса откачки устанавливается квазистационарный режим, при котором поток газа становится практически постоянным и равным количеству поступающего в систему газа в единицу времени вследствие наличия течей, т.е. нарушения герметичности (в основном в местах механического соединения отдельных узлов вакуумной системы). Для стационарного режима можно записать условие непрерывности потока откачиваемого газа:

$$P_1 S_0 = P S = P_2 S_n = Q$$

4. Получим основное уравнение вакуумной техники

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \quad (4)$$

5. Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\nu L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}}$$

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

В случае последовательного соединения:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{\Sigma Z_i}$$

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}} U_{\Sigma}}{S_{\text{н}} + U_{\Sigma}} = \frac{S_{\text{н}}}{\frac{S_{\text{н}}}{U_{\Sigma}} + 1} \approx S_{\text{н}}$$

6. Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (5)$$

### III. Экспериментальная часть

#### i. Описание экспериментальной установки

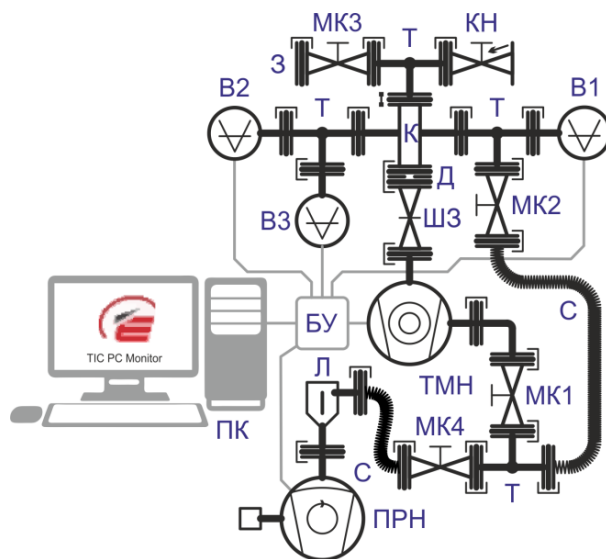


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

**Обозначения на рисунках 1, 2, i.:**

БУ – Блок управления

ПРН – пластинчато-роторный насос

ТМН – турбомолекулярный насос

К – Вакуумная камера

ШЗ – Шибберный затвор

МК1-4 – Мембранные краны

В1 – Терморезисторный вакуумметр

В2 – Магнитронный вакуумметр

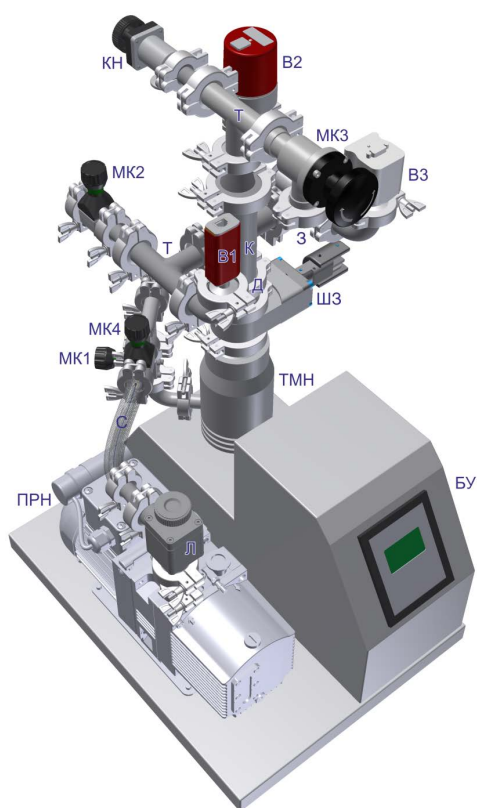


Рис. 2: Внешний вид экспериментальной установки (спереди)

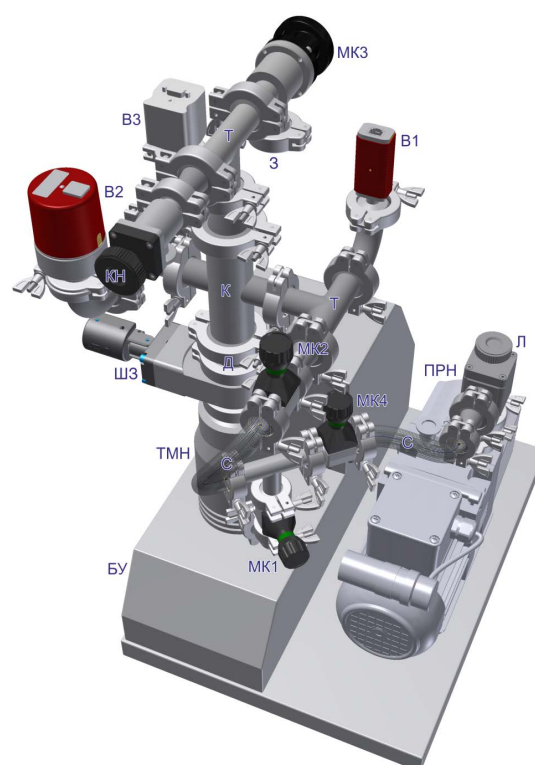


Рис. 3: Внешний вид экспериментальной установки (сзади)

В3 – Термоэлектронный вакуумметр  
 КН – Кран-натекатель  
 Л – Маслоуловитель  
 З – Заглушка  
 Д – Диафрагма  
 С – Сильфоны  
 Т – Тройники  
 ПК – Компьютер

## ii. Ход эксперимента

### I. Подготовка к работе и подключение системы управления

1. Сопоставим элементы схемы (рис. 1) с соответствующими частями самой установки.
2. Последовательно откроем краны МК1, МК2, МК3, МК4 поворотом ручек против часовой стрелки (зелёные метки на кранах должны быть максимально видны), потом откроем шибер ШЗ (ручка шибера в крайнем дальнем от установки положении).
3. Впустим атмосферный воздух в установку через кран-натекатель КН. Ручку тонкой регулировки КН со шкалой плавно вращаем до упора против

часовой стрелки (около 14-ти полных оборотов).

4. *Подготовим систему к форвакуумной откачке.* Закроем КН плавно вращая ручку тонкой регулировки со шкалой до упора по часовой стрелке (около 14-ти полных оборотов). Закроем кран МК3, шиббер ШЗ, а Краны МК1, МК2, МК4 оставим открытыми. Определим по схеме, по каким магистралям и какие объёмы будут откачиваться форвакуумным насосом при данном состоянии кранов.
5. *Включим питание экспериментального стенда и ПК.*
6. *Запустим программу управления TIC PC Monitor.*
7. *Установим связь между БУ, насосами и вакууметрами.*
8. *Выберем данные для записи в файл.*
9. *Включим запись данных в файл.*

## II. Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом.

1. *Откачаем установку форвакуумным насосом ПРН.* Отметим время запуска в тетради. Откачаем установку до предельного давления, которое можно определить по динамике показателей вакууметров.
2. *Присоединим к установке сильфон с воздухом при атмосферном давлении.* Отсоединим заглушку З от крана МК3 (**кран МК3 закрыт!**). Протрём вакуумные поверхности сильфона С, заглушки З, а также уплотнительные кольца безворсовой тканью смоченной обезжиривающей жидкостью. Установите заглушку З на один конец гибкого сильфона, а другой конец присоедините к крану МК3.  
При этом в сильфоне между заглушкой и краном будет «заперто» 252 мл воздуха при атмосферном давлении.
3. *Выровняем давления в сильфоне С и вакуумной камере К экспериментального стенда.* Перекроем откачку вакуумной камеры К, закрыв кран МК2. Далее **предельно плавно**, не допуская резкого изменения показаний вакуумметра В1, откроем кран МК3 для распространения «запертого» воздуха по объёму вакуумной камеры К (насос ПРН должен оставаться **включённым!**). Зафиксируем установившиеся показания вакуумметра В1. Сделаем выводы о точности его показаний в данном диапазоне измерений.
4. *Выровняем давление вакуумной камеры К и форвакуумной магистрали установки.* Закроем краны МК1 и МК4. Далее плавно откроем кран МК2. Зафиксируем установившиеся показания вакуумметра В1. Насос ПРН при этом остаётся **включённым** и откачивает только масляную ловушку и сильфон С до крана МК4.
5. *Выровняйте давление во всей установке, включая объем турбомолекулярного насоса ТМН.* Плавно откроем кран МК1, запустив воздух в объём насоса ТМН. Зафиксируем установившиеся значения вакуумметра В1 (насос ПРН должен оставаться **включённым!**).

6. *Напустим в установку воздух до атмосферного давления.* Выключим насос ПРН и откроем кран МК4. Ручку тонкой регулировки КН со шкалой плавно вращаем до упора против часовой стрелки.
7. *Подготовьте установку к повторному выполнению части II задания.* Закроем КН плавно вращая ручку тонкой регулировки со шкалой до упора по часовой стрелке (около 14-ти полных оборотов). Закроем кран МК3.
8. Измерения по пп. 1-7 повторим ещё 1-2 раза, каждый раз фиксируя время начала работы форвакуумного насоса ПРН. Если достигается приемлемая повторяемость, можно переходить к следующей части задания.  
*Определим объёмы вакуумных частей установки согласно пп 1. Определим скорость откачки системы насосом ПРН по улучшению вакуума во время откачки согласно пп. 2.*

### III. Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума

1. *Отсоединим сильфон от установки.* Отсоединим сильфон от установки и установим заглушку З на кран МК3. Откроем кран МК3, чтобы убрать из установки запёртый объём воздуха между заглушкой З и краном МК3.
2. *Откачаем установку форвакуумным насосом ПРН.*
3. *Откачаем объём турбомолекулярным насосом ТМН.* Откроем шибер ШЗ, закроем кран МК2. Определим по схеме, по каким магистралям и какие объёмы будут откачиваться двумя насосами при данном состоянии кранов. Отметим время начала работы насоса ТМН. Откачайте установку до предельного давления, которое можно по динамике показаний вакууметров В2 и В3.  
Проанализируем работу вакууметров убедимся, что терморезисторный вакуумметр В1 достиг своего предела измерений, в то время как инверсно-магнетронный вакуумметр В2 включился и отображает корректное давление в системе. Зафиксируем предельное давление в высоковакуумной части установки и время откачки установки насосом ТМН.
4. *Проведём обезгаживание нагретой спирали включившегося термоэлектронного вакуумметра В3 для устранения искажений его показаний.* После дегазации сравним показания вакууметров В2 и В3.
5. *Определите уровень течей и скорость откачки системы.* Закроем шибер ШЗ, при этом давление в системе начнёт повышаться за счёт наличия течей. Получим таким образом зависимость показаний вакууметров В2 и В3 от времени. Когда давление превысит  $10^{-3}$  мбар, снова откроем шибер. Получим зависимость показаний В2 и В3 от времени после открытия шибера. Снова зафиксируем предельное давление. Время снятия показаний по пп. 5 не должно превышать 10 мин.
6. Измерения по пп. 5 повторим ещё 1-2 раза, каждый раз фиксируя время закрытия и открытия шибера ШЗ. Если достигается приемлемая повторяемость, перейдём к следующей части задания.

### IV. Выключение установки

### iii. Обработка экспериментальных данных

1. Пользуясь законом Бойля-Мариотта определим объём установки.

Зная объём сильфона  $V_0 = 252$  мл и атмосферное давление  $P_0 = 100$  кПа рассчитаем заполненный объём установки поочерёдно открывая краны.

$$V' = \frac{P_0 V_0}{P'}$$

Чтобы рассчитать объёмы отдельных частей установки вычтем  $V_{\text{ч}} = V'_2 - V'_1$

Кран	$P$ , кПа	$V_{\Sigma}$ , мл	Часть	$V_{\text{ч}}$ , мл
–	100	252	Сильфон	252
МК3	27.559	914.4	Вакуумная камера	662.4
МК2	23.275	1082.7	Сильфон МК2–МК4	168.3
МК1	16.870	1493.8	Насос ТМН	411.1
МК4	13.799	1826.2	Насос ПРН	332.4

2. Возьмём зависимость давления от времени  $P_t = P(t)$  в вакуумной камере. Считая, что  $P_t = P_0 e^{-\tau t}$  в идеальных условиях рассчитаем коэффициент  $\tau$  построив график зависимости  $\ln P(t)$ :  $\ln P_t = \ln P_0 - \tau t$ . Значение  $\tau$  рассчитаем для значений давления от  $10^4 - 10$  Па по методу наименьших квадратов:

$$\tau = \frac{\langle t \ln P \rangle - \langle t \rangle \langle \ln P \rangle}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2},$$

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle \ln P^2 \rangle - \langle \ln P \rangle^2}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2} - \tau^2}.$$

Значения:

$t$ , с	146	149	151	153	155	157
$P$ , Па	15576.0	7228.8	4227.3	2302.3	1279.3	719.52
$\ln P$	9.653	8.886	8.349	7.742	7.154	6.579
159	161	163	165	167	169	171
410.45	237.75	154.86	98.518	65.632	46.547	34.962
6.017	5.471	5.043	4.59	4.184	3.84	3.554

По значениям рассчитаем:

$$\tau = \frac{976.4 - 158.9 \cdot 6.236}{25314 - 158.9^2} = 0.252, \quad \sigma_{\tau} = \frac{1}{\sqrt{13}} \sqrt{\frac{42.598 - 6.236^2}{25314 - 158.9^2} - \tau^2} = 0.006.$$

Покажем данные на графике (рис 2):

Зная объём камеры  $V_K$  и  $\tau$  найдём скорость откачки  $S_0$ :

$$S_0 = V_K \tau = 662 \cdot 0.252 = 166.8 \text{ мл/с} = 0.6 \text{ м}^3/\text{ч},$$

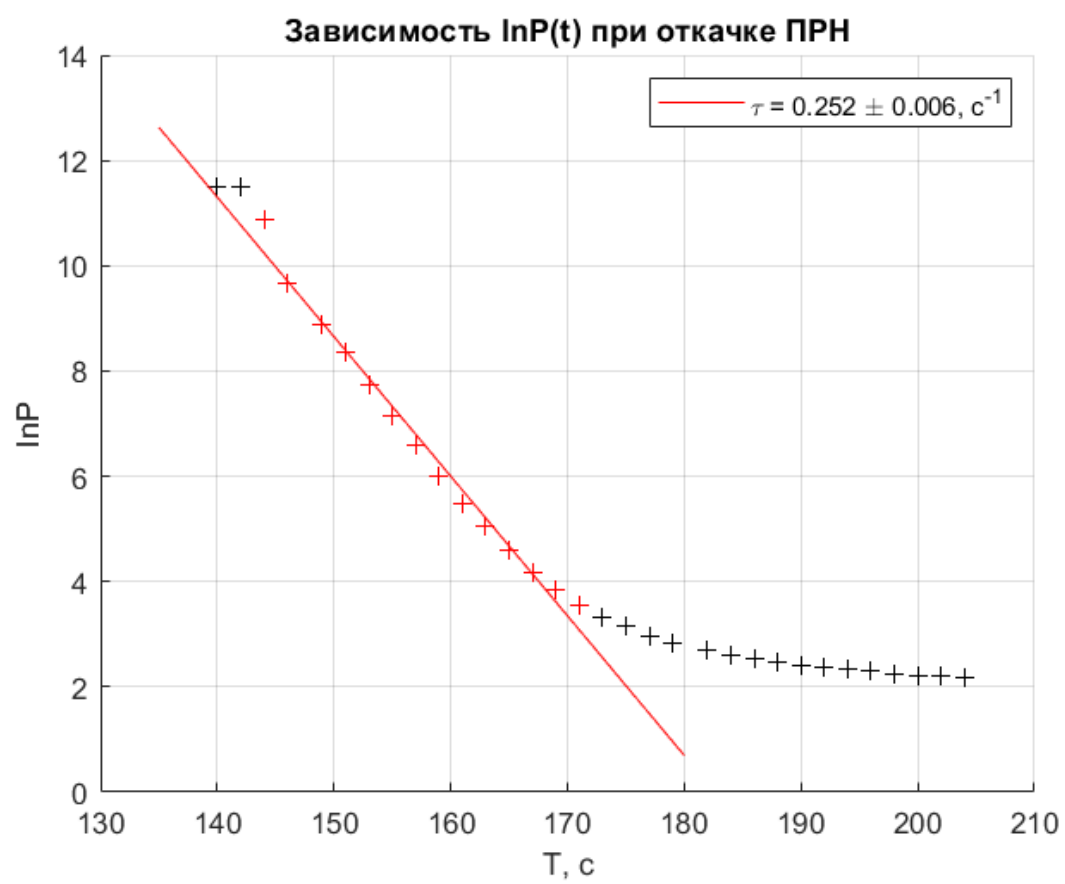


Рис. 4: График 1



$$\sigma_S = S_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2} = 0.60 \cdot \sqrt{(0.004)^2 + \left(\frac{0.006}{0.252}\right)^2} = 0.012 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Имеем:  $\tau = 0.252 \pm 0.006 \text{ с}^{-1}$ ,  $S_0 = 0.60 \pm 0.01 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

3. Прделаем действия из П.2 для данных для ТМН при давлениях  $P = 10^{-1} = 10^{-3} \text{ Па}$ .

Найдём значение для  $\tau$  по методу наименьших квадратов. Значения:

$t$	$P$ , мПа	$\ln P$	$t$	$P$ , мПа	$\ln P$	$t$	$P$ , мПа	$\ln P$
5088	15.476	-6.471	5117	12.808	-6.66	5146	11.093	-6.804
5090	15.207	-6.489	5119	12.67	-6.671	5148	11.003	-6.812
5092	14.951	-6.506	5121	12.532	-6.682	5150	10.907	-6.821
5094	14.714	-6.522	5123	12.394	-6.693	5152	10.779	-6.833
5096	14.486	-6.537	5125	12.246	-6.705	5154	10.711	-6.839
5098	14.262	-6.553	5127	12.134	-6.714	5156	10.639	-6.846
5101	14.038	-6.569	5129	12.011	-6.725	5158	10.552	-6.854
5103	13.839	-6.583	5131	11.873	-6.736	5160	10.488	-6.86
5105	13.677	-6.595	5134	11.8	-6.742	5162	10.411	-6.867
5107	13.539	-6.605	5135	11.655	-6.755	5164	10.333	-6.875
5109	13.353	-6.619	5138	11.551	-6.764	5166	10.248	-6.883
5111	13.232	-6.628	5140	11.432	-6.774	5168	10.17	-6.891
5113	13.084	-6.639	5142	11.306	-6.785	5171	10.104	-6.897
5115	12.931	-6.651	5144	11.204	-6.794	5173	10.021	-6.906

Покажем данные на графике (рис 3):

По значения рассчитаем:

$$\tau = \frac{-34468 + 5130 \cdot 6.718}{26321187 - 5130^2} = 5.002 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sqrt{42}} \sqrt{\frac{45.146 - 6.718^2}{26321187 - 5130^2} - \tau^2} = 0.08 \cdot 10^{-3}.$$

Рассчитаем скорость откачки:

$$S_0 = V_K \tau = 662 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 3.31 \text{ мл/с},$$

$$\sigma_S = S_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2} = 3.31 \cdot \sqrt{(0.004)^2 + \left(\frac{0.08}{5}\right)^2} = 0.006 \text{ мл/с}.$$

Имеем:  $\tau = (5.00 \pm 0.08) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $S_0 = 3.310 \pm 0.006 \text{ мл/с}$ .

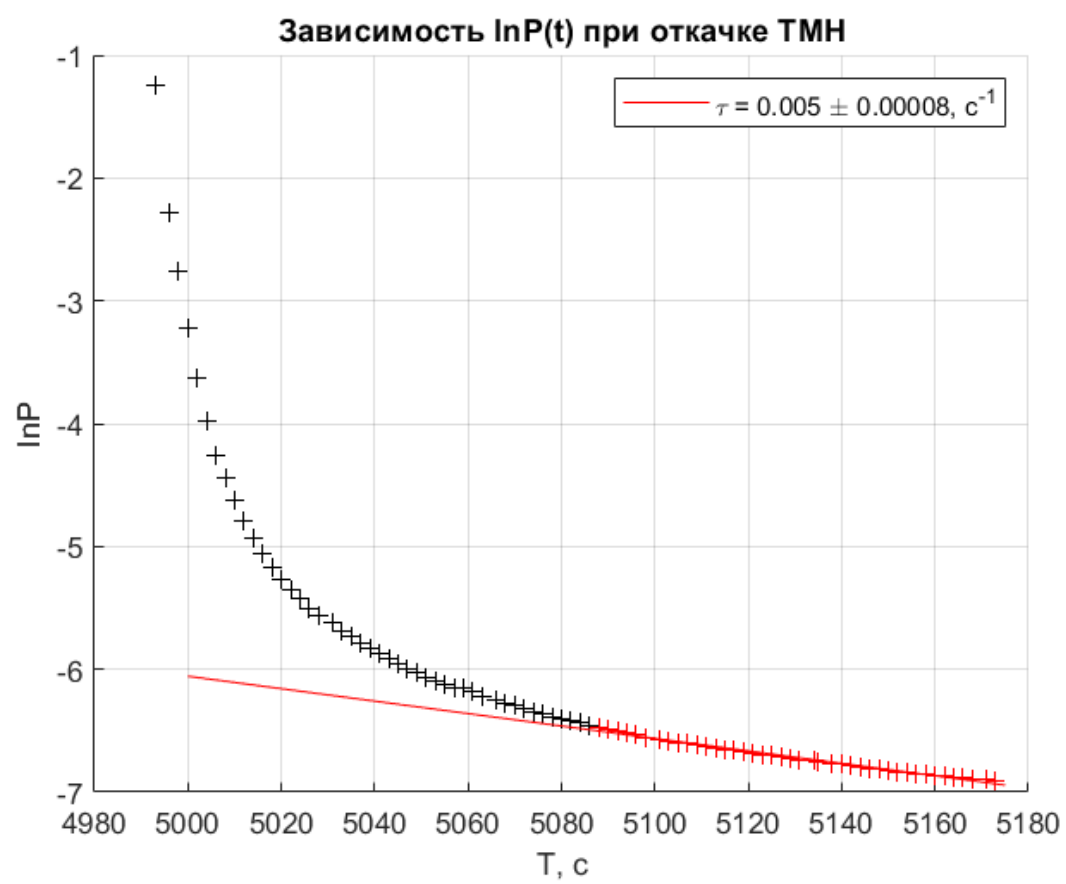


Рис. 5: График 2

---

## IV. Выводы

1. Получили значения для скоростей откачки:

$$S_{\text{ПРН}} = 0.60 \pm 0.01 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad S_{\text{ТМН}} = 3.310 \pm 0.006 \text{ мл/с}.$$

2. Сравнивая полученные значения с табличными можно сделать вывод, что пропускная способность системы при откачке ПРН уменьшает скорость откачки в 3 раза (0.6 вместо 1.8 м<sup>3</sup>/с). Пропускная способность системы при откачке ПРН уменьшает скорость откачки в 3 раза
-