

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**  
**«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Лабораторная работа 2.3.1А**  
**«Современные средства получения и измерения вакуума»**

Овсянников Михаил Александрович  
студент группы Б01-001  
1 курс ФРКТ

г. Долгопрудный  
2021 г.

---

## 2.3.1A Современные средства получения и измерения вакуума

Версия 0.2.5 от 05 февраля 2019 года<sup>1</sup>

Изучаются принципы получения и измерения вакуума в экспериментальном стенде на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco, вакууметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine и вакуумных компонентов типов ISO-K, ISO-F, ISO-KF.

## Введение

### 1. Основные характеристики и области применения вакуума

В физике *вакуумом* называют 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*<sup>2</sup>  $\lambda \sim 10^{-5}$  см, откуда видно, что воздух в жилых помещениях не находится в состоянии вакуума, но, например, внутри пористых материалов, таких как древесина, уже может находиться.

В технике вакуумом называют состояние газа при котором его давление меньше атмосферного ( $P < P_{\text{атм}}$ ). Различают следующие типы вакуума: *низкий*, когда средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера рассматриваемого объёма, т.е.  $\lambda < d$ ; *средний*, когда  $\lambda \sim d$ ; *высокий* (или *глубокий*), когда  $\lambda \gg d$  (рис. 1). Иногда выделяют ещё *сверхвысокий* вакуум, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для проведения эксперимента. Газ в состоянии высокого вакуума называется *ультраразреженным*.

---

<sup>1</sup> По всем вопросам, связанным с работой установки, корректировкой и дополнением описания, предложениями по изменению или улучшению заданий просьба писать по адресу vorona.na@mipt.ru.

<sup>2</sup> Физические условия, определяемые давлением  $p = 101\,325$  Па (760 мм рт. ст., нормальная атмосфера) и температурой  $t = 273,15$  К (0°C). В различных областях техники условия нормируются стандартами ГОСТ или ISO и могут незначительно отличаться от приведённых значений, что необходимо учитывать при использовании справочных данных или в расчётах.

## 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума



Рис. 1. Понятие о вакууме

На практике, кроме единицы измерения давления в системе СИ — *1 Паскаль (Па)*, используются также и внесистемные единицы, такие как *Торр*, *миллибар (мбар)*, *атмосфера* и др., связанные следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} 1 \text{ тех. атм.} &= 1 \text{ кгс/см}^2 = 98,0665 \text{ кПа} = 0,980665 \text{ бар,} \\ 1 \text{ физ. атм.} &= 760 \text{ Торр} = 101,325 \text{ кПа} = 1,01325 \text{ бар,} \\ 1 \text{ бар} &= 10^6 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Сфера применения вакуумной техники и технологий стремительно расширяется. Вакуум является идеально чистой технологической средой, в которой можно осуществить электрохимические и электрофизические процессы при изготовлении изделий, используемых в различных отраслях промышленности. Новые типы полупроводниковых структур, особо чистые материалы, сплавы, специальные покрытия изготавливаются в вакууме.

Некоторые примеры, позволяющие получить представление о масштабе применения вакуумных технологий:

- В бытовых приборах — производство электрических лампочек, напыление защитных покрытий на солнечные батареи, сантехнику и др.
- В пищевой промышленности — для лиофилизации (сублимации) продуктов питания и для вакуумной упаковки.
- В машиностроении — для нанесения упрочняющих покрытий на режущий инструмент и износостойких покрытий на детали машин, для захвата и транспортировки деталей в автоматических линиях и т.д.

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

---

- В полупроводниковой промышленности — для производства подложек микрочипов, матриц мониторов, светодиодов и др.
- В нефтехимии — в процессах получения дистиллятов масел из парафинов, синтеза сложных эфиров, регенерации растворителей, перегонки нефти и синтезе жирных кислот.
- В металлургии — для удаления из расплавленного металла большого количества растворенных в нем газов, что дает возможность получения пластичного материала с высокими механическими свойствами.
- В аналитической промышленности — для производства сканирующих электронных микроскопов, используемых в фармакологии для обеспечения качества медикаментов или мобильных систем допинг-контроля в спорте.
- В космической отрасли — для создания имитаторов космического пространства и испытания узлов, механизмов и приборов космических аппаратов.

Без вакуумной техники сегодня невозможно представить экспериментальные исследования в области физики плазмы, ударных волн, элементарных частиц и др. Лабораторные установки с вакуумным оборудованием могут быть размещены как на лабораторном столе (как данная установка), так и достигать линейных размеров до 10 км, как Большой адронный коллайдер.

## 2. Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой

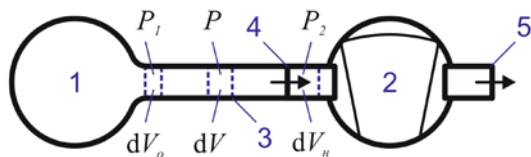
Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы (рис. 2).

*Предельное остаточное давление (предельный вакуум)*  $P_{пр} [L^{-1}MT^{-2}]^3$  — 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*  $[L^{-1}MT^{-2}]$  — максимально допустимое давление газа на входе насоса.

---

<sup>3</sup> В квадратных скобках указана размерность физической величины в системе LMT (СИ, СГС и др.), в которой за основные величины приняты длина (L), масса (M) и время (T) [8]. Соотношения между единицами измерения основных величин, приведённых в данном разделе, указаны в прил. Д.



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

Рис. 2. Простейшая вакуумная система

*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:

$$S = dV/dt$$

Следовательно, быстродействие насоса  $S_n$  определяется как:

$$S_n = dV_n/dt, \quad (2.1)$$

а эффективная скорость откачки камеры  $S_o$ :

$$S_o = dV_o/dt. \quad (2.2)$$

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

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2}, \quad (2.3)$$

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

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

$$Z = 1/U.$$

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:

$$P_1 S_o = P S = P_2 S_n = Q. \quad (2.4)$$

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

Из уравнений (2.1)–(2.4) нетрудно получить т.н. *основное уравнение вакуумной техники*, связывающее основные параметры вакуумной системы:

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) позволяет правильно ориентироваться в выборе средств откачки и вакуумпроводов при конструировании вакуумной системы для любых целей.

Количественной характеристикой течи, является *натекание*  $Q_n [L^2MT^{-3}]$ , измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = V \frac{(P_k - P_n)}{\Delta t}, \quad (2.6)$$

где  $V$  — замкнутый исследуемый объём;  $P_n, P_k$  — начальное и конечное давление в объеме;  $\Delta t$  — 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 объеме допустимым считается натекание:

$$Q_n \ll Q = P_1 S_o = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (2.7)$$

Объём при этом считается достаточно герметичным для поставленных задач.

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:

$$Kn = \lambda/d.$$

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока:

- 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 мас-

сы газа, молекулы движутся хаотически со скоростями, подвергающимися случайным изменениям<sup>4</sup>.

- 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.
- 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.

### 2.1. Проводимость отверстия в стенке

В кнудсеновском режиме проводимость отверстия радиусом  $R$  определяется средним числом молекул, сталкивающихся со стенкой [2]:

$$\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{1}{4} n_2 \vartheta - \frac{1}{4} n_1 \vartheta = \frac{1}{4} \frac{P_2}{kT} \vartheta - \frac{1}{4} \frac{P_1}{kT} \vartheta = \frac{1}{4} \frac{\vartheta}{kT} (P_2 - P_1), \quad (2.8)$$

с другой стороны:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{1}{A} \left( \frac{dN_2}{dt} - \frac{dN_1}{dt} \right) = \frac{1}{A} \left( \frac{d(n_2 V)}{dt} - \frac{d(n_1 V)}{dt} \right) = \frac{(n_2 - n_1) dV}{A dt} = \\ &= \frac{1}{A} \left( \frac{P_2}{kT} - \frac{P_1}{kT} \right) \frac{dV}{dt} = \frac{1}{AkT} (P_2 - P_1) U_{\text{отв}}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

где  $\nu$  — число молекул пролетающих через единицу площади отверстия за единицу времени,  $A$  — площадь отверстия,  $n$  — концентрация молекул,  $\vartheta$  — их средняя скорость,  $T$  — температура газа,  $k$  — постоянная Больцмана, индексы 2, 1 относятся к потокам молекул по разные стороны отверстия.

Из уравнений (2.8) и (2.9) получим выражение для проводимости отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} A \vartheta = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{\frac{T}{m}}, \quad (2.10)$$

где  $R$  — радиус отверстия,  $m$  — масса молекулы газа.

<sup>4</sup> Режим течения определяется числом Рейнольдса  $Re = \rho v l / \eta$  — безразмерной комбинацией характерных параметров текущей жидкости, где  $l$  — характерный размер поперечного сечения. По порядку величины  $Re$  есть отношение мощности потока кинетической энергии текущего газа к мощности сил трения, обусловленных наличием вязкости [8]. При малых  $Re$  ( $Re < Re_{\text{кр}} \approx 2 \cdot 10^3$ ) — возможно только ламинарное течение, при больших  $Re$ , течение может стать турбулентным.

Для вязкостного режима, формулы проводимости записываются много сложнее, и их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

## 2.2. Проводимость длинного трубопровода

Проводимость длинного трубопровода ( $L \gg R$ ) в гидродинамическом режиме определяется вязкостными характеристиками газа и может быть получена из формулы Пуазейля (см. напр. лабораторную работу №2.2.5 [3]):

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\eta L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}}, \quad (2.11)$$

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

В молекулярном режиме проводимость определяется взаимодействием молекул газа со стенками и может быть получена из формулы Кнудсена (см. напр. введение к разделу III [3]):

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}}. \quad (2.12)$$

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:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{\Sigma Z_i}, \quad (2.13)$$

где  $Z_i$  — импеданс  $i$ -го участка вакуумпровода,  $Z_{\Sigma}$  — суммарный импеданс вакуумпровода.

Формулы (2.5), (2.10)–(2.13) 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  $U_{\Sigma} \gg S_{\text{н}}$  и из (2.5) получим:

$$S_o = \frac{S_{\text{н}} U_{\Sigma}}{S_{\text{н}} + U_{\Sigma}} = \frac{S_{\text{н}}}{\frac{S_{\text{н}}}{U_{\Sigma}} + 1} \approx S_{\text{н}}. \quad (2.14)$$



С другой стороны выбрать насос с производительностью  $S_n \gg U_\Sigma$  не целесообразно, поскольку в этом случае скорость откачки будет определяться, в основном, проводимостью вакуумпровода:

$$S_o = \frac{S_n U_\Sigma}{S_n + U_\Sigma} = \frac{U_\Sigma}{1 + \frac{U_\Sigma}{S_n}} \approx U_\Sigma. \quad (2.15)$$

Выполнение условия  $U_\Sigma \gg S_n$  особенно существенно в случае высоковакуумной откачки, или кнудсеновском режиме течения.

### 2.3. Время откачки

Положим, что за промежуток времени  $dt$  давление в откачиваемом объеме  $V_o$  снижается на  $dP_1$  (рис. 2). 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:

$$S_o P_1 dt = -V_o dP_1 \quad (2.16)$$

Перепишем уравнение (2.16) в виде:

$$dt = -\frac{V_o}{S_o} \frac{dP_1}{P_1}. \quad (2.17)$$

С учетом уравнения (2.5) для изменения давления со временем получим:

$$dt = -V_o \left( \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \right) \frac{dP_1}{P_1}. \quad (2.18)$$

Для вычисления длительности откачки по формуле (2.16) необходимо иметь данные о значении  $S_n$  при различных давлениях. Для данной установки такие данные приведены в прил. Б.

В случае  $S_o = const$ , решение уравнения (2.16) существенно упрощается и зависимость давления от времени откачки:

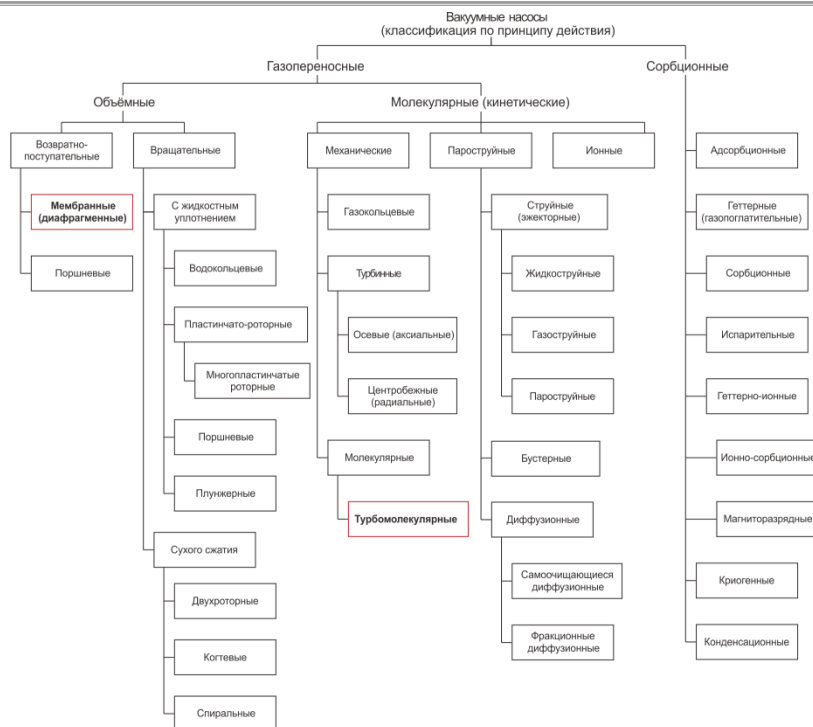
$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o} t\right). \quad (2.19)$$

Постоянная времени откачки  $\tau = V_o/S_o$  является мерой эффективности откачной системы.

### 3. Средства получения вакуума

Существует множество различных типов вакуумных насосов, целесообразность использования которых варьируется в зависимости от условий получения и требуемой глубины вакуума. Одна из возможных классификаций средств откачки приведена на рис. 3. Выделим среди представленных типов те, которые используются в данной лабораторной работе (2.3.1А).

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

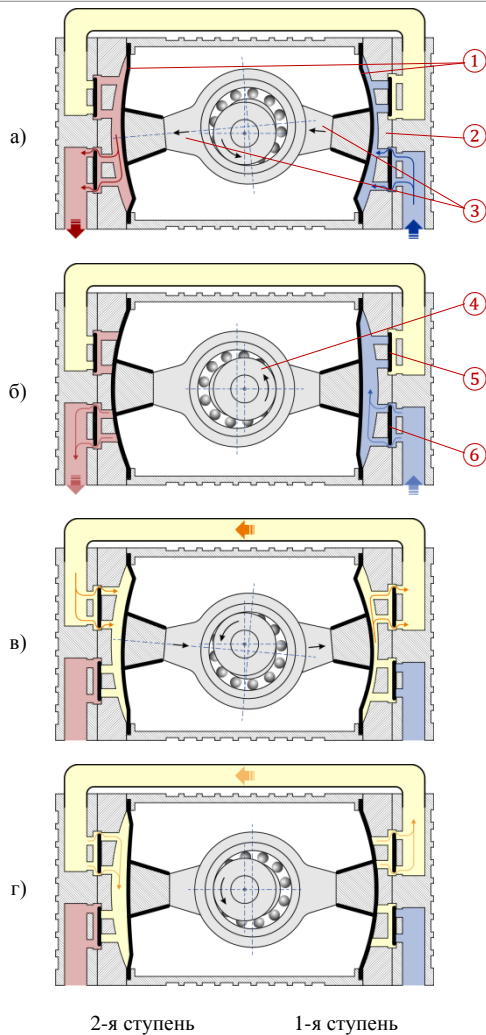


Выделены те группы, насосы которых используются в данной лабораторной работе

Рис. 3. Примерная (далеко не полная) классификация насосов по принципу действия [4]

### 3.1. Мембранный (диафрагменный) насос

В мембранном насосе две или более гибких диафрагмы (1) (рис. 4) жестко закреплены на стенках корпуса (2), образуя герметичные полости изменяемого объема. Диафрагмы приводятся в движение электродвигателем, вращательное движение которого преобразуется в возвратно-поступательное с использованием кривошипно-шатунного механизма (3, 4). С движением диафрагмы синхронизирована работа впускного и выпускного клапанов (5). 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. 4. Конструкция и принцип работы  
двухступенчатого диафрагменного вакуумного насоса

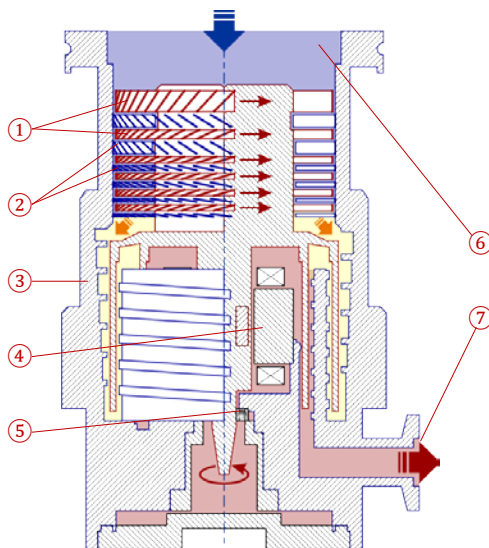
### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

– 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.

### 3.2. Турбомолекулярный насос



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

Рис. 5. Конструкция турбомолекулярного насоса

Откачка в турбомолекулярном насосе (рис. 5) осуществляется за счет соударения частиц газа с быстродвижущимися 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 (рис. 6). 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.

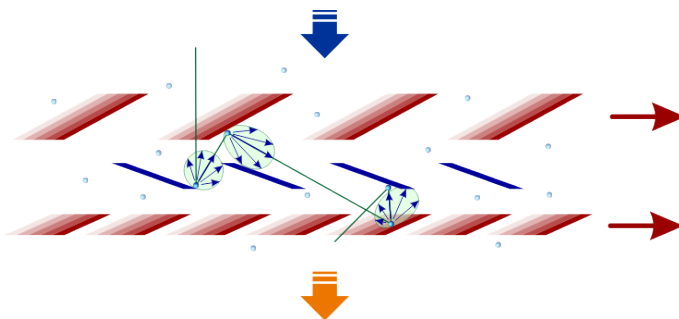


Рис. 6. Принцип работы турбомолекулярного насоса

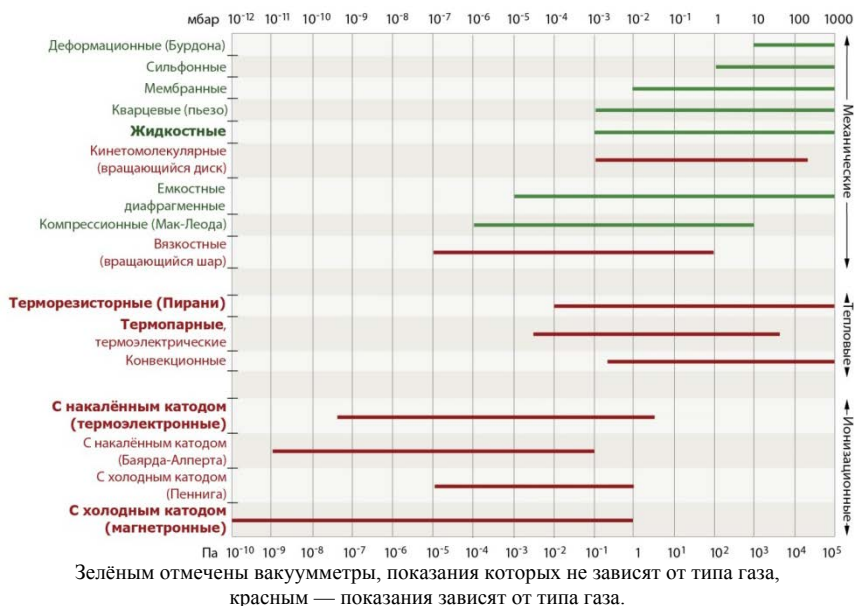
- Преимущества: постоянная готовность к работе; быстрый запуск (~10 минут на раскручивание турбины); устойчивость к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного); широкий диапазон рабочих давлений ( $10^{-7}$ – $10^{-1}$  Па); примерно одинаковая быстрота действия для большинства газов; используется 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.

## 4. Средства измерения вакуума

Тип вакуумметров выбирается в зависимости от глубины вакуума, требуемого диапазона и рабочих условий (агрессивные среды, вибра-

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

ции, электромагнитные поля и т. п.). Основные типы вакуумметров, диапазоны давлений, при которых они используются, и принцип действия указаны на рис. 7. Остановимся подробнее на датчиках, использующихся в данной лабораторной работе (2.3.1А).



Выделены те типы, которые используются в лабораторных работах (№№ 2.3.1 [3], 2.3.1А, 2.3.1Б)

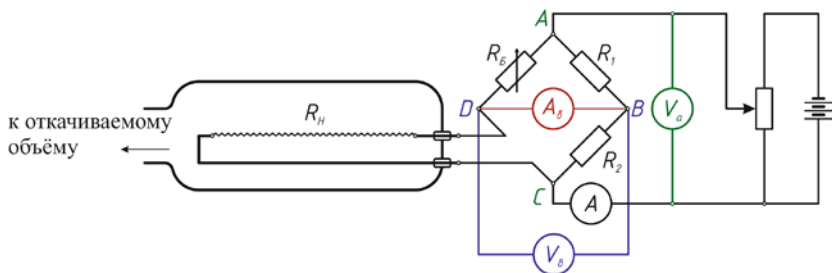
Рис. 7. Основные типы вакуумметров

#### 4.1. Терморезисторный вакуумметр (Пирани)

Принцип действия тепловых манометров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. Чувствительным элементом терморезисторного датчика (рис. 8) 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 теплопроводности. В зависимости от способа измерения

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

вакуумметр работает в режиме (а) поддержания постоянного сопротивления моста (а значит и температуры нити), (б) постоянного напряжения на клеммах  $A, C$  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);  $A_0$  — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (б);  $V_0$  — вольтметр для измерения напряжения на клеммах  $B, D$  в режиме (в)

Рис. 8. Принципиальная схема терморезисторного вакуумметра (Пирани)

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

$$P \sim V^2 - V_0^2,$$

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 (рис. 23); тепловая инерция — запаздывание показаний при резком изменении давления; необходимость перекалибровки дат-

чика в связи с изменением сопротивления после длительного времени эксплуатации [5].

- Тип вакуума: средний.

## 4.2. Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)

Измерительный объём магнетронного датчика (рис. 9) находится между катодом и анодом, между которыми приложено напряжение ( $\sim 2\text{--}6\text{ кВ}$ ), а также помещен в постоянное магнитное поле ( $\sim 0,2\text{--}2\text{ кГс}$ ). Случайным образом возникшие вблизи катода электроны (например, вследствие автоэлектронной эмиссии<sup>5</sup>) 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. 9).

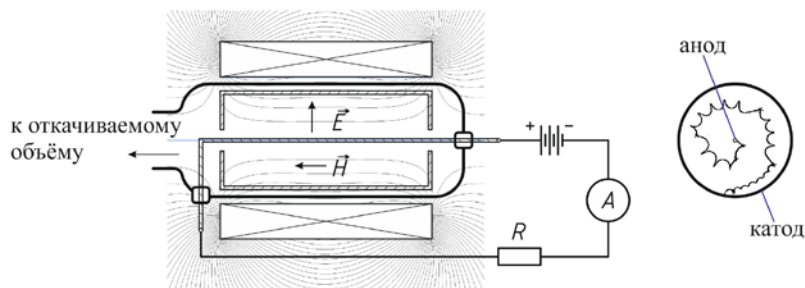


Рис. 9. Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в нём

<sup>5</sup> Автоэлектронная эмиссия — испускание электронов проводящими твёрдыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля.



– 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.

## 5. Вакуумные материалы и компоненты

Вакуумные системы, используемые в промышленности, научных исследованиях, лабораторных работах и т.п. обычно состоят из отдельных узлов различной конструкции — *вакуумных компонентов*. К вакуумным компонентам относятся все составляющие вакуумной установки, необходимые для монтажа вакуумных трубопроводов, например, фланцы, уплотнители, переходники, колена, тройники, крестовины, сифоны, шланги, краны, затворы, сами вакуумные камеры, электрические и оптоволоконные вводы, диагностические окна, вводы движение и вращения и т.д.

Материалы для таких компонентов должны обладать рядом специальных требований — т. н. *вакуумными свойствами*, среди которых высокая вакуумная плотность при минимальной толщине, низкое давление насыщенных паров при рабочей температуре, наименьшее возможное газовыделение в вакууме, лёгкость обезгаживания и др. [6]. Поэтому для изготовления вакуумного оборудования и комплектующих обычно используются соответствующим образом подобранные металлы, стекла, керамики, а также специальные резины и пластмассы.

Соединения между компонентами осуществляется с помощью *вакуумных уплотнений* — герметизированных соединений. Такие уплотнения могут быть классифицированы по их назначению (для электрических токопроводов, для вводов механического движения и др.), по их конструкции (сварные, паяные, фланцевые, штуцерные и др.), по требованиям к герметичности, по материалам, из которых они сделаны и т.п. [7].

Вакуумные компоненты исследуемого экспериментального стенда в основном выполнены из нержавеющей стали и алюминия с использованием быстроразъёмных фланцевых соединений типов ISO-K, ISO-F, ISO-KF с витонным<sup>6</sup> уплотнением. Их основные свойства, типоразмеры и примеры применения приведены в прил. А.

Другой пример использования неразъёмных паянных стеклянных соединений, притёртых кранов с использованием вакуумных смазок и штуцерных уплотнений можно посмотреть в лабораторной работе №2.3.1 Получение и измерение вакуума [3].

## 6. Вакуумная гигиена

Как показал многолетний опыт работы, высокое качество и надёжность производства электровакуумных приборов, экспериментальных исследований, лабораторных измерений и др. недостижимы, если наряду с установленными правилами по технике безопасности (электробезопасности, пожарной безопасности и т.д.) не соблюдать ряд специальных правил *вакуумной гигиены*, предусматривающих предохранение приборов от попадания в них разного рода загрязнений (механических частиц, пыли, масел, воды и др.) [5]. Наличие таких загрязнений приводит к нарушению герметичности вакуумных соединений, ухудшению предельного вакуума, увеличению времени откачки, сокращению срока службы откачного и измерительного оборудования. Даже воздух является источником большого количества пыли и влаги, которые заметно снижают вакуумные свойства поверхности.

Применительно к рассматриваемому экспериментальному стенду можно выделить следующий перечень правил:

— Рабочее место и необходимые для работы инструменты должны содержаться в строжайшей чистоте и аккуратности.

— Личная гигиена, особенно чистота рук, должна являться постоянной заботой всех работающих на установке. При работе с открытыми вакуумными поверхностями необходимо использовать латексные перчатки.

— Все открытые вакуумные поверхности и уплотнения после контакта с окружающей средой (в том числе при контакте с руками) перед монтажом на экспериментальный стенд необходимо проверить

---

<sup>6</sup> Viton® зарегистрированная торговая марка компании Du Pont — фторэластомер, из которого изготавливаются уплотнения для применения в агрессивных средах.

на наличие загрязнений, царапин, порезов и обезжирить, протирая безворсовой тканью смоченной обезжиривающей жидкостью<sup>7</sup>.

— Вакуумные поверхности всех неиспользуемых в данный момент компонентов должны быть закрыты соответствующими пластиковыми заглушками, а вакуумные уплотнения сложены в герметичные пакеты с замками для их защиты от загрязнений и механических повреждений.

#### Экспериментальный стенд

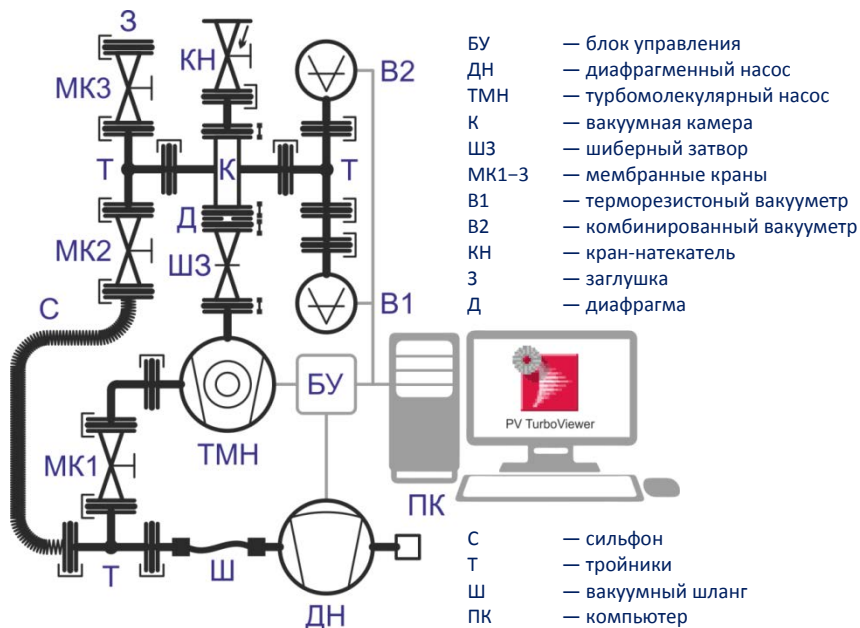


Рис. 10. Схема экспериментального стенда

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 (см. прил. А). Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком

<sup>7</sup> Водные растворы моющих средств, ацетон, этанол и др. в зависимости от загрязнения и типа поверхности.

управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer<sup>8</sup>. Схема экспериментального стенда и его внешний вид представлены на рис. 10–12.

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-накататель EVN 116 (КН) с регулируемым потоком. Дополнительный выход с краном 3 (МК3) закрыт заглушкой (З) и служит для присоединения дополнительного объема в случае необходимости.

Технические характеристики отдельных узлов экспериментального стенда приведены в прил. Б.

## Меры предосторожности

— В области низкого и среднего вакуума выполнять действия с кранами, в результате которых резкий перепад давлений на лопатках работающего турбомолекулярного насоса ТМ составит более 20% **запрещено**. В частности, при повышении давления в системе до атмосферного необходимо дождаться полной остановки ротора и только потом открыть входной кран. На полной мощности скорость вращения ротора достигает 90000 об/мин (см. прил. 2Б), и резкий перепад давлений на лопатках может привести к разрушениям турбины и самого насоса.

— В области низкого вакуума открывать шиберный затвор при перепаде давлений по обе стороны более 20% **запрещено**. При таком перепаде затвор сильно прижат к корпусу из-за перепада давлений и при попытке его открыть, опирающийся механизм может выйти из строя.

---

<sup>8</sup> В программе имеется краткий раздел помощи с описанием всех необходимых элементов управления. Смотрите меню [?help] на верхней панели окна программы.

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

---

— При затягивании трубочин и болтов на фланцах большого диаметра ISO-K, ISO-F (см. прил. 2А) старайтесь избегать перекосов, попарно и постепенно затягивая противоположные крепления в несколько заходов. В процессе откачки можно дополнительно поджать крепления, если ожидаемое давление не достигается. При ослаблении трубочин и болтов для демонтажа деталей также необходимо руководствоваться вышеизложенными правилами.

— При затягивании хомутов на фланцах малого диаметра ISO-KF (см. прил. 1А) необходимо соблюсти баланс между слабым затягиванием, которое может создать течь в системе и излишним перетягиванием, которое может повредить резьбу. В процессе откачки можно дополнительно поджать крепления, если ожидаемое давление не достигается. Придерживайтесь аналогичных рекомендаций при работе с мембранными кранами МК.

— Снабженная счётчиком ручка тонкой регулировки крананатекателя КН является прецизионным механизмом и требует плавного вращения. В противном случае механический счётчик для калибровки течи может сбиться и выйти из строя.

— После завершения работы вакуумный стенд следует оставить в откачанном состоянии для предотвращения попадания внутрь пыли, влаги, и минимизации адсорбирования газов на внутренних поверхностях, что существенно сократит время следующей откачки системы.

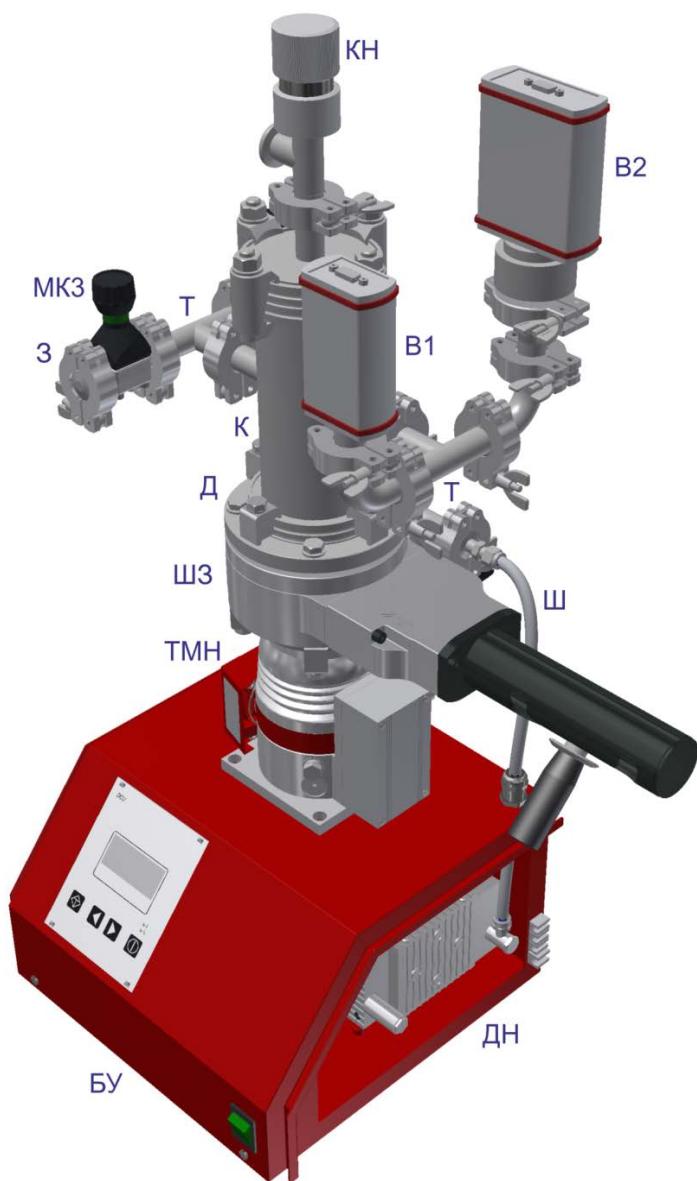


Рис. 11. Внешний вид экспериментального стенда (вид спереди-сбоку)

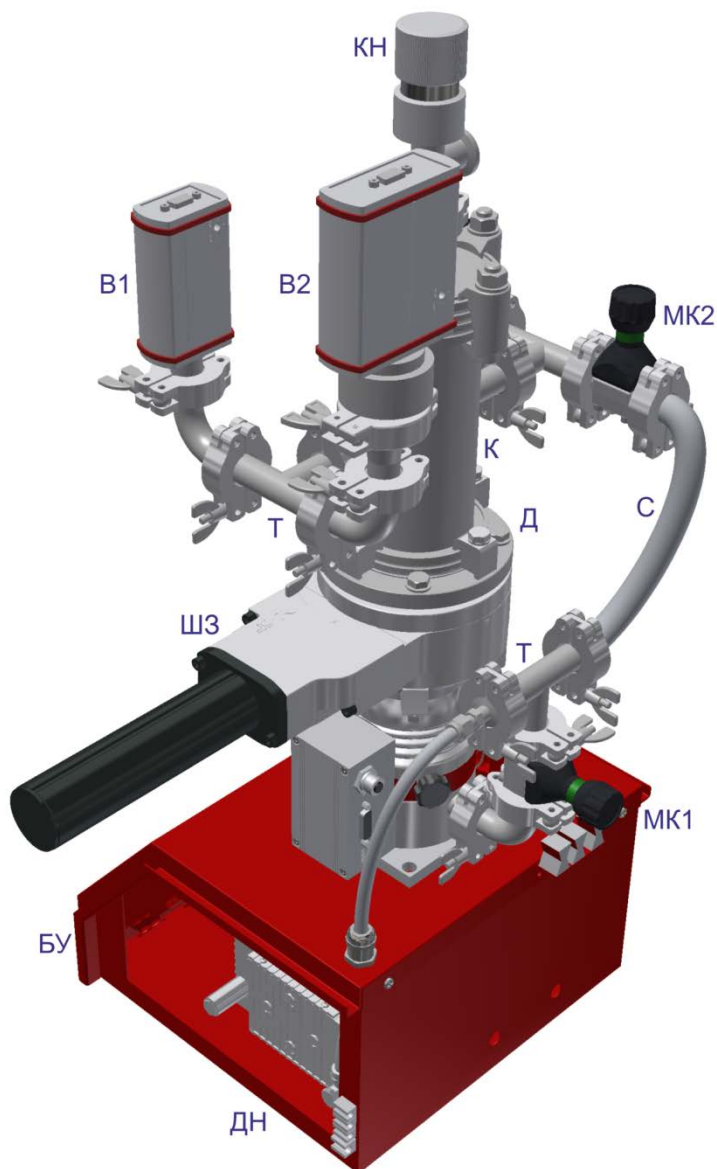


Рис. 12. Внешний вид экспериментального стенда (вид сзади-сбоку)