

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики
Термодинамика и молекулярная физика

2.3.1. Современные средства получения и измерения вакуума

Красоткина Виктория
Группа Б01-203

Долгопрудный
2023

Содержание

1	Теоретические сведения	1
1.1	Введение	1
1.2	Проводимость отверстия в стенке	4
1.3	Проводимость длинного трубопровода	4
1.4	Время откачки	5
2	Экспериментальная установка и методика работы	5
2.1	Мембранный (диафрагменный) насос	5
2.2	Турбомолекулярный насос	7
2.3	Терморезисторный вакуумметр (Пирани)	8
2.4	Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)	10
2.5	Рабочая установка	11

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

Используемое оборудование: вакуумная установка с манометрами: масляным, термпарным и ионизационным.

1. Теоретические сведения

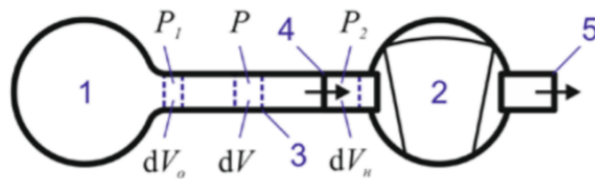
1.1. Введение

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе λ сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда d , в котором газ находится.

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы.

Предельное остаточное давление (предельный вакуум) $P_{пр}$ – наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в рассматриваемом сечении вакуумпровода (рассматриваемой точке вакуумной системы). Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

Наибольшее выпускное давление – максимально допустимое давление газа на входе насоса.



1 — откачиваемый объем, 2 — вакуумный насос, 3 — вакуумпровод (трубка), 4 — впускной патрубок (вход) насоса, 5 — выпускной патрубок (выход) насоса

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

Быстрота откачивающего действия (скорость откачки) вакуумной системы S – объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Следовательно, быстродействие насоса $S_{\text{н}}$ определяется как:

$$S_{\text{н}} = \frac{dV_{\text{н}}}{dT} \quad (2)$$

а эффективная скорость откачки камеры $S_{\text{о}}$:

$$S_{\text{о}} = \frac{dV_{\text{о}}}{dT} \quad (3)$$

Падение давления вдоль вакуумпровода $\Delta P = P_1 - P_2$ определяется его пропускной способностью (проводимостью) U :

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (4)$$

где Q – поток газа через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

Величина Z , обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U} \quad (5)$$

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:

$$P_1 S_{\text{о}} = P S = P_2 S_{\text{н}} = Q \quad (6)$$

Из предыдущих уравнений легко получить, что

$$\frac{1}{S_{\text{о}}} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U} \quad (7)$$

Это уравнение позволяет правильно ориентироваться в выборе средств откачки и вакуумпроводов при конструировании вакуумной системы для любых целей.

Количественной характеристикой течи, является натекание $Q_{\text{н}}$, измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_{\text{н}} = V \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}}{\Delta t} \quad (8)$$

где V – замкнутый исследуемый объём; P_n, P_k – начальное и конечное давление в объёме; Δt – время между измерениями давления. При наличии течей, нормальной работе средств откачки и отсутствии в системе источников паров или газов, зависимость потока газа через течь от времени $Q_n(t)$ носит, как правило, линейный характер.

Для заданного давления P_1 в замкнутом исследуемом объёме допустимым считается натекание:

$$Q_n \ll Q = P_1 S_o = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U} \quad (9)$$

На пропускную способность вакуумпровода существенно влияет режим течения газа, который характеризуется числом Кнудсена, равным отношению длины свободного пробега молекул в газе к характерному линейному размеру течения:

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока:

1. В гидродинамическом (вязкостном) режиме течения ($Kn \ll 1$) различают ламинарные и турбулентные потоки. При ламинарном течении молекулы газа движутся по параллельным траекториям со скоростями, мало отличающимися друг от друга. При турбулентном течении наряду с поступательным движением всей массы газа, молекулы движутся хаотически со скоростями, подвергающимися случайным изменениям
2. В молекулярном (кнудсеновском) режиме ($Kn \gg 1$) течение газа сводится к независимому движению отдельных молекул по прямым линиям в периоды между соударениями главным образом со стенками вакуумпровода.
3. В переходном режиме ($Kn \sim 1$) в системе могут существовать все описанные выше виды течения.

В разных режимах течения пропускная способность вакуумпровода имеет существенно различные зависимости от размера его поперечного сечения.

1.2. Проводимость отверстия в стенке

В кнудсеновском режиме проводимость отверстия радиусом R определяется средним числом молекул, сталкивающихся со стенкой. С точки зрения молекулярно-кинетической теории можно получить

$$\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{v}{4kT}(P_2 - P_1) \quad (11)$$

С другой стороны

$$\nu = \frac{1}{AkT}(P_2 - P_1)U_{\text{отв}} \quad (12)$$

Из формул следует, что

$$U_{\text{отв}} = \frac{Av}{4} = \frac{\pi R^2}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (13)$$

1.3. Проводимость длинного трубопровода

Проводимость длинного трубопровода $L \gg R$ в гидродинамическом режиме определяется вязкостными характеристиками газа и может быть получена из формулы Пуазейля

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\mu L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}} \quad (14)$$

где P – давление в рассматриваемом сечении трубы (можно рассматривать как среднее по длине вакуумпровода давление $P = (P_1 + P_2)/2$), μ – вязкость газа, L и R – длина и радиус трубопровода.

В молекулярном режиме проводимость определяется взаимодействием молекул газа со стенками и может быть получена из формулы Кнудсена

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (15)$$

Для промежуточных условий проводимость определяется путём интерполяции зависимостей, полученных в вязкостном и молекулярном режимах.

В случае последовательного соединения разных вакуумпроводов, что обычно бывает в реальных установках, их импедансы суммируются, а суммарная проводимость равна:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{\Sigma Z_i} \quad (16)$$

Формулы показывают, что для эффективной откачки вакуумной камеры насосом с заданной скоростью откачки нужно выбирать вакуумпроводы как можно шире и как можно короче. В этом случае $U_{\Sigma} \gg S_{\text{н}}$:

$$S_o = \frac{S_{\text{н}} U}{S_{\text{н}} + U} = S_{\text{н}} \quad (17)$$

1.4. Время откачки

Положим, что за промежуток времени dt давление в откачиваемом объеме V_o снижается на dP_1 . Тогда за промежуток времени dt количество газа поступающего в трубку равно $S_o P_1 dt$, а эта же убыль газа в объеме равна $V_o dP_1$, следовательно:

$$dt = -\frac{V_o dP_1}{S_o P_1} \quad (18)$$

В случае $S_o = \text{const}$ имеем

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o} t\right) \quad (19)$$

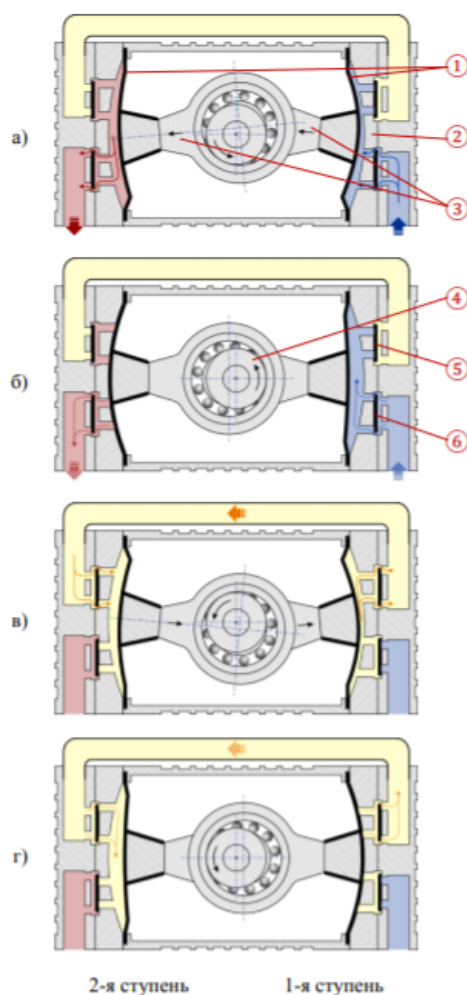
2. Экспериментальная установка и методика работы

Существует множество различных типов вакуумных насосов, целесообразность использования которых варьируется в зависимости от условий получения и требуемой глубины вакуума.

2.1. Мембранный (диафрагменный) насос

В мембранном насосе две или более гибких диафрагмы жестко закреплены на стенках корпуса, образуя герметичные полости изменяемого объема. Диафрагмы приводятся в движение электродвигателем, вращательное движение которого преобразуется в возвратно-поступательное с использованием кривошипно-шатунного механизма. С движением диафрагмы синхронизирована работа впускного и выпускного клапанов.

Откачка осуществляется созданием в полости диафрагмы области пониженного давления, за счет чего в нее через впускной клапан поступает газ из откачиваемого объема или предыдущей ступени откачки. При уменьшении объема полости газ уходит через выпускной клапан.



1 — гибкие диафрагмы, 2 — корпус, 3 — шатун,
4 — коленвал, 5 — впускной и выпускной клапаны

Показаны четыре последовательные фазы работы (а-г)
с положением мембраны, впускных и выпускных клапанов

Рис. 2: Работа диафрагменного насоса

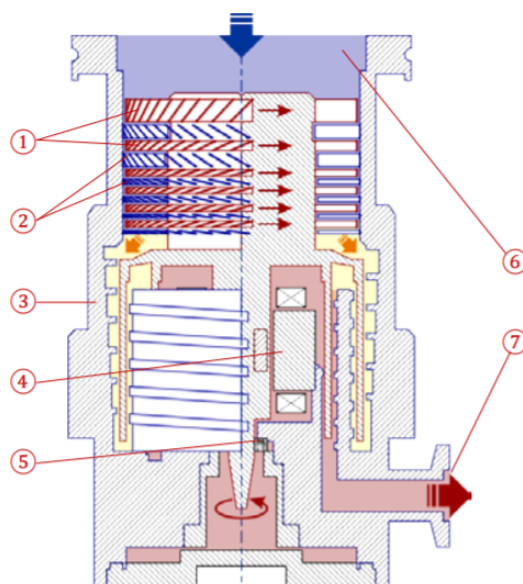
Преимущества: отсутствие материалов, загрязняющих рабочий объем насоса и, как следствие, откачиваемый объем: масла, других смазочных веществ, трущихся механизмов; используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах безмасляной (т.н. «сухой») откачки

с особым требованием чистоты откачиваемого объема; используется до 4-х последовательных ступеней; низкий уровень шума.

Недостатки: низкая скорость откачки за счет ограниченной эластичности диафрагмы; низкий предельный вакуум за счет обратного потока воздуха через выпускные клапаны; ограниченность срока службы сроком функционирования диафрагмы.

Тип вакуума: средний.

2.2. Турбомолекулярный насос



1 — ротор, 2 — статор, 3 — корпус насоса, 4 — электродвигатель, 5 — нижний шарикоподшипник, 6 — высоковакуумный входной фланец, 7 — выпускной форвакуумный фланец

Рис. 3: Конструкция турбомолекулярного насоса

Откачка в турбомолекулярном насосе осуществляется за счет соударения частиц газа с быстро движущимися турбинными лопатками дисков ротора (1) специальной геометрии, которые придают им дополнительный импульс в заданном направлении потока. Между дисками ротора находятся диски статора (2) с обратно обращенными лопатками, направляющие поток молекул на следующие диски турбины по оптимальной траектории, минимизируя обратный поток. Каждая пара пластин ротора-статора образует одну ступень. Насос состоит из нескольких ступеней расположенных последовательно, каждая последующая ступень имеет

меньшие геометрические размеры, что при постоянном потоке газа приводит к постепенному повышению давления до выпускного форвакуумного. Скорость вращения ротора современных турбомолекулярных насосов достигает нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

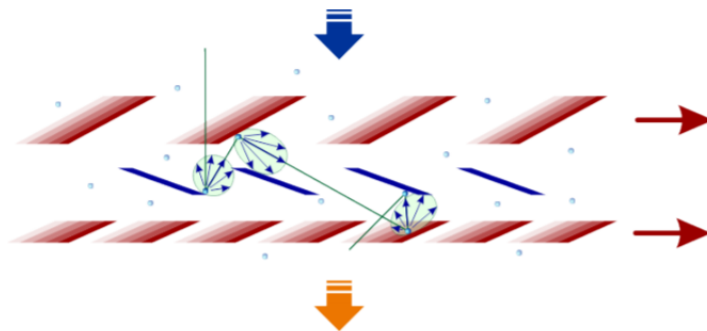


Рис. 4: Принцип работы турбомолекулярного насоса

Преимущества: постоянная готовность к работе; быстрый запуск (~ 10 минут на раскручивание турбины); устойчивость к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного); широкий диапазон рабочих давлений (10^{-7} - 10^{-1} Па); примерно одинаковая быстрота действия для большинства газов; используется как в системах «сухой» безмасляной откачки с особым требованием чистоты откачиваемого объема, так и с масляными форвакуумными насосами за счёт минимального обратного потока.

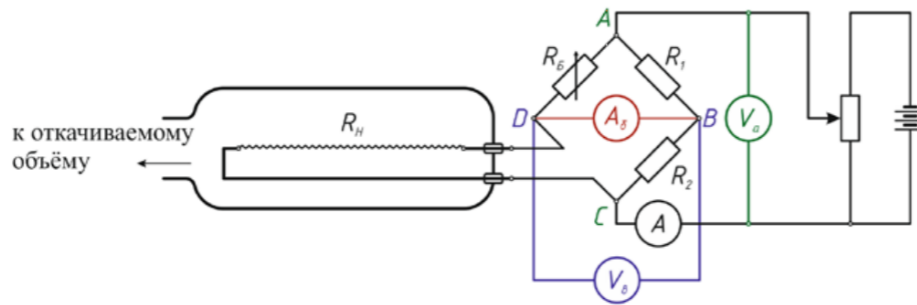
Недостатки: требуется надежная защита вращающейся турбины от любых механических воздействий (пыли, абразивных частиц, вибраций, частых и резких перепадов давления и т. п.), приводящих к износу подвески ротора и разрушению лопаток турбины.

Тип вакуума: высокий.

2.3. Терморезисторный вакуумметр (Пирани)

Принцип действия тепловых манометров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. Чувствительным элементом терморезисторного датчика является тонкая металлическая нить накала (вольфрам, платина), помещенная в атмосферу откачиваемого газа. Сопротивление нити зависит от её температуры. Нить включена в одно из плеч мостовой схемы и разогрета до нескольких сотен градусов пропускаемым по ней током. Джоулево тепло, выделяемое нитью, отводится в основном через газовую среду со скоростью, зависящей от коэффициента тепло-

проводности. В зависимости от способа измерения вакуумметр работает в режиме (а) поддержания постоянного сопротивления моста (а значит и температуры нити), (б) постоянного напряжения на клеммах , моста или (в) постоянного тока через мост. Мост изначально сбалансирован при давлении много ниже рабочего диапазона (сопротивление R_B).



R_H — сопротивление нити накала; R_B — сопротивление балансировки; V_a — вольтметр для измерения напряжения на клеммах A, C в режиме (а); A_δ — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (б); V_δ — вольтметр для измерения напряжения на клеммах B, D в режиме (в)

Рис. 5: Принципиальная схема терморезисторного вакуумметра (Пирани)

В первом случае (а) напряжение на клеммах , моста автоматически подбирается так, чтобы мост всё время оставался сбалансированным при изменении давления и, тем самым, является мерой давления в системе:

$$P \sim V^2 - V_0^2 \quad (20)$$

где V_0 — напряжение на клеммах при начальной балансировке. Во втором случае (б) мерой давления служит ток разбалансировки моста, в третьем (в) — напряжение на клеммах B, D.

В области низкого вакуума при $\lambda \gg d$ коэффициент теплопроводности перестаёт зависеть от давления, а при давлениях менее 10^{-3} Торр основную роль в процессе теплоотвода начинает играть излучение. Оба эти фактора ограничивают применение данного типа датчиков областью среднего вакуума.

Преимущества: практически неограниченный срок службы в неагрессивных средах за счёт низкой степени окисления нити при низких температурах нагрева. Способность выдержать прорыв атмосферы.

Недостатки: при давлениях более 1 мбар показания существенно зависят от типа газа; тепловая инерция — запаздывание показаний при резком изменении давления; необходимость перекалибровки датчика в

связи с изменением сопротивления после длительного времени эксплуатации.

Тип вакуума: средний.

2.4. Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)

Измерительный объём магнетронного датчика находится между катодом и анодом, между которыми приложено напряжение ($\sim 2 - 6$ кВ), а также помещен в постоянное магнитное поле ($\sim 0,2 - 2$ кГс). Случайным образом возникшие вблизи катода электроны (например, вследствие автоэлектронной эмиссии) будут двигаться к аноду под действием скрещенных электромагнитных полей по удлиненной траектории. При этом повышается вероятность соударения электронов с молекулами откачиваемого газа и их ионизация. Образовавшиеся ионы ускоряются в электрическом поле анодно-катодного промежутка и выбивают из материала катода вторичные электроны (вторичная электронная эмиссия), которые также ионизируют газ, двигаясь к аноду по сложной циклической траектории.

В результате описанного процесса возникает электрический разряд, ток которого в достаточно широком диапазоне зависит от давления. На диапазон измеряемых давлений существенно влияет конструкция магнетронного датчика. В инверсно-магнетроном датчике анодом служит центральный металлический стержень, а катодом — осесимметричная обечайка, магнитное поле создается внешним постоянным кольцевым магнитом.

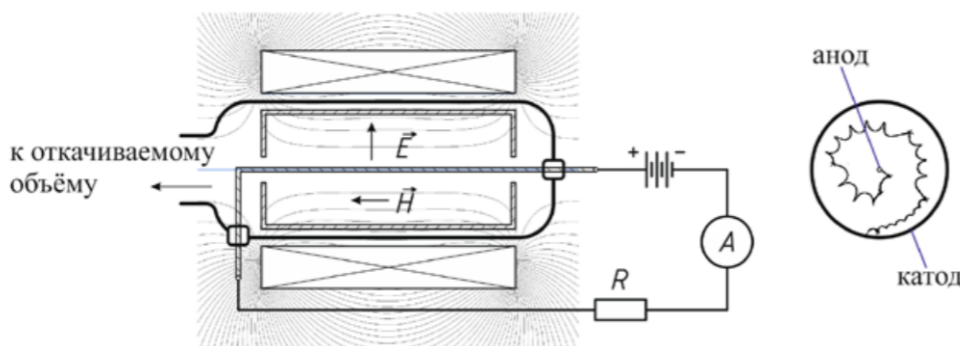


Рис. 6: Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в них

Преимущества: могут включаться в широком диапазоне давлений,

т.к. не содержат накаливаемых деталей и не боятся окисления. Устойчивы к прорыву атмосферы. Применяются в автоматизированных технологических процессах вследствие простоты эксплуатации и нечувствительности к внешним воздействиям.

Недостатки: Не желательно длительное использование в диапазоне среднего вакуума особенно в атмосфере аргона, т.к. это приводит к распылению материала катода потоком ионов, что, в свою очередь, может стать причиной короткого замыкания и сбоев датчика. Не желательно использование в системах с масляным типом откачки, т.к. углеводороды со временем образуют устойчивую пленку на поверхности катода, которая искажает показания датчика. Является источником магнитного поля, что может влиять на работу других приборов.

Тип вакуума: высокий, сверхвысокий.

2.5. Рабочая установка

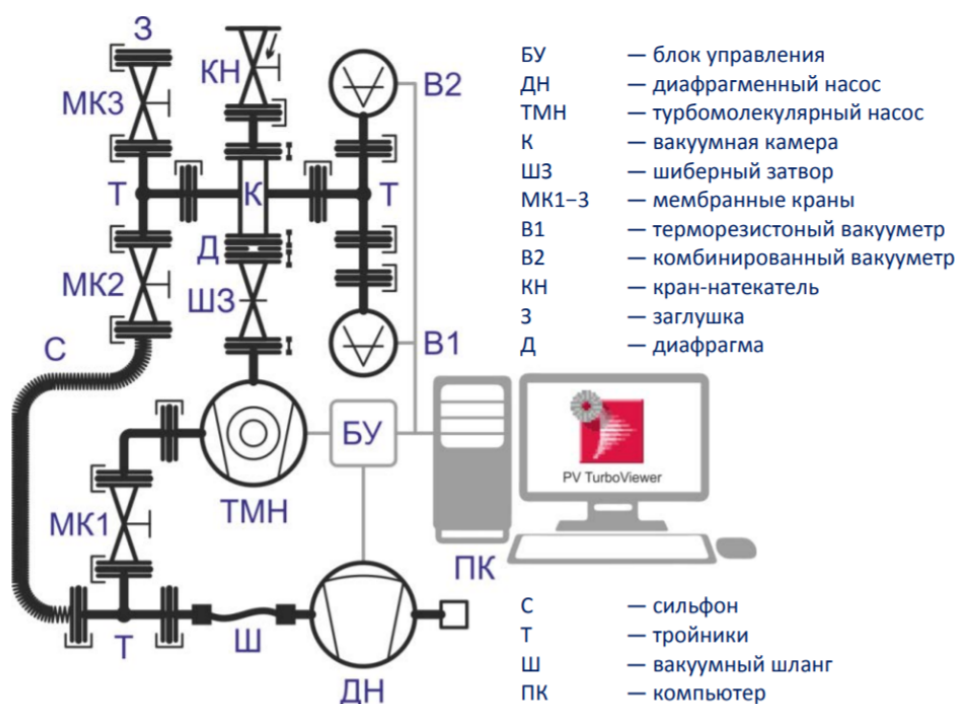


Рис. 7: Схема экспериментального стенда

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 TurboViewer.

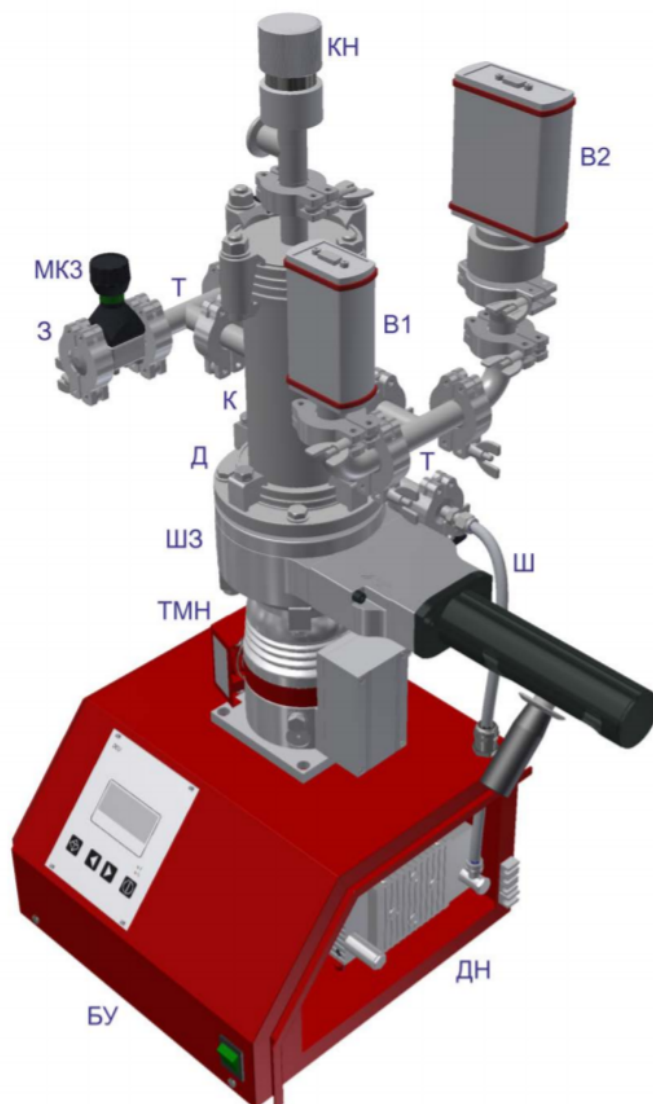


Рис. 8: Внешний вид экспериментального стенда