

Работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Дмитрий Тихонов, ФРКТ, Б01-206

15 февраля 2023 г.

Введение

Цель работы:

изучение принципов получения и измерения вакуума в экспериментальном стенде на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста, вакууметров.

В работе используются:

турбомолекулярный насос HiPace 80, форвакуумный насос MVP 015, комбинированный вакуумметр МРТ 100 (В2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон).

Теоретические сведения

Одна из основных характеристик систем, работающих при вакууме – число Кнудсена:

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

где λ – длина свободного пробега молекул газа, d – характерный размер системы.

В зависимости от значений числа Кнудсена определяют:

- низкий вакуум – $Kn \ll 1$
- средний вакуум – $Kn \sim 1$
- высокий вакуум – $Kn \gg 1$

Выделим основные формулы, отображающие теоретические зависимости между исследуемыми величинами.

Скорость откачки:

$$S = \frac{dV}{dt}; \quad (2)$$

Падение давления:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \quad (3)$$

Пропускная способность:

$$U = \frac{Q}{\Delta P}; \quad (4)$$

Основное уравнение вакуумной механики:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{н}} = V \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}}{\Delta t} \quad (6)$$

Проводимость отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{T/m} \quad (7)$$

Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (8)$$

Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (9)$$

Методика измерений и используемое оборудование

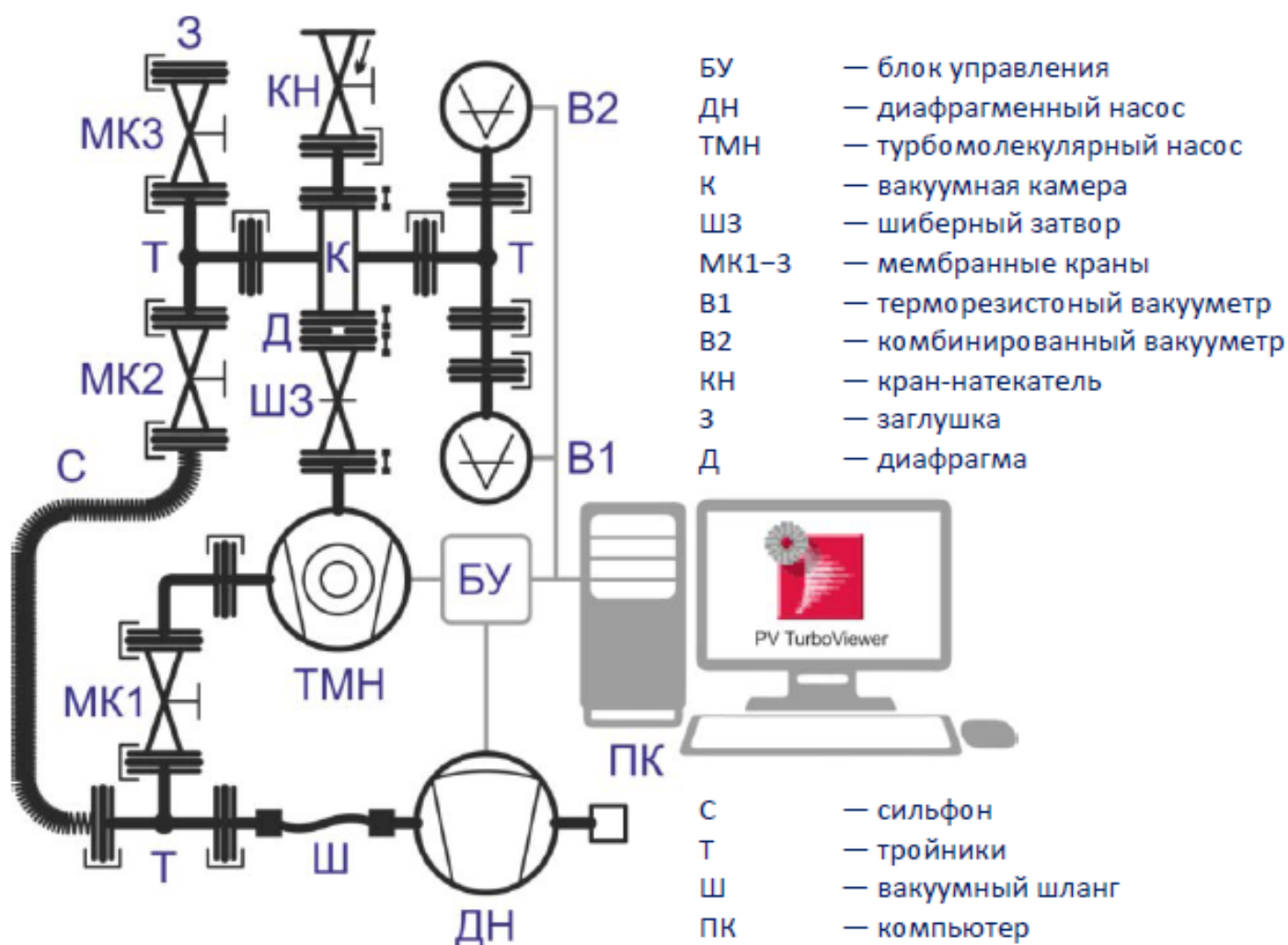


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco с диафрагменным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine, и вакуумных быстроразъёмных компонентов.

Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer8. Вакуумный пост Pfeiffer Vacuum HiCube 80 Eco (PM S03 555 A) выполнен на базе диафрагменного форвакуумного насоса MVP 015 (ДН) и турбомолекулярного насоса HiPace 80 (ТМН). Откачка вакуумной камеры (К) может происходить как двумя насосами (ТМН и ДН) через шиберный затвор (ШЗ) и мембранный кран 1 (МК1), так и только форвакуумным насосом (ДН) по схеме «байпас» (англ. bypass — обходной путь), выполненной на основе вакуумных компонентов: сильфона (С), мембранного крана 2 (МК2), тройников (Т), переходников, шланга (Ш). Для контроля и измерения давления в вакуумной камере используются цифровой вакуумметр PPT 100 (В1) типа Пирани (терморезисторный) и комбинированный вакуумметр MPT 100 (В2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон). Контролируемый напуск воздушной атмосферы в камеру осуществляется через кран-натекатель EVN 116 (КН) с регулируемым потоком. Дополнительный выход с краном 3 (МК3) закрыт заглушкой (З) и служит для присоединения дополнительного объема в случае необходимости.

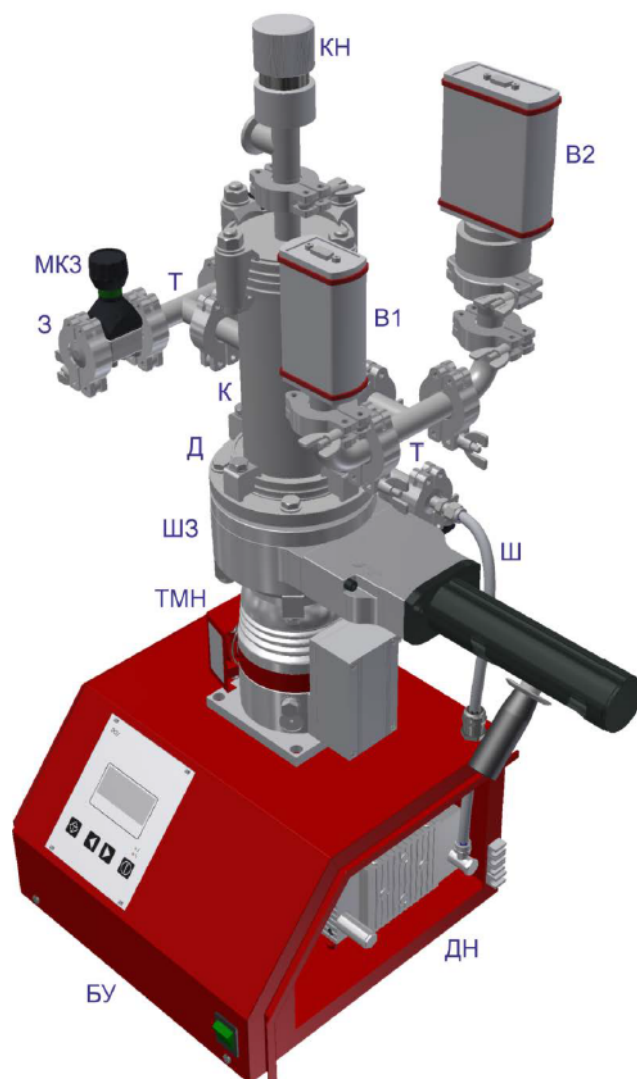


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Результаты измерений и обработка данных

Определение откачиваемого объема

Для определения объемов частей установки (объем вакуумной камеры – V_K , объем форвакуумной магистрали и объем турбомолекулярного насоса – $V_{ф.м. + ТМН}$) воспользуемся законом Бойля-

Мариотта. Для этого необходимо определить давления в различных частях установки. Результаты измерений были занесены в таблицу 1.

$p_{\text{атм}}$, мбар	p_1 , мбар	p_2 , мбар	p_3 , мбар
1000.0	5.1	280.0	170.0

Таблица 1: Результаты измерения давления при различных конфигурациях системы.

Используя закон Бойля-Мариотта и зная, что $V_{\text{сильф}} = 265$ мл получаем соотношения:

$$V_K = \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{p_2 - p_1} V_{\text{сильф}} = 694 \text{ мл} \quad (10)$$

$$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}} = \frac{(p_3 - p_2)(V_K + V_{\text{сильф}})}{p_1 - p_3} = 640 \text{ мл} \quad (11)$$

Отсюда, полный объём установки:

$$V_0 = V_K + V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}} = 1334 \text{ мл}$$

Измерение скорости откачки форвакуумным насосом

Рассмотрим откачку установки форвакуумным насосом. Построим график зависимости давления от времени (рис. 3, рис. 4).

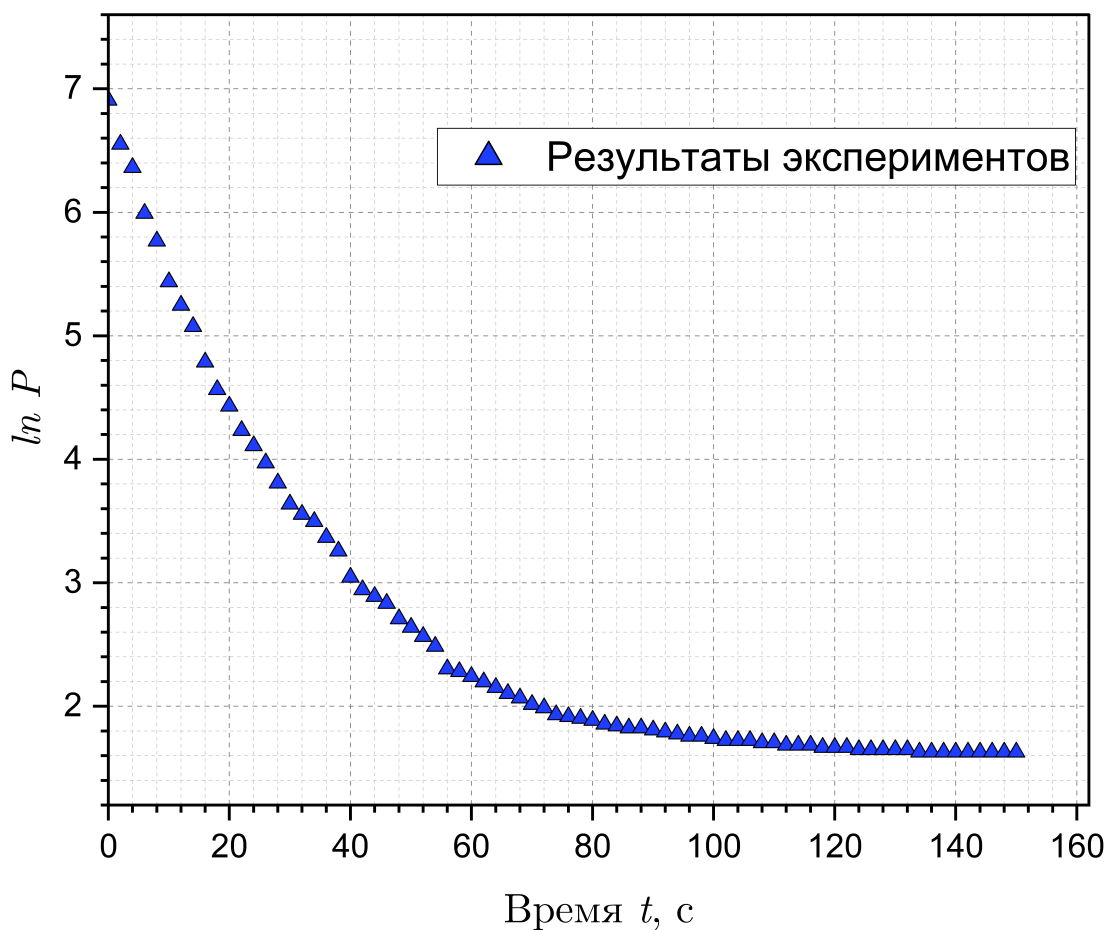


Рис. 3: Зависимость давления от времени для откачки форвакуумным насосом

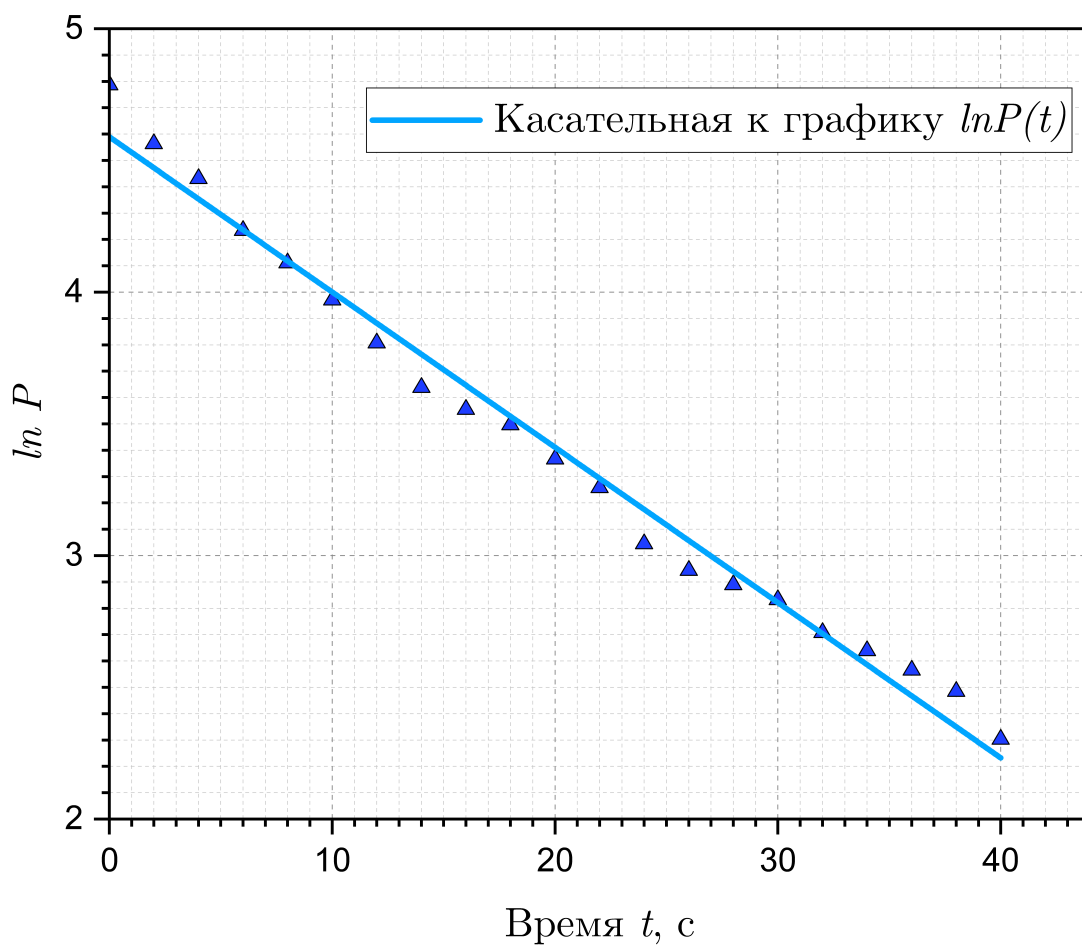


Рис. 4: Зависимость давления от времени для откачки форвакуумным насосом (касательная)

Характеристики откачки можно получить по основному уравнению вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U} \quad (12)$$

τ , с	S_0 , мл/с	S_H , мл/с	U , мл/с
17.0 ± 0.5	78 ± 3	140	176 ± 7

Таблица 2: Характеристики откачки форвакуумным насосом

Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом

Рассмотрим откачку установки турбомолекулярным насосом. Построим график зависимости давления от времени (рис. 5, рис. 6).

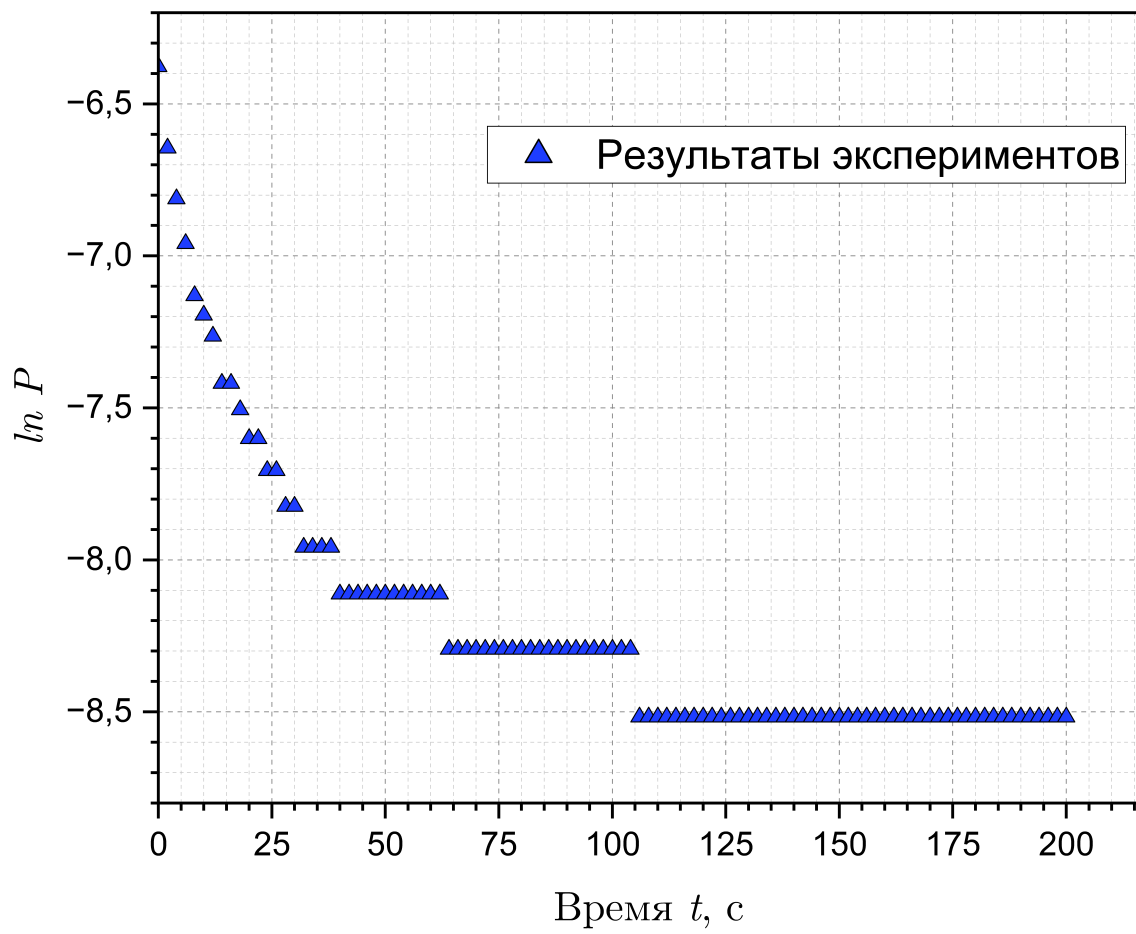


Рис. 5: Зависимость давления от времени для откачки турбомолекулярным насосом

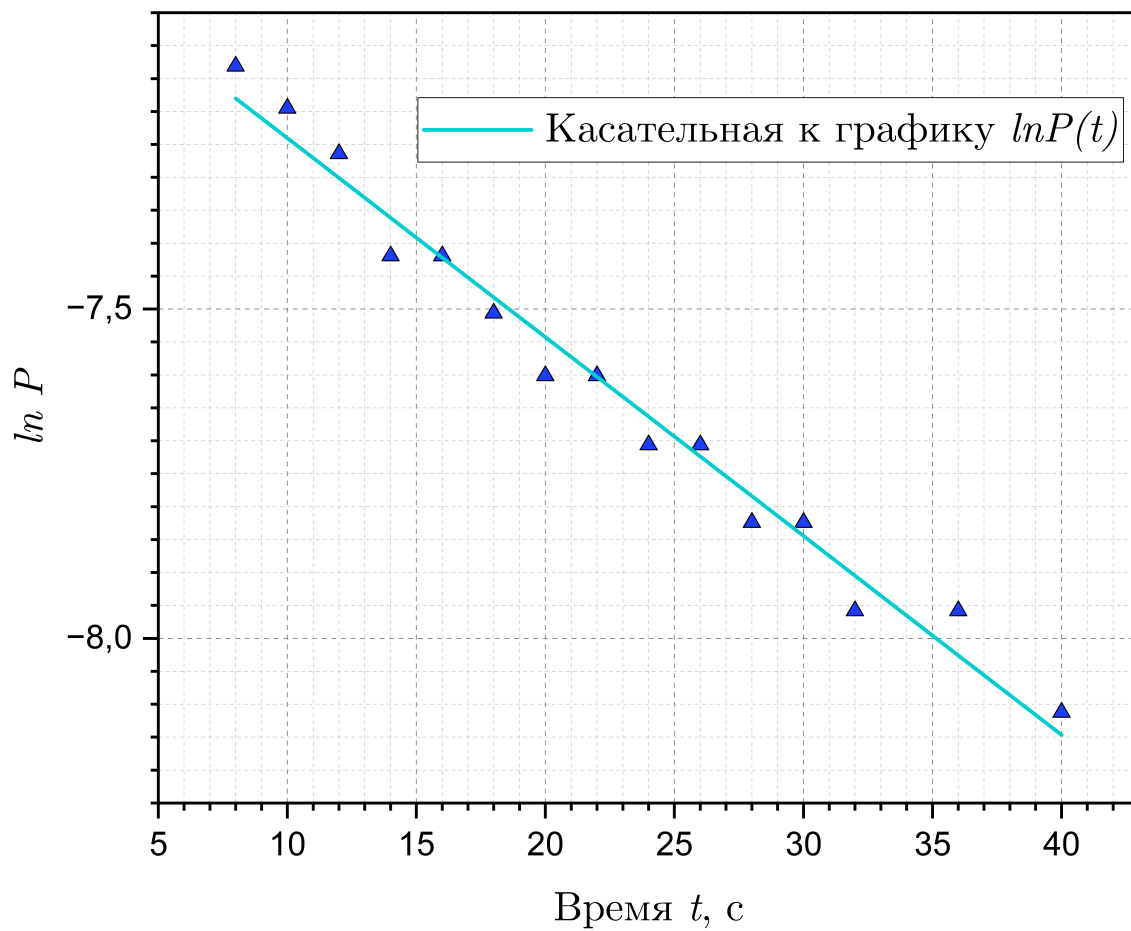


Рис. 6: Зависимость давления от времени для откачки турбомолекулярным насосом (касательная)

Характеристики откачки можно получить по основному уравнению вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U} \quad (13)$$

τ , с	S_0 , мл/с	S_H , мл/с	U , мл/с
33 ± 1	42 ± 2	60000	42 ± 2

Таблица 3: Характеристики откачки турбомолекулярным насосом

Оценка уровней течей

Найдем натекание при закрытии насоса шлюзом, используя значения давления в эти моменты.

$$Q_H = V \frac{P_K - P_H}{\Delta t} \approx 10^{-5} \text{ Дж/с} \quad (14)$$

Проверим допустимость натекания:

$$10^{-7} \text{ Дж/с} = Q_H \ll Q = P_1 S_0 = 10^{-2} \text{ Дж/с} \quad (15)$$

Вследствие этого неравенства натекание в системе можно считать допустимым.

Исследование зависимости мощности турбины насоса от давления в камере

Построим график зависимости $p(W)$ в диапазоне предельных давлений. Данный график изображен на рис. 7.

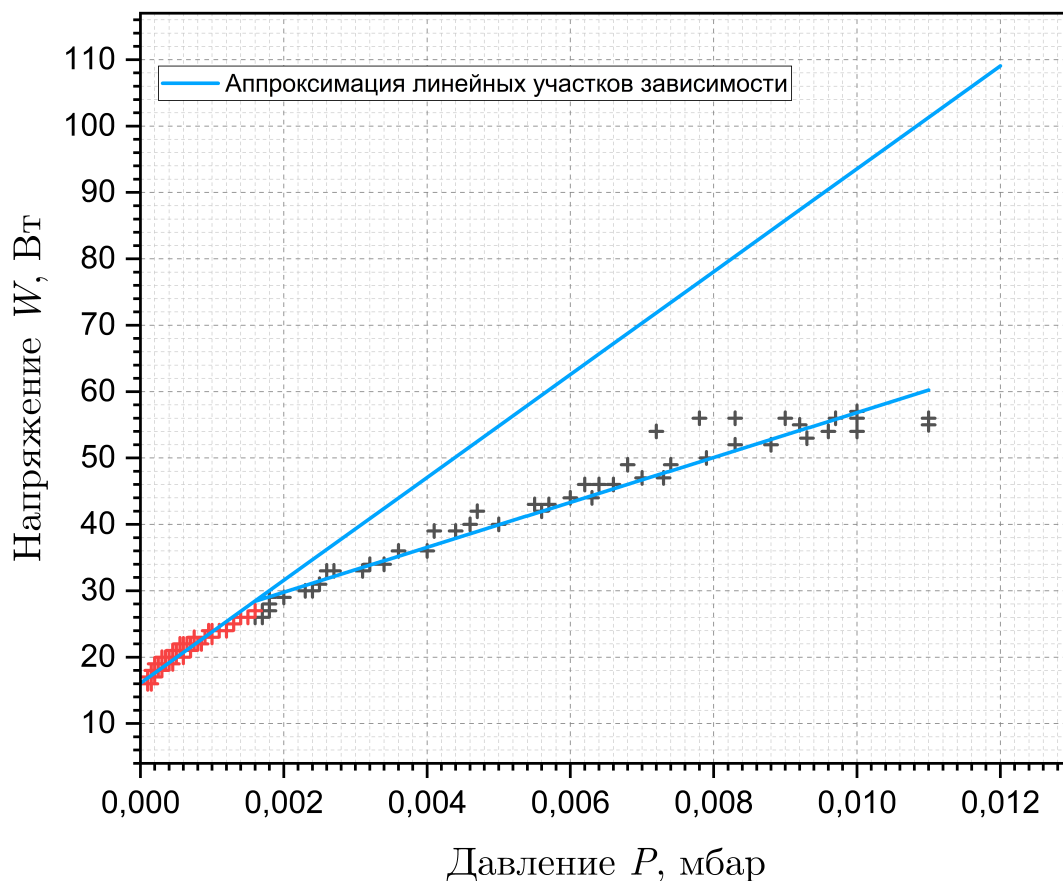


Рис. 7: График зависимости W от P

Как видно из графика, полученная зависимость имеет линейный характер с характерным переходным процессом. Данный переходный процесс можно считать моментом перехода в молекулярный режим течения газа.

Давление, при котором происходит переход в молекулярный режим течения: $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ мбар при данном давлении мощность турбины насоса составляла 27-28 Вт. Наглядно просматривается зависимость эффективности работы турбомолекулярного насоса от предельного давления в камере насоса.

График $W(P)$ имеет вид линейной зависимости исходя из основного уравнения вакуумной механики и формулы для проводимости длинного трубопровода.

Оценка числа Кнудсена для предельных давлений

Рассчитаем число Кнудсена для предельных давлений по формуле:

$$Kn = \frac{\lambda}{d} = \frac{1}{\sqrt{2}nd\sigma} = \frac{kT}{\sqrt{2}d\sigma p} \quad (16)$$

где $\sigma = 4.3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$. Тогда получим следующие значения для числа Кнудсена (считая диаметр магистрали порядка 1 см):

Часть установки	P , мбар	Kn
Форвакуумная магистраль	5.2	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Форвакуумная магистраль	$1.5 \cdot 10^{-4}$	50

Таблица 4: Число Кнудсена для предельных давлений

Откуда получаем, что после откачки турбомолекулярным насосом число Кнудсена $Kn \gg 1$, что свидетельствует о молекулярном (кнудсеновском) режиме течения газа.

Заключение

- в результате проведения эксперимента было выявлено, что установка работает корректно, то есть натеканием воздуха можно пренебречь при выполнении условий проведения опыта;
- было найдено давление, при котором наступает молекулярный режим течения газа (воздуха);
- был вычислен коэффициент Кнудсена, который доказал применимость полученных теоретических формул;
- подтверждено большинство теоретических зависимостей, исследуемых в данной работе, все результаты укладываются в рассчитанные значения с учётом погрешности.

Задания к лабораторной работе 2.3.1

Задание №1

Оценить среднее время пробега молекул азота при комнатной температуре и давлении 10^{-4} торр.
Решение:

1. Выразим среднюю длину свободного пробега молекул азота. Как показал Максвелл, среднее число столкновений одной молекулы с другими равно: $z = \sqrt{2}\pi d^2 n \bar{v}$. Средняя длина свободного пробега вычисляется по формуле: $\lambda = \frac{\bar{v}}{z} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\sigma p}$
2. Выразим среднюю скорость теплового движения молекул азота: $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$
3. Отсюда, получаем среднее время пробега молекул азота при комнатной температуре: $\tau = \frac{\lambda}{\bar{v}} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\sigma p} \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} = \frac{k_B}{\sigma p} \sqrt{\frac{\pi\mu T}{16R}} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23}}{4.3 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-4} \cdot 133.3} \sqrt{\frac{3.14 \cdot 0.028 \cdot 293}{16 \cdot 8.31}} \text{ с} \approx 1 \text{ мс}$

Ответ : 1 мс

Задание №2

Оценить количество молекул газа, удаляемых за 1 секунду из высоковакуумной части установки в конце работы турбомолекулярного насоса (когда установится предельное давление).

Решение:

1. В конце работы турбомолекулярного насоса устанавливается стационарный режим. Из результатов лабораторной работы известно, что натекание равно $Q_H = V \frac{P_K - P_H}{\Delta t} \approx 10^{-5} \text{ Дж/с}$.
2. Из уравнения Менделеева-Клайперона, получим: $\frac{\Delta \nu_H}{\Delta t} = \frac{Q_H}{RT} = \frac{10^{-5}}{8.31 \cdot 293} \frac{\text{моль}}{\text{с}} = 4.1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{моль}}{\text{с}}$.
3. Отсюда, получаем итоговое соотношение: $\frac{\Delta N_{\text{ТМН}}}{\Delta t} = \frac{\Delta \nu_H}{\Delta t} N_A = 4.1 \cdot 10^{-9} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \text{ с}^{-1} = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

Ответ : $2.5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$

Задание №3

Оцените минимальное значение мощности, потребляемой турбомолекулярным насосом в установившемся режиме.

Решение:

1. Из документации диаметр ротора равен $d = 25 \text{ мм}$, предельное давление равно $p = 5.2 \text{ мбар}$, количество оборотов ротора насоса равно $f = 90000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$
2. Мощность ротора равна: $N = M \cdot \omega = \frac{\pi^2 f p d^3}{8} \approx 15 \text{ Вт}$

Полученное значение совпадает с экспериментальным.

Ответ : 15 Вт