

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

**Отчёт о выполнении лабораторной работы 2.3.1**

Получение и измерение вакуума

Автор:  
Чикин Андрей Павлович  
Б05-304

Долгопрудный, 2023

# Содержание

<b>1 Краткая Теория.</b>	<b>2</b>
1.1 Экспериментальная установка. . . . .	2
1.2 Диффузионный насос (ВН). . . . .	4
1.3 Масляный манометр (М). . . . .	4
1.4 Термопарный манометр. . . . .	5
1.5 Ионизационный манометр. . . . .	5
<b>2 Теоретическая часть</b>	<b>6</b>
<b>3 Ход работы</b>	<b>8</b>
3.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки . . . . .	8
3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки . . . . .	9
<b>4 Вывод.</b>	<b>16</b>

## Список иллюстраций

1	Схема экспериментальной установки . . . . .	2
2	Схема действия ФН. . . . .	3
3	Схема действия диффузионного насоса. . . . .	4
4	Схема термопарного манометра. . . . .	5
5	Градуировочная кривая термопары. . . . .	5
6	Схема ионизационной лампы ЛМ-2. . . . .	6
7	График зависимости давления от времени при ухудшении вакуума (1). . . . .	14
8	График зависимости давления от времени при улучшении вакуума (1). . . . .	14
9	График зависимости давления от времени при ухудшении вакуума (2). . . . .	15
10	График зависимости давления от времени при улучшении вакуума (2). . . . .	15

## Список таблиц

1	first devacuuming . . . . .	12
2	second devacuuming . . . . .	12
3	Данные зависимости давления от времени при ухудшении вакуума (см. пункт 6 выполнения). . . . .	12
4	first revacuuming . . . . .	13
5	second revacuuming . . . . .	13
6	Данные зависимости давления от времени при улучшении вакуума (см. пункт 6 выполнения). . . . .	13

### Цель работы:

1. измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки.
2. определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

### Приборы:

1. вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

## 1 Краткая Теория.

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса:

1. низковакуумные: до  $10^{-2} - 10^{-3}$  торр.
2. высоковакуумные: до  $10^{-4} - 10^{-7}$  торр.
3. установки сверхвысокого вакуума: до  $10^{-8} - 10^{-11}$  торр.

В данной работе изучаются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до  $10^{-2}$  торр и диффузионным масляным насосом до  $10^{-5}$  торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

### 1.1 Экспериментальная установка.

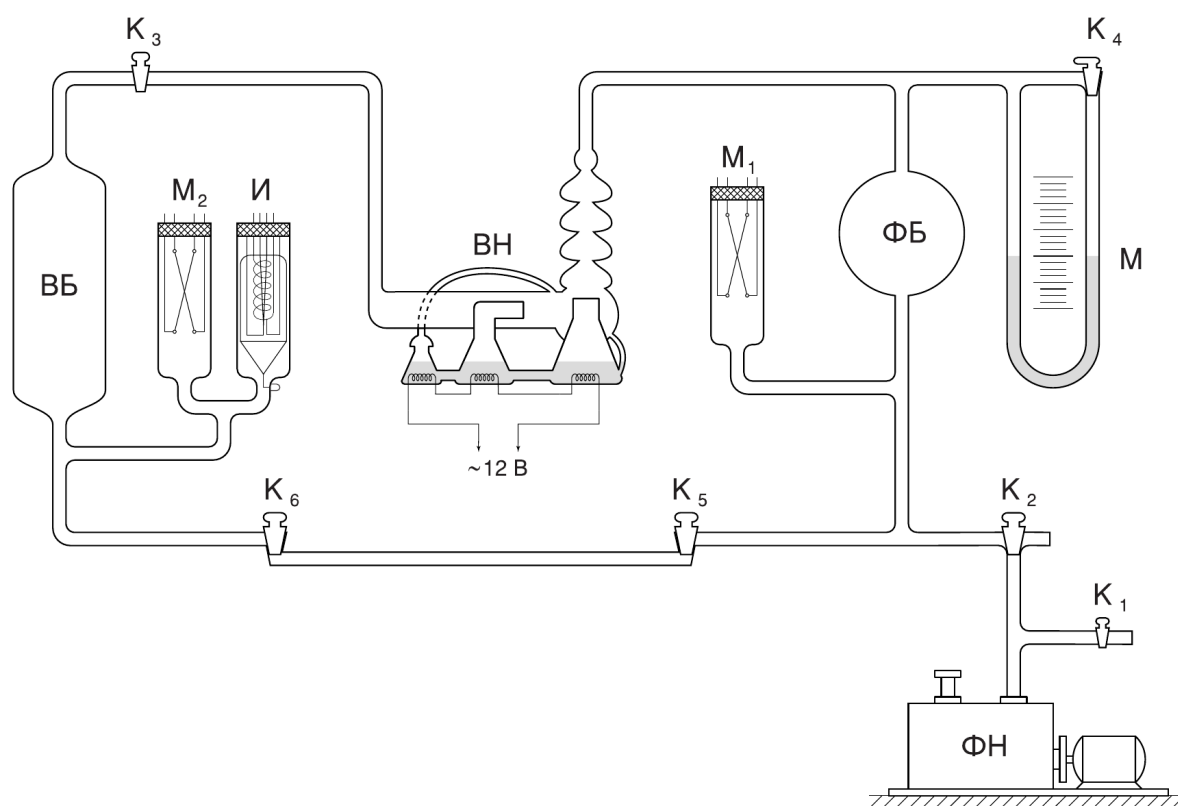


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Установка изготовлена из стекла и состоит из:

- форвакуумного баллона (ФБ)
- высоковакуумного диффузионного насоса (ВН)
- высоковакуумного баллона (ВБ)
- масляного (М) и ионизационного (И) манометров
- термопарных манометров ( $M_1$  и  $M_2$ )
- форвакуумного насоса (ФН)
- соединительных кранов ( $K_1, \dots, K_6$ )

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов полые и составляют одно целое с рукоятками. Пробки кранов притерты к корпусам. Для герметизации используется вакуумная смазка.

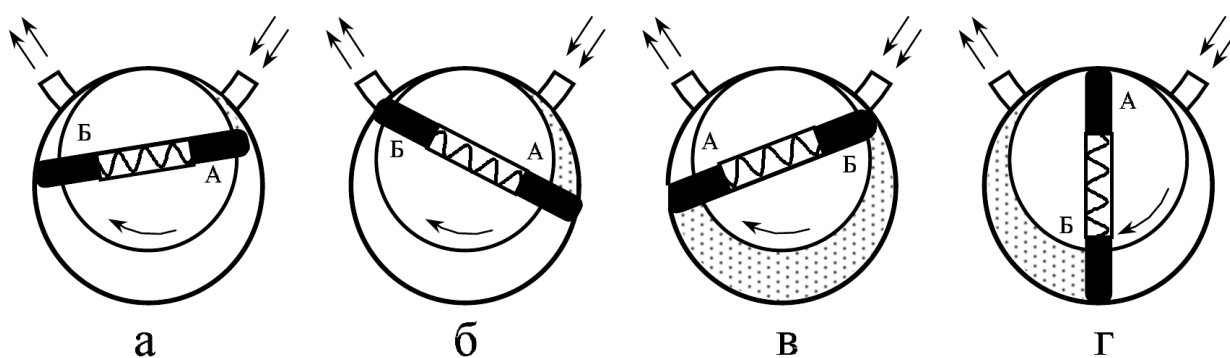


Рис. 2: Схема действия ФН.

Устройство и принцип действия *форвакуумного насоса* схематически, но довольно ясно изображены на рис. 2.

## 1.2 Диффузионный насос (ВН).

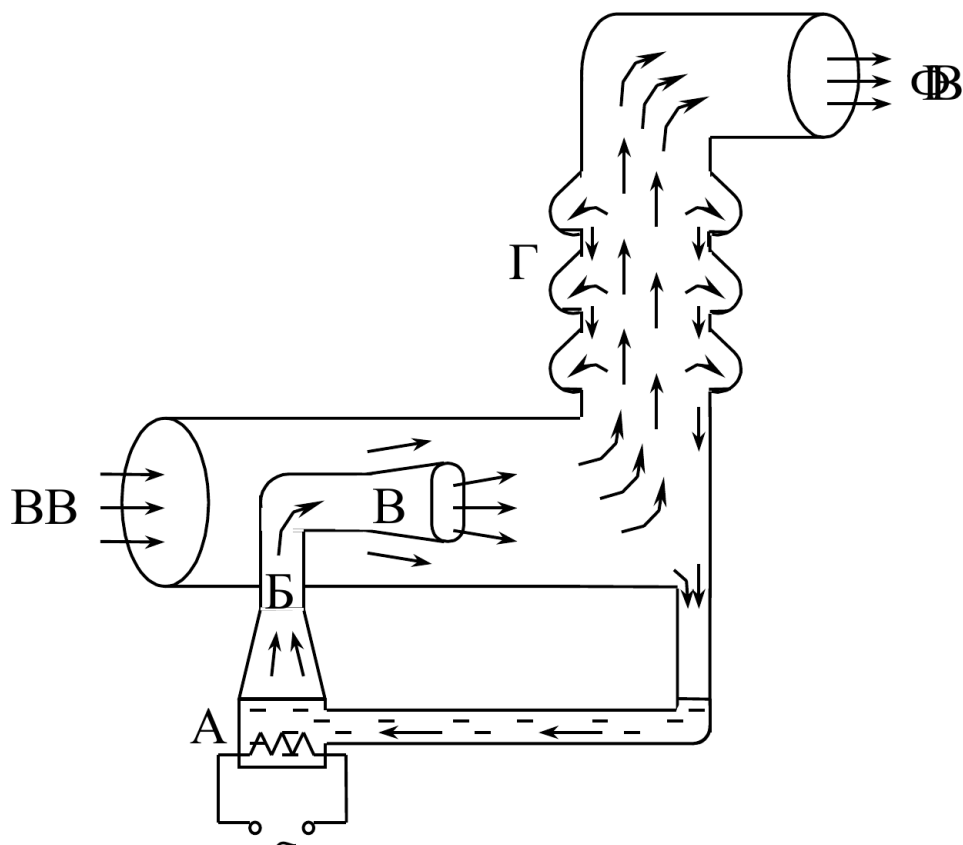


Рис. 3: Схема действия диффузионного насоса.

Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Далее смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубки ВВ. В этом случае пары масла увлекают молекулы воздуха из всего сечения зазора.

Включать ВН стоит только при уже имеющемся вакууме  $5 \cdot 10^{-2}$  торр. После включения ВН, давление в системе сначала будет подниматься. Через десять минут масло начнет испаряться, а ВН - работать.

## 1.3 Масляный манометр (М).

Две U-образные трубки, наполовину заполненные маслом. Разница давления измеряется по разнице высот масла в двух трубках.

$$\rho \approx 0.885 \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \quad (1.1)$$

$\rho$  - плотность масла в масляном манометре.

## 1.4 Термопарный манометр.

(см. рис. 4)

По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла окружающее пространство. Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях  $>1$  торр теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает. При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает и температура спая возрастает. При вакууме  $10^{-3}$  торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими видами потерь тепла и температура нити становится практически постоянной.

Градуировочная кривая термопарного манометра приведена на (см. рис. 5).

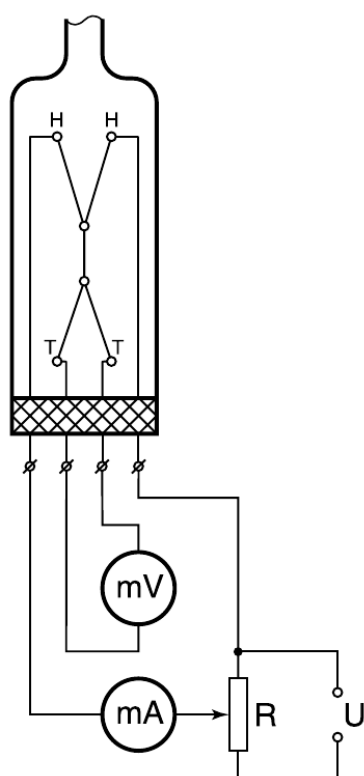


Рис. 4: Схема термопарного манометра.

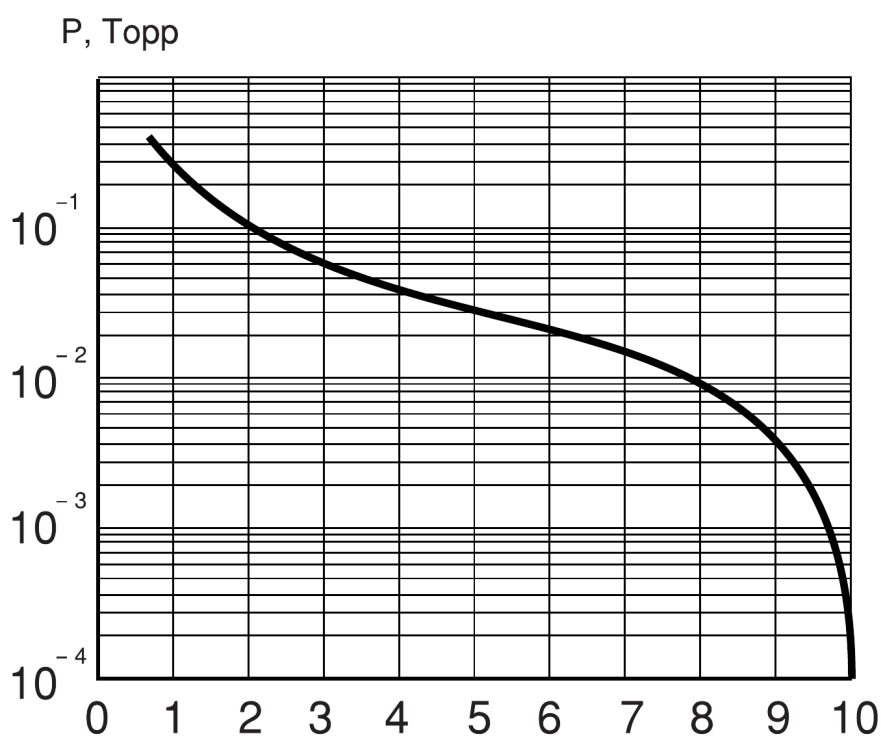


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары.

## 1.5 Ионизационный манометр.

Схема ионизационного манометра изображена на (см. рис. 6). Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления. Вероятность ионизации зависит от рода газа, заполняющего лампу (а значит, и откачиваемый объем). Калибровка манометра верна, если остаточным газом является воздух. Накалившийся катод ионизационного манометра перегора-

ет, если давление в системе превышает  $10^{-3}$  торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термопарному манометру, что давление в системе не превышает  $10^{-3}$  торр. При измерении нить ионизационного манометра сильно греется. При этом она сама, окружающие ее электроды и стенки стеклянного баллона могут десорбировать поглощенные ранее газы. Выделяющиеся газы изменяют давление в лампе и приводят к неверным показаниям. Поэтому перед измерениями ионизационный манометр прогревается (обезгаживается) в течение 10–15 мин. Для прогрева пропускается ток через спиральный анод лампы.

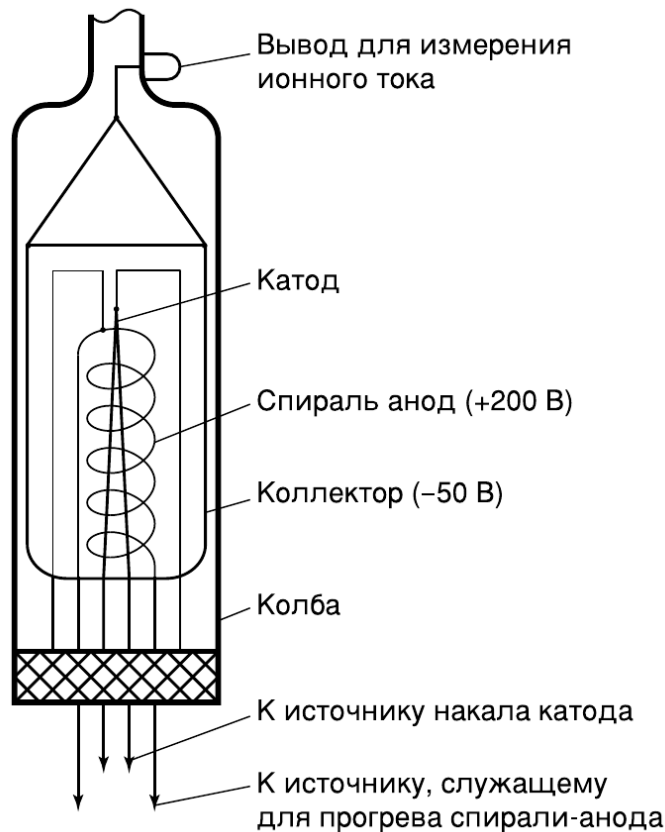


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛМ-2.

## 2 Теоретическая часть

**Процесс откачки:** Производительность насоса определяется скоростью откачки  $W$  (л/с). Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени,  $Q_{и}$  — количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне (через течи).

Будем считать, что насос обладает скоростью откачки  $W$  и в то же время сам является источником газа.

Пусть  $Q_n$  — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему.

Пусть  $Q = Q_d + Q_{и} + Q_n$  (моль/с).

Получаем формулу:

$$-VdP = (PW - Q \cdot RT) dt \quad (2.1)$$

При предельном давлении  $dP = 0$  и поэтому получаем:

$$P_{пр}W = Q \cdot RT; \quad W = \frac{Q \cdot RT}{P_{пр}} \quad (2.2)$$

Подставляя получаем

$$-VdP = W(P - P_{\text{пр}}) dt \quad (2.3)$$

Интегрируем полученное ур-е и получаем

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (2.4)$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{\text{пр}} \quad (2.5)$$

Как видим, величина  $\tau = V/W$  показывает характерное время откачки системы.

Теперь попробуем понять чем обусловлена скорость откачки. Очевидно, скорость  $W$  зависит от скорости откачки насоса  $W_{\text{н}}$ , но она так же зависит от трубопровода соединяющего насос к откачиваемой части, т.к. если трубопровод не сможет обеспечить достаточное количество газа к входу насоса то, производительность упадет.

Попробуем описать систему математически. Пусть у нас есть насос со скоростью откачки  $W_{\text{н}}$  и трубопровод с пропускной способностью  $C$ . Давление в откачиваемом объеме –  $P_1$ .

$$C(P_1 - P_2) = W_{\text{н}}P_2 \implies P_2 = \frac{CP_1}{C + W_{\text{н}}} \Rightarrow WP_1 = W_{\text{н}}P_2 = \frac{CW_{\text{н}}}{C + W_{\text{н}}}P_1 \quad (2.6)$$

Как видим, для результирующей скорости  $W$  верно соотношение

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C} \quad (2.7)$$

Обобщая это выражение для последовательно соединенных труб получаем

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (2.8)$$

Заметим только что данные формулировки верны при молекулярном режиме течения, когда вязкое трение не имеет большого вклада в движение газа.

**Течение газа через трубу:** Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула (см. формулу 3.6):

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2.9)$$

где  $r$  и  $L$  соответственно радиус и длина трубы. Если пренебречь давлением  $P_1$  у конца, обращенного к насосу, получаем формулу для пропускной способности трубы

$$C_{\text{тр}} = \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (2.10)$$

Для пропускной способности отверстия (например в кранах) имеем формулу

$$C_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (2.11)$$



### 3 Ход работы

#### 3.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверим, что кран К4 открыт. Откроем все краны, кроме К1 и К2.
2. Впустим в установку атмосферный воздух через краны К1 и К2.
3. Закроем краны К5 и К6. В этих кранах и соединяющем их капилляре «запирается»  $V_{\text{зап}}$  воздуха при атмосферном давлении.

$$V_{\text{зап}} = 50 \text{ см}^3$$

4. Закроем краны К1 и К2, включим ФН и дадим ему откачать себя. Подключим установку к ФН краном К2 и откачаем установку до давления  $10^{-2}$  торр.
5. Повернув рукоятку крана К2, отсоединим установку от ФН. Оставим ФН работать.
6. Закроем К3.
7. Закроем К4.
8. Откроем К5.
9. Зная  $V_{\text{зап}}$  (см. п. 3) и  $\Delta h_{1,2}$ , найдем, пользуясь законом Бойля–Мариотта, объем  $V_{\text{фв}}$  форвакуумной части. Считаем, что объем труб мал, по сравнению с  $V_{\text{фв}}$  и  $V_{\text{вв}}$ .

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_1 V_{\text{фв}} \implies V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{P_1} \quad (3.1)$$

$$P = \rho g \Delta h. \quad (\rho : \text{1.1}) \quad (3.2)$$

$$\Delta h_1 = (25.3 \pm 0.1) \text{ см}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= (25.3 \pm 0.1) \text{ см} \\ P_1 &= (18.6 \pm 1.9) \text{ торр} \\ V_{\text{фв}} &= (2017 \pm 206) \text{ см}^3 \end{aligned}$$

10. Откроем кран К3.  
Газ, занимавший  $V_{\text{фв}}$ , заполнит и высоковакуумную часть. Измерим показания манометра. Рассчитаем полный объем установки и объем высоковакуумной ее части  $V_{\text{вв}}$ .

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_2 (V_{\text{фв}} + V_{\text{вв}}) \implies V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{P_2} - V_{\text{фв}} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_2 &= (16.3 \pm 0.1) \text{ см} \\ P_2 &= (12.0 \pm 1.2) \text{ торр} \\ V_{\text{вв}} &= (1113 \pm 380) \text{ см}^3 \end{aligned}$$

11. Откроем К4.
12. Повторим измерения 1 - 10 еще раз.  
Результат:

$$\begin{aligned}\Delta h_1 &= (25.3 \pm 0.1) \text{ см} \\ P_1 &= (18.6 \pm 1.9) \text{ торр} \\ V_{\text{фв}} &= (2017 \pm 206) \text{ см}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta h_2 &= (16.2 \pm 0.1) \text{ см} \\ P_2 &= (11.9 \pm 1.2) \text{ торр} \\ V_{\text{вв}} &= (1133 \pm 382) \text{ см}^3\end{aligned}$$

Получили схожие значения.

### 3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

1. Откачаем установку с помощью ФН.
2. Включим термопарные манометры, установим их токи согласно паспортам. Переключим прибор в режим измерения ЭДС и определим давление в установке по градуировочной кривой
3. По достижении форвакуума закрываем  $K_6$  и начинаем откачку высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса, для этого включаем нагреватель масла в ВН и ждем 10 минут, пока масло не начнет испаряться.
4. Включим ионизационный манометр. Воспользуемся инструкцией.
5. Измерим предельное давление  $P_{\text{пр}}$  в системе.

$$P_{\text{пр}} \approx 9.7 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \approx 0.013 \text{ Па}$$

6. Измерим скорость ухудшения и улучшения вакуума.
  - (a) Закроем К3.  
Из за течей, Вакуум в ВБ начнет ухудшаться, а давление  $P$  — возрастать.
  - (b) Измерим зависимость  $P$  на ионизационном манометре от времени (см. т. 1).  
Изобразим результаты на графике (см. рис. 7).
  - (c) Когда  $P$  станет равным  $(5 - 9) \cdot 10^{-4}$  Па, откроем К3.  
Вакуум в ВБ начнет улучшаться, а давление  $P$  — убывать.
  - (d) Измерим зависимость  $P$  на ионизационном манометре от времени (см. т. 4).  
Изобразим результаты на графике (см. рис. 8).

Расчитаем  $W$  по наклону линий тренда на графиках 8 и 10.

Пусть наклон —  $\alpha$ , тогда по ур-ию (2.5):

$$W = -\alpha \cdot V \tag{3.4}$$

$V$  — откачиваемый объем

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= (-0.202 \pm 0.004) \text{ 1/c} \\ \alpha_4 &= (-0.195 \pm 0.003) \text{ 1/c} \\ \langle \alpha \rangle &= (-0.199 \pm 0.004) \text{ 1/c}\end{aligned}$$

$$\langle W \rangle = (223 \pm 76) \text{ мл/с}$$

7. Оценим  $Q_n$ .

Для этого воспользуемся полученными данными при ухудшении вакуума.  
(см. таблицу 3, см. графики (7, 9))

В данном процессе справедлива следующая формула:

$$V_{\text{вв}} dP = (Q_d + Q_n) dt \quad (3.5)$$

Также воспользуемся (2.2).

Получим:

$$Q_n = \frac{1}{RT} (P_{\text{пр}} W - V_{\text{вв}} \frac{dP}{dt}) \quad (3.6)$$

$$Q_n = (-3.336 \pm 3.291) \text{ моль/с}$$

8. Проведем измерения 6 - 7 еще раз.

9. Откроем кран К6. Вакуум в установке должен ухудшиться. Измерим установившееся давление  $P_{\text{уст}}$  и давление со стороны форвакуумной части капилляра.

$$\begin{aligned}P_{\text{уст}} &\approx 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ торр} \\ P_{\text{фв}} &\approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ торр}\end{aligned}$$

10. Рассчитаем производительность насоса по различию  $P_{\text{уст}}$  и  $P_{\text{пр}}$ . Для этого найдите количество газа, протекающего через капилляр, по

$$P_{\text{пр}} W = Q_1, \quad P_{\text{уст}} W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{капилляр}}}{dt} \quad (3.7)$$

По формуле (2.9):

$$(P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}) W = \frac{4}{3} (d/2)^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{фв}}}{L} \quad (3.8)$$

$$W = (4.12 \pm 1.97) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с} = (0.412 \pm 0.197) \text{ мл/с}$$

$$\varepsilon_W \approx 48\% \text{ !?}$$

11. Выключим установку.

	t, c	P, торр · 10 <sup>-5</sup>
0	22.06	11
1	25.07	12
2	26.19	13
3	27.18	14
4	29.04	15
5	30.03	16
6	31.04	17
7	32.22	18
8	33.22	19
9	35.06	20
10	36.16	21
11	37.22	22
12	39.03	23
13	40.03	24
14	41.22	25
15	43.15	26
16	44.04	27
17	45.21	28
18	47.04	29
19	48.04	30
20	49.16	31
21	51.07	32
22	52.18	33
23	53.22	34
24	55.04	35
25	56.18	36
26	58.04	37
27	59.04	38
28	60.19	39
29	62.03	40
30	63.24	41
31	64.21	42
32	66.09	43
33	67.21	44
34	69.06	45
35	70.21	46
36	72.06	47
37	73.19	48
38	74.25	49
39	76.09	50
40	77.21	51
41	79.06	52
42	80.18	53
43	82.03	54
44	83.21	55
45	85.04	56
46	86.18	57
47	87.19	58
48	89.06	59
49	90.21	60
50	92.04	61
51	93.21	62

Таблица 1: first devacuuming

	t, c	P, торр · 10 <sup>-5</sup>
0	169.02	12
1	171.16	13
2	173.01	14
3	174.02	15
4	175.18	16
5	176.16	17
6	178.01	18
7	178.3	19
8	180.15	20
9	181.15	21
10	182.3	22
11	183.3	23
12	185.15	24
13	186.18	25
14	188.03	26
15	189.02	27
16	190.16	28
17	191.3	29
18	193.04	30
19	194.17	31
20	196.05	32
21	197.01	33
22	198.15	34
23	200.01	35
24	201.02	36
25	202.16	37
26	204.04	38
27	205.01	39
28	206.17	40
29	207.3	41
30	209.16	42
31	210.3	43
32	211.3	44
33	213.16	45
34	215.02	46
35	216.17	47
36	217.18	48
37	219.01	49
38	220.16	50
39	222.01	51
40	223.16	52
41	224.3	53
42	226.15	54
43	227.15	55
44	229.01	56
45	230.15	57
46	232.01	58
47	233.15	59
48	234.3	60
49	236.01	61
50	237.18	62

Таблица 2: second devacuuming

	t, c	P, торр · 10 <sup>-5</sup>
0	237.18	62
1	238.17	61
2	239.17	60
3	240.03	58
4	240.18	56
5	241.02	53
6	241.17	49
7	242.02	46
8	242.17	43
9	243.03	39
10	243.18	36
11	244.02	33
12	244.16	31
13	245.04	28
14	245.16	26
15	246.03	25
16	246.17	23
17	247.02	22
18	247.16	21
19	248.01	20
20	248.17	19
21	249.04	18
22	249.15	17
23	250.17	16
24	251.15	15
25	253.02	14
26	254.18	13
27	257.02	12
28	264.02	11

	t, c	P, торр · 10 <sup>-5</sup>
0	93.21	62
1	95.04	61
2	96.02	59
3	96.16	57
4	97.01	54
5	97.17	51
6	98.02	47
7	98.16	43
8	99.02	40
9	99.17	36
10	100.02	33
11	100.17	30
12	101.01	28
13	101.16	26
14	102.01	24
15	102.17	23
16	103.01	21
17	103.18	20
18	104.02	19
19	105.02	18
20	105.17	17
21	106.01	16
22	107.01	15
23	108.16	14
24	110.02	13
25	113.02	12
26	117.01	11

Таблица 5: second revacuuming

Таблица 4: first revacuuming

Таблица 6: Данные зависимости давления от времени при улучшении вакуума (см. пункт 6 выполнения).

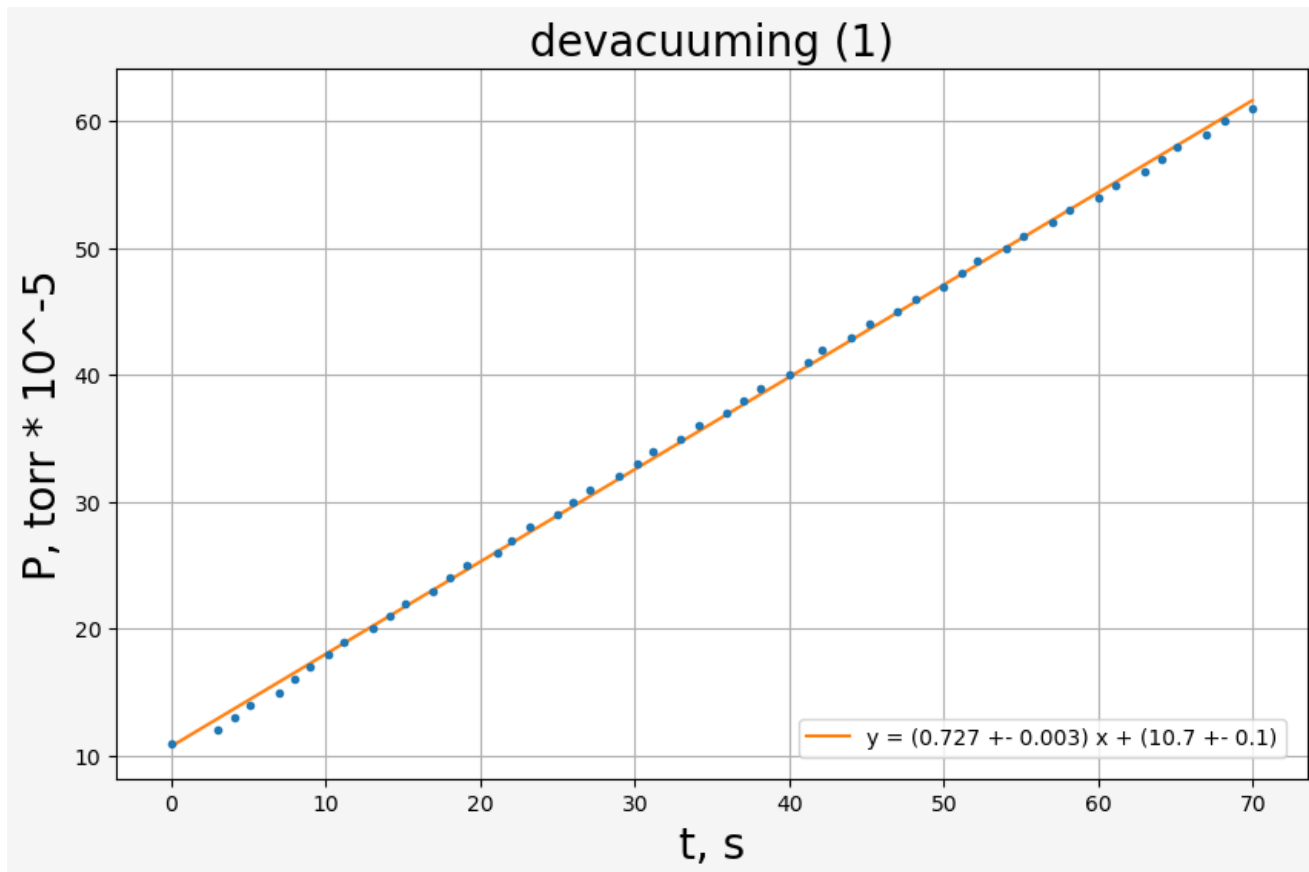


Рис. 7: График зависимости давления от времени при ухудшении вакуума (1).

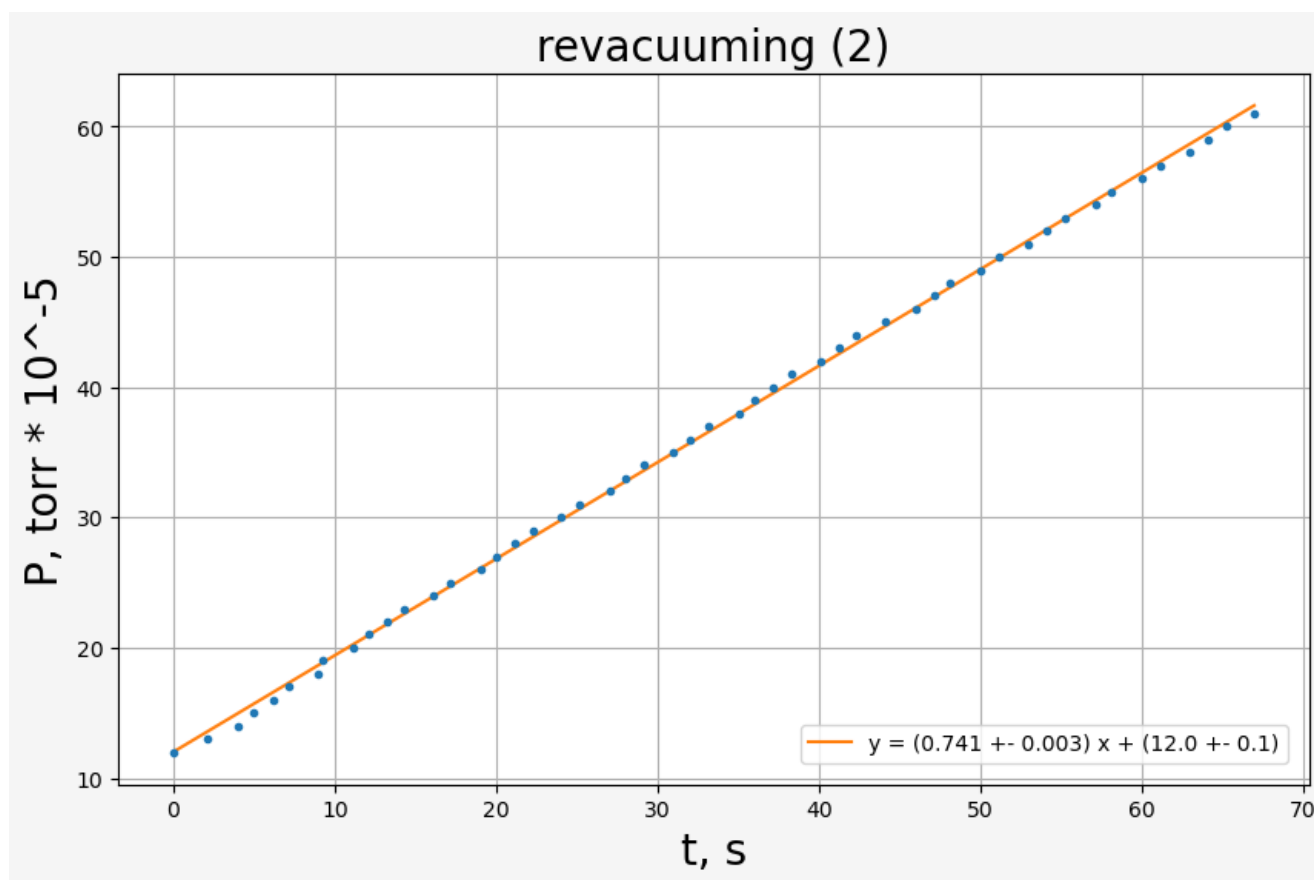


Рис. 8: График зависимости давления от времени при улучшении вакуума (1).

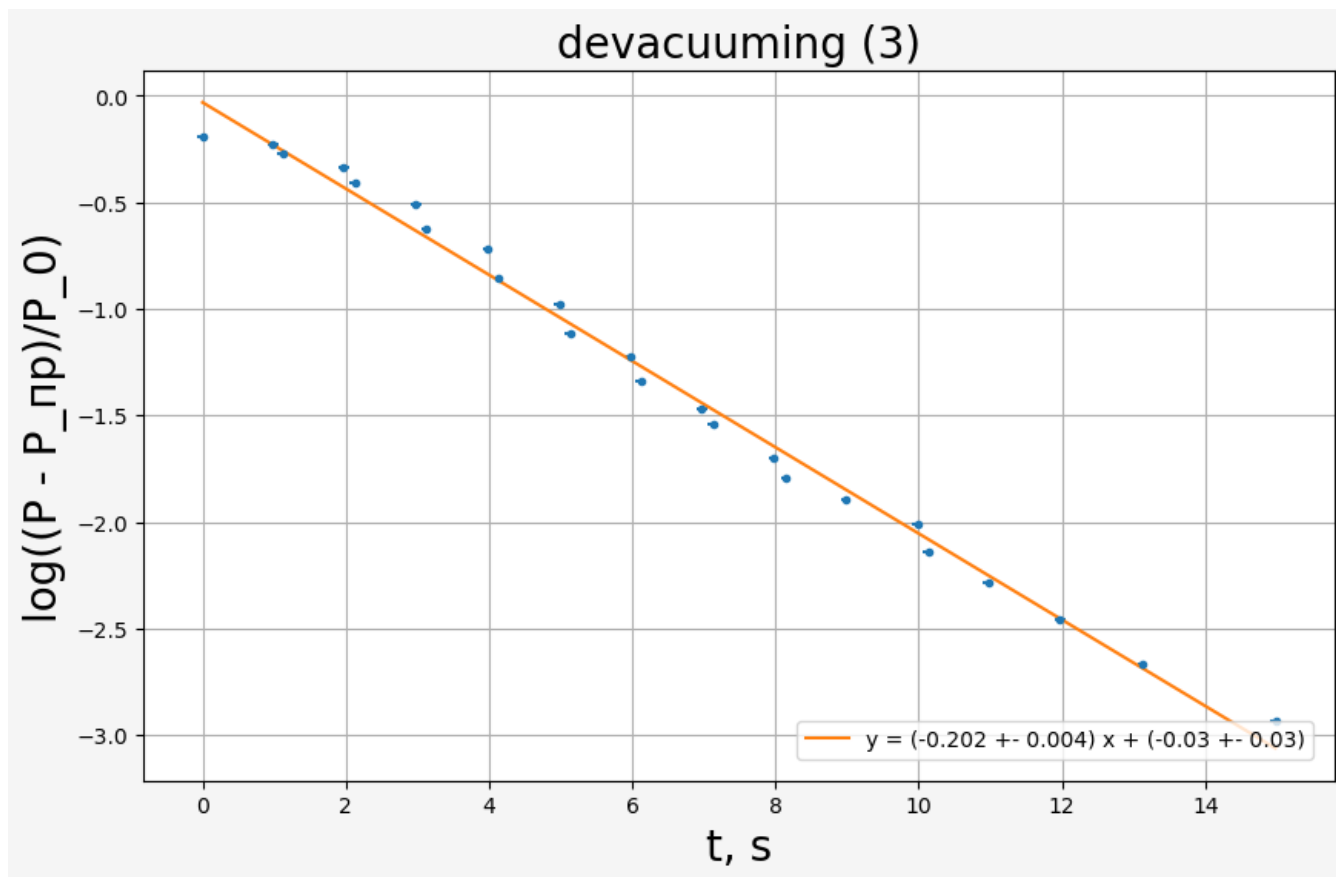


Рис. 9: График зависимости давления от времени при ухудшении вакуума (2).

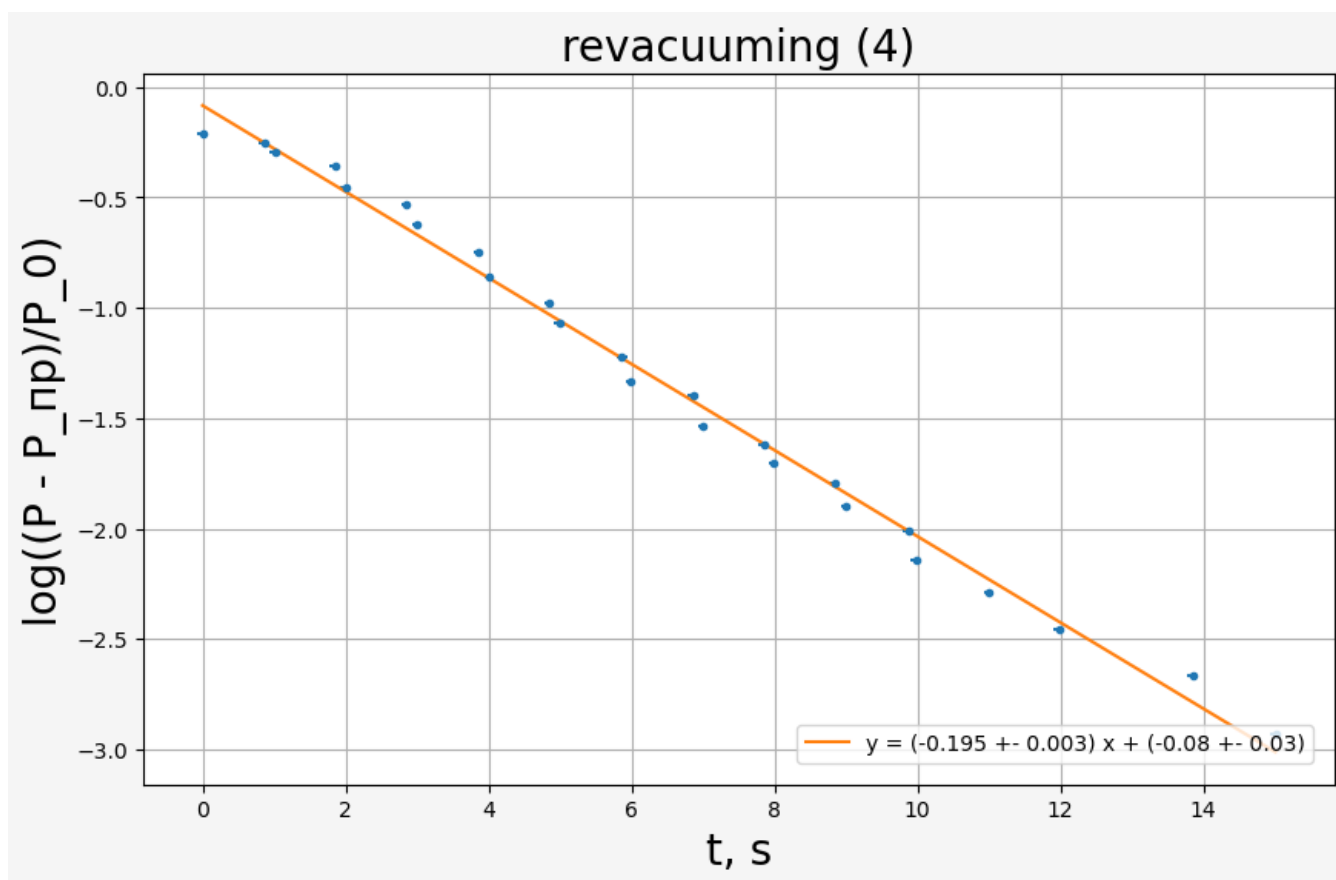


Рис. 10: График зависимости давления от времени при улучшении вакуума (2).



## 4 Вывод.

В результате лабораторной работы мы нашли объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки. Определили скорости ухудшения и улучшения вакуума по зависимостям  $P(t)$  (см. графики и таблицы).

Нашли  $W$  двумя способами.

МНК: 6

По ф-ле Кнудсена: 10

Значения получились совершенно разные

Нашли  $Q_n$ . 7