

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"НИУ ВШЭ"

Факультет физики

24 ноября 2021 г.

Лабораторная работа по теме: "Основы
вакуумной техники"

Работу выполнил: Горяной Егор

Москва, 2020

Теоретическая часть

Применение вакуума:

- напыление пленок и металлических контактов высокого качества
- приготовление чистой поверхности для исследования свойств материалов поверхностными методами (например, для сканирующей туннельной микроскопии)
- ускорители элементарных частиц
- вакуумная теплоизоляция (актуально в криогенных установках, адиабатических калориметрах и т.п.)

Ключевыми параметрами, определяющими степень вакуума, являются средняя длина свободного пробега молекул газа, среднее время образования мономолекулярного слоя. Эти величины могут быть оценены на основе элементарной кинетической теории газов по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n(2r)^2}, \tau = \frac{4a}{nv}, v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

Где λ — длина свободного пробега, τ — время образования атомного слоя, v — скорость (все величины усреднены), n — концентрация молекул, r — радиус молекул, a — число адсорбирующих позиций на единицу площади поверхности, k — постоянная Больцмана, m_0 — масса молекулы

Обычно выделяют несколько диапазонов давления, отличающихся режимами молекулярно-кинетических явлений в вакуумной системе:

- низкий вакуум: $1000 - 1$ мбар
- средний вакуум: $1 - 10^{-3}$ мбар
- высокий вакуум: $10^{-3} - 10^{-7}$ мбар
- ультравысокий вакуум: $10^{-7} - 10^{-14}$ мбар

Линии откачки

Важнейшей характеристикой линии откачки является ее пропускная способность, которая определяется так:

$$C = \frac{q_{pV}}{\Delta p}$$

где q_{pV} —поток газа через линию в единицах pV , а Δp —разность давлений на ее концах

Если линия откачки состоит из нескольких элементов с пропускными способностями C_1, C_2, \dots

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

Пропускная способность линий откачки существенно зависит от соотношения между диаметром линии d и средней длиной свободного пробега молекул газа λ . По этому критерию условно можно выделить 3 режима течения газа:

- Вязкий поток $\lambda < \frac{d}{100}$
- Кнудсеновский поток $\frac{d}{100} < \lambda < \frac{d}{2}$
- Молекулярный поток $\lambda > \frac{d}{2}$

Вакуумный насос

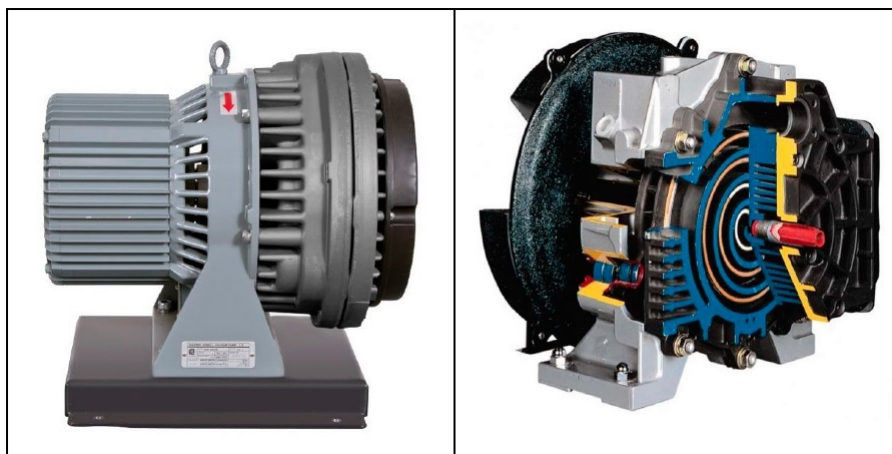


Рис. 1. Спиральный насос

В нашей работе используются спиральный безмасляный форвакуумный насос и турбомолекулярный откачной пост. Внешний вид и внутреннее устройство спирального насоса показаны на Рис. 1. Основной его частью являются неподвижная и вращающаяся платформы с выступом в виде спирали. При вращении одной из платформ происходит сжатие и вытеснение газа из рабочего объема.

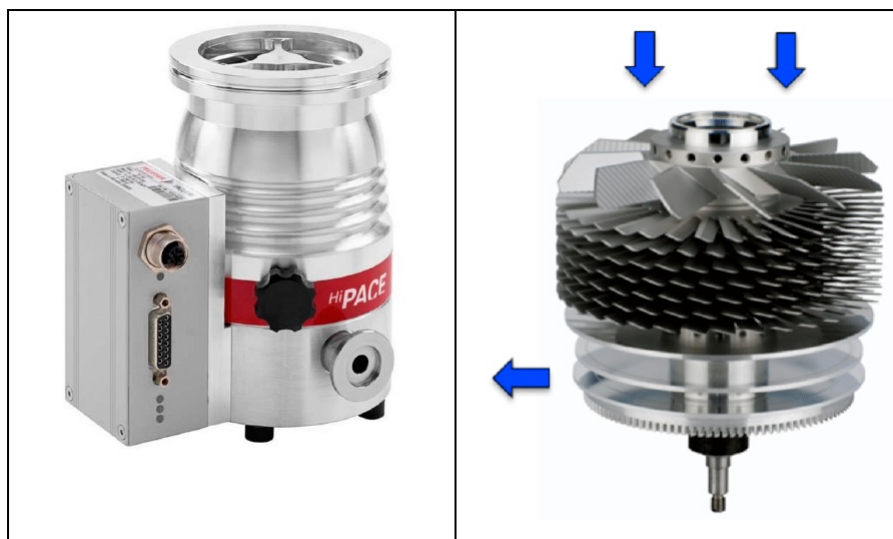


Рис. 2. Турбомолекулярный насос

Принцип работы турбомолекулярного насоса основан на механическом удалении из рабочего объема молекул газа при помощи быстро раскрученной турбины. Для работы такого насоса необходим вспомогательный форвакуумный насос, который часто выполняется в виде мембранного насоса, ввиду его простоты, компактности и дешевизны. Примеры внешнего вида турбомолекулярного насоса и турбины показаны на Рис. 2.

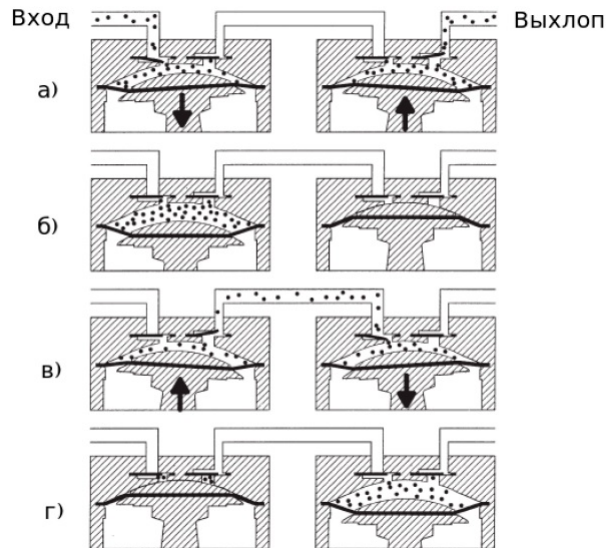


Рис. 3. Принцип работы двухстадийного мембранного насоса

Мембранный насос - еще одна разновидность форвакуумного насоса. Принцип его работы проиллюстрирован на Рис. 4.

Важнейшей характеристикой насоса является его быстрота действия, которая определяется как объем газа, проходящий в единицу времени через входной патрубок насоса:

$$S = -\frac{dV}{dt}$$

Эта величина, как правило, зависит от давления на входе насоса. Существует два основных метода определения быстроты действия насоса - метод постоянного объема и постоянного давления. В методе постоянного объема мы следим за тем, как давление падает со временем в герметично закрытом объеме известной величины. При этом наклон зависимости логарифма давления от времени в каждой точке дает мгновенную быстроту действия насоса. В методе постоянного давления в откачиваемый объем запускают газ, причем поток этого газа известен. Тогда по зависимости установившегося давления в сосуде от потока натекания также можно определить быстроту действия насоса как функцию давления.

С практической точки зрения, важно понимать, что быстрота действия на-

соса зависит от давления на его входе и при достаточно низком давлении падает почти до нуля. Это давление разное для каждого конкретного типа и модели насоса.

Датчики вакуума

Для измерения вакуума используются датчики давления различного принципа действия. Для каждого диапазона давлений наиболее эффективным оказывается какой-то свой тип датчиков. Несколько важнейших типов датчиков приведено в таблице ниже:

Низкий вакуум, мбар			Средний вакуум, мбар				Высокий вакуум, мбар				Сверхвысокий вакуум, мбар			
1000	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Гидростатические														
Деформационные														
		Компрессионные												
	Тепловые													
						Ионизационные								
		Электроразрядные												
									Инверсно-магнетронные					

Одним из распространённых типов деформационных датчиков являются емкостные датчики. В датчиках этого типа под действием разности давлений происходит деформация керамической мембраны с металлическим напылением, являющейся одновременно одной из обкладок конденсатора. Таким образом изменение электрической емкости оказывается напрямую связано с дав-

лением. Наиболее распространенными тепловыми преобразователями являются термопарный и терморезистивный (конструкции Пирани). В датчиках этого типа присутствует электрический нагреватель. Его температура связана с эффективностью теплоотвода, который зависит от давления. Контроль температуры происходит либо при помощи термопары, либо по сопротивлению самого нагревателя. Для измерения более высокого вакуума эффективными являются различные виды ионизационных преобразователей.

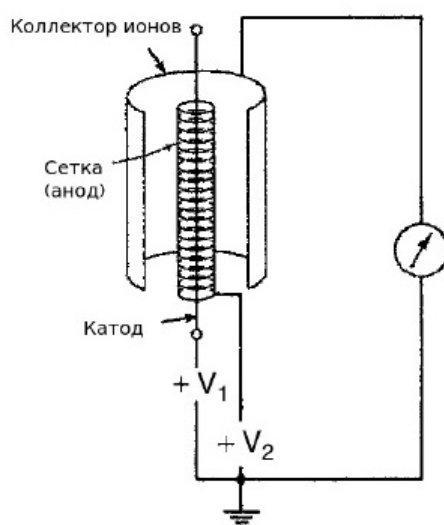


Рис. 4. Схема устройства ионизационного манометрического преобразователя(стандартная)

Принцип действия таких датчиков следующий: разогретая нить катода служит источником электронов, которые разгоняются разностью потенциалов между катодом и сеткой. Эти электроны ионизируют газ в объеме преобразователя, что приводит к возникновению ионного тока по направлению к коллектору. Величина тока зависит от концентрации молекул газа в объеме, а значит позволяет определить давление.

Практическая часть

Цель работы

Познакомиться с принципами работы вакуумного оборудования, методами измерения и контроля вакуума.

Оборудование

- 1) Откачной пост с турбомолекулярным насосом
- 2) Преобразователи манометрические ПМТ-2 и ПМИ-2
- 3) Вакуумметры ВИТ
- 4) Ёмкостные вакуумметры и вакуумметры Пирани, вакуумная арматура

Задачи работы

- 1) Измерить предельное давление в системе и скорость откачки использованием различных датчиков вакуума
- 2) Определить скорость натекания в закрытом объёме
- 3) используя данные производителя о быстроте откачки насосов, определить пропускную способность капилляра в различных диапазонах давления

Ход работы



Рис. 5. Фотография собранной установки

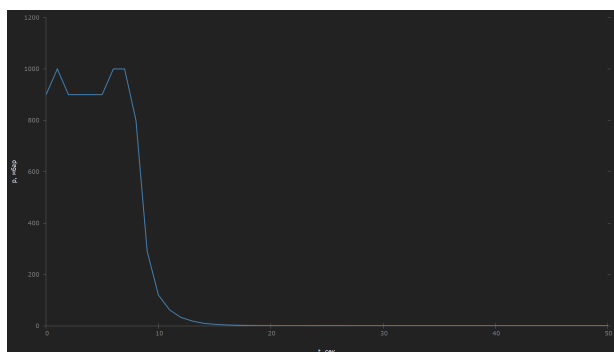


Рис. 6. $p(t)$

В ходе эксперимента использовались термопарные датчики (ПМТ) и манометры Пирани Thyracont, которые вместе покрывали весь спектр давления. Снизу приведена зависимость $p(t)$ для всего опыта. Первая часть графика — работа спирального насоса, вторая — турбомолекулярного. Данные удалось снять только с манометра Thyracont, поскольку получить данные с остальных датчиков не удалось в силу отсутствия необходимого софта. Поэтому

предельное давление на графике ограничено пределами измерения манометра. Плато между спусками — переключение насосов.

Рассмотрим поподробнее участки графика.

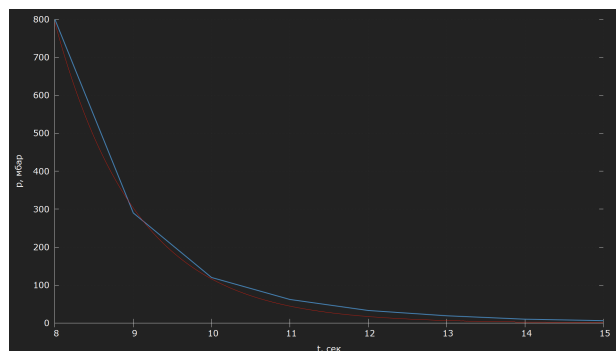


Рис. 7. $p(t)$ для спирального насоса

Красная линия — аппроксимация: $p(t) = e^{-0.96t+14.35}$

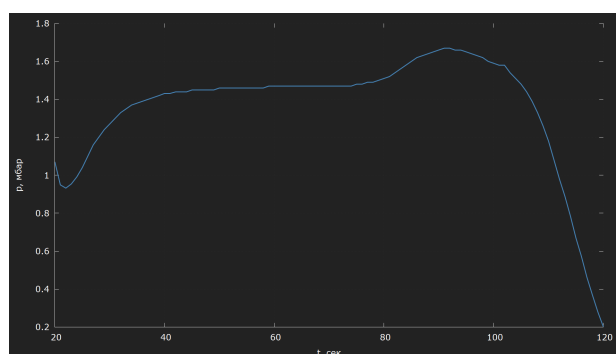


Рис. 8. $p(t)$ смена насосов

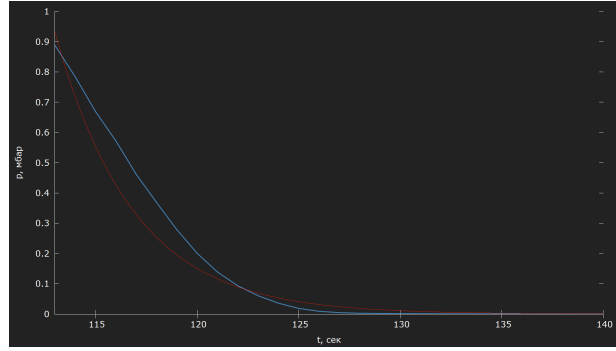


Рис. 9. $p(t)$ для турбомолекулярного насоса

Красная линия — аппроксимация: $p(t) = e^{-0.22(t-113)-0.06}$

Таким образом, можно посчитать быстроту действия по формуле $S = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt}$

Тогда получаем $S_{spir} \approx 5.76 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{с}$, $S_{turbo} \approx 1.32 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{с}$

Теперь построим $S(p)$

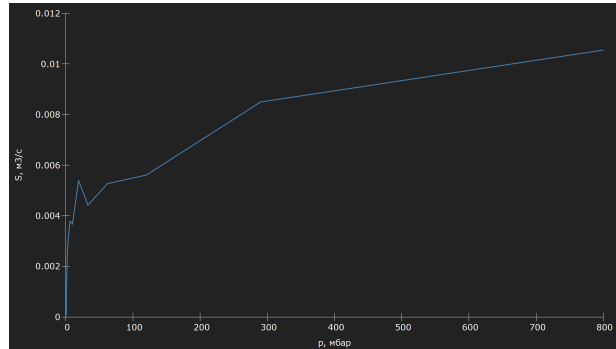


Рис. 10. $S(p)$ для спирального насоса

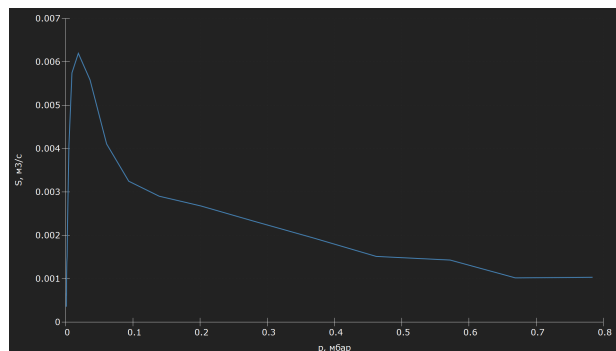


Рис. 11. $S(p)$ для турбомолекулярного насоса

Далее посмотрим на скорость натекания

Построим $p(t)$

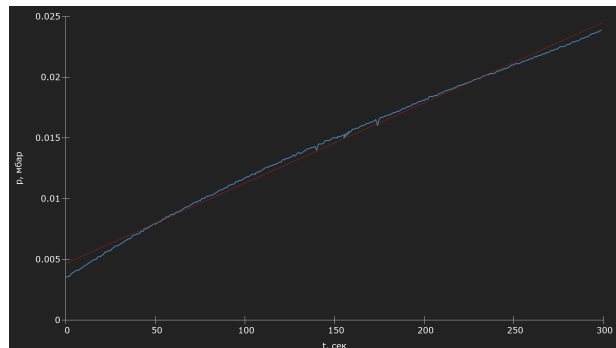


Рис. 12. $p(t)$

Данная зависимость хорошо аппроксимируется прямой $y = 6.621t + 0.005$

Тогда $S(p)$:

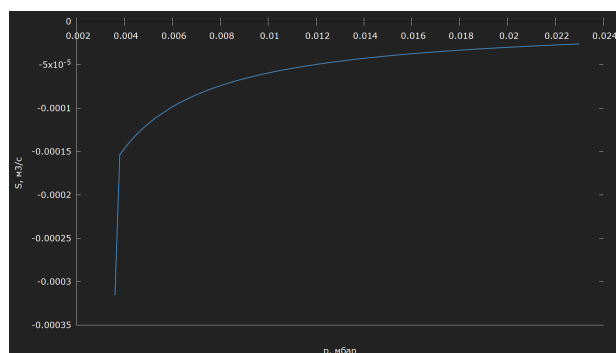


Рис. 13. $S(p)$

Видно, что $S(p) \sim \frac{1}{t}$. В таком случае можно сказать, что у нас нет пробития.

Погрешности

Считать будем по формуле:

$$\delta S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta S}{\delta q_i} \Delta q \right)^2}$$

Для спирального насоса $\delta S_{spir} \approx 3 \cdot 10^{-4} \frac{м^3}{с}$ Для турбомолекулярного насоса

$$\delta S_{turbo} \approx 2 \cdot 10^{-5} \frac{м^3}{с}$$

Тогда относительная погрешность для спирального насоса $\approx 5\%$, а турбомолекулярного $\approx 2\%$.

Вывод

Те данные, которые были получены, получились достаточно точными. Однако полностью выполнить работу не позволили технические трудности со снятием данных с датчиков.