



Московский физико-технический институт  
Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике

II семестр — Термодинамика и молекулярная физика

## **Современные средства получения и измерения вакуума**

Лабораторная работа

**№ 2.3.1А**

(краткое описание)

Москва — 2019 год

---

Современные средства получения и измерения вакуума. Лабораторная работа № 2.3.1А. (краткое описание) 2-е изд., испр. / Ворона Н. А., Гавриков А. В. — М.: МФТИ, 2019 — 52 с.

Теоретическое введение и описание составлены с таким расчётом, чтобы студент мог получить ясное представление о лабораторной работе и изучаемом явлении и в том случае, когда выполнение работы опережает теоретический курс.

Пособие снабжено необходимыми справочными материалами.

Для физических, инженерно-физических и физико-технических специальностей вузов.

Пособие 52 с., 25 рис., 9 табл., 8 источников.

© Московский физико-технический институт  
(государственный университет), 2019  
© Ворона Н. А., Гавриков А. В., 2019

### Оглавление

Введение.....	4
1. Основные характеристики и области применения вакуума.....	4
2. Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой.....	6
2.1. Проводимость отверстия в стенке.....	9
2.2. Проводимость длинного трубопровода.....	10
2.3. Время откачки.....	11
3. Средства получения вакуума.....	11
3.1. Мембранный (диафрагменный) насос.....	12
3.2. Турбомолекулярный насос.....	14
4. Средства измерения вакуума.....	15
4.1. Терморезисторный вакуумметр (Пирани).....	16
4.2. Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом).....	18
5. Вакуумные материалы и компоненты.....	19
6. Вакуумная гигиена.....	20
Экспериментальный стенд.....	21
Меры предосторожности.....	22
Задание.....	26
I. Подготовка к работе и подключение системы управления.....	26
II. Определение откачиваемого объема и измерение скорости откачки форвакуумным насосом.....	31
III. Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума.....	33
IV.* Создание искусственной течи и определение давления перехода в молекулярный режим.....	34
V.* Откачка объема через диафрагмы.....	36
VI. Выключение установки.....	38
VII. Обработка экспериментальных данных.....	38
Приложение А. Некоторые типы вакуумных компонентов.....	40
1А. Тип ISO-KF.....	40
2А. Тип ISO-K (ISO-F).....	41
Приложение Б. Технические характеристики экспериментального стенда.....	42
1Б. Диафрагменный форвакуумный насос MVP 015 (ДН).....	42
2Б. Турбомолекулярный насос HiPace 80 (ТМН).....	43
3Б. Вакуумметр PPT 100 типа Пирани (В1).....	44
4Б. Комбинированный вакуумметр MPT 100 (В2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон).....	45
4Б. Кран-натекатель EVN 116 (КН).....	46
Приложение В. Работа с файлом данных.....	48
Приложение Г. Соотношения между часто используемыми единицами.....	51
Список литературы.....	52

---

## 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

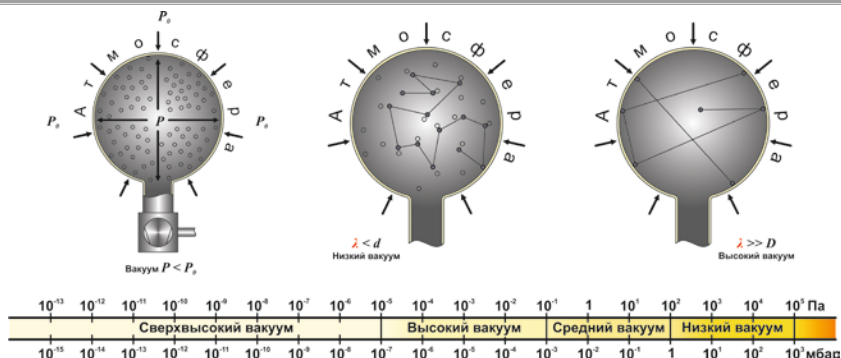


Рис. 1. Понятие о вакууме

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.

- 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

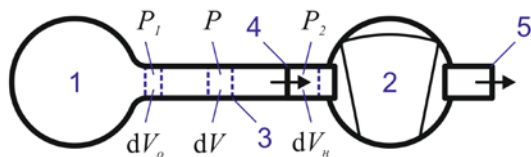
Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы (рис. 2).

*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:

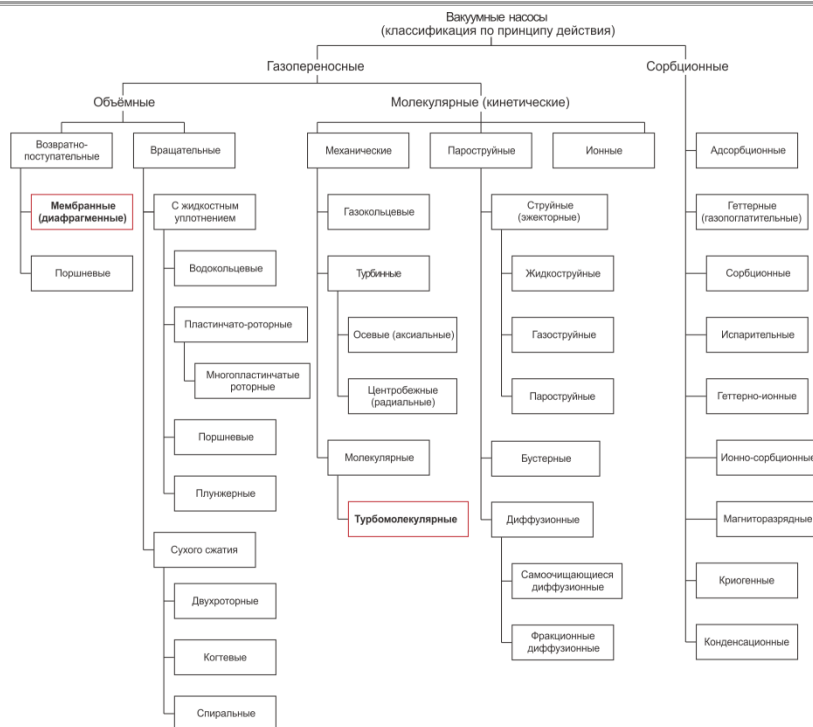
$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o} t\right). \quad (2.19)$$

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

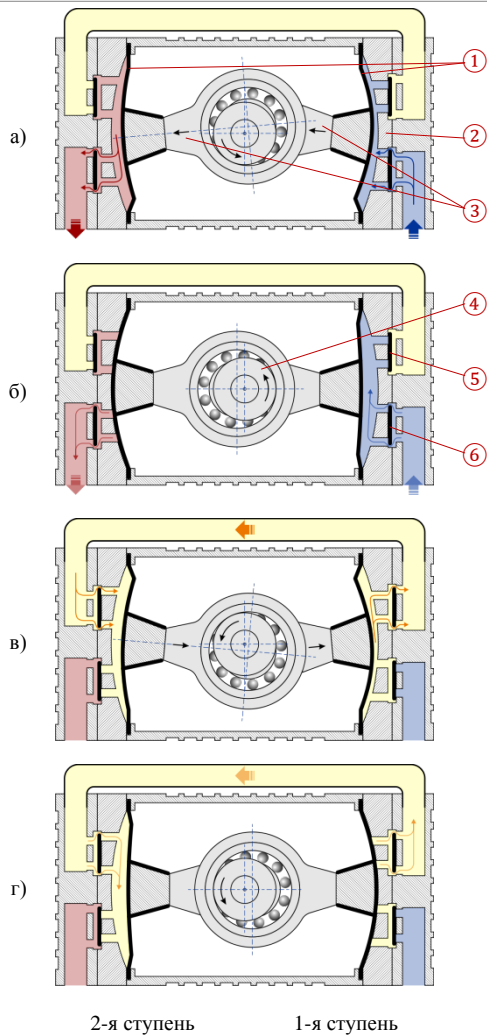


Выделены те группы, насосы которых используются в данной лабораторной работе

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

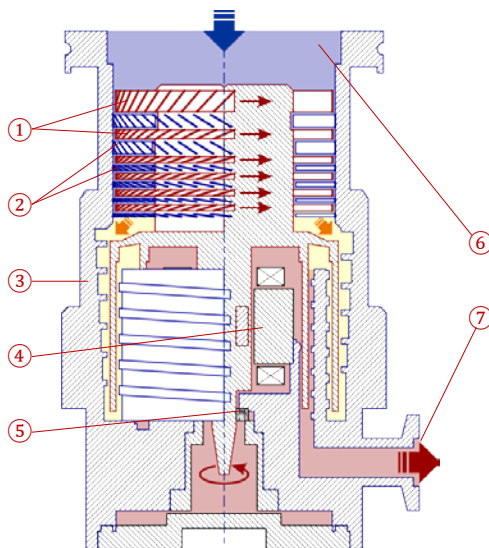
### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

– 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 обратнo 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.

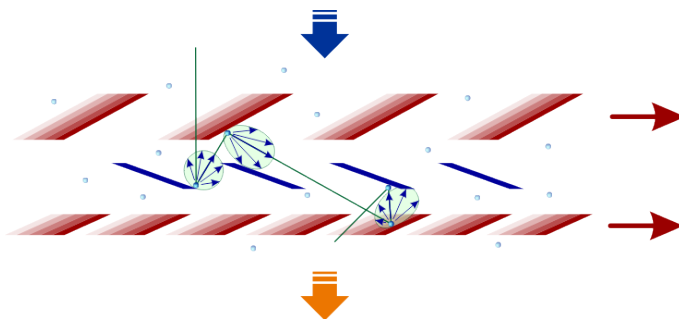


Рис. 6. Принцип работы турбомолекулярного насоса

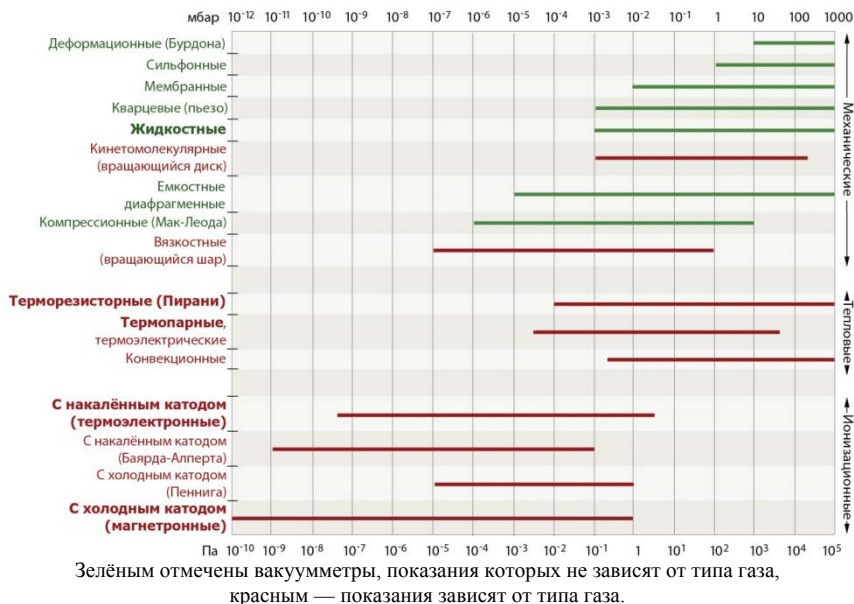
- Преимущества: постоянная готовность к работе; быстрый запуск (~10 минут на раскручивание турбины); устойчивость к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного); широкий диапазон рабочих давлений ( $10^{-7}$ – $10^{-1}$  Па); примерно одинаковая быстрота действия для большинства газов; используется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

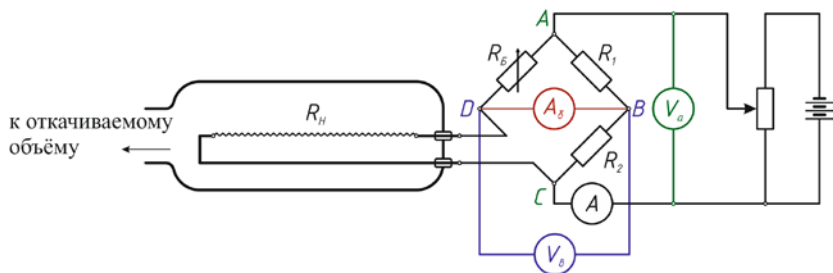
#### 4.1. Терморезисторный вакуумметр (Пирани)

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).

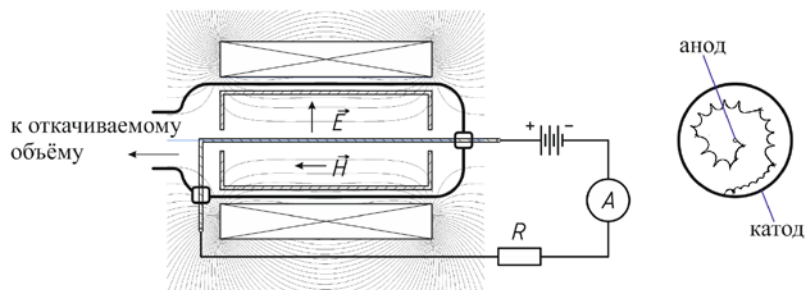


Рис. 9. Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в нем

<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

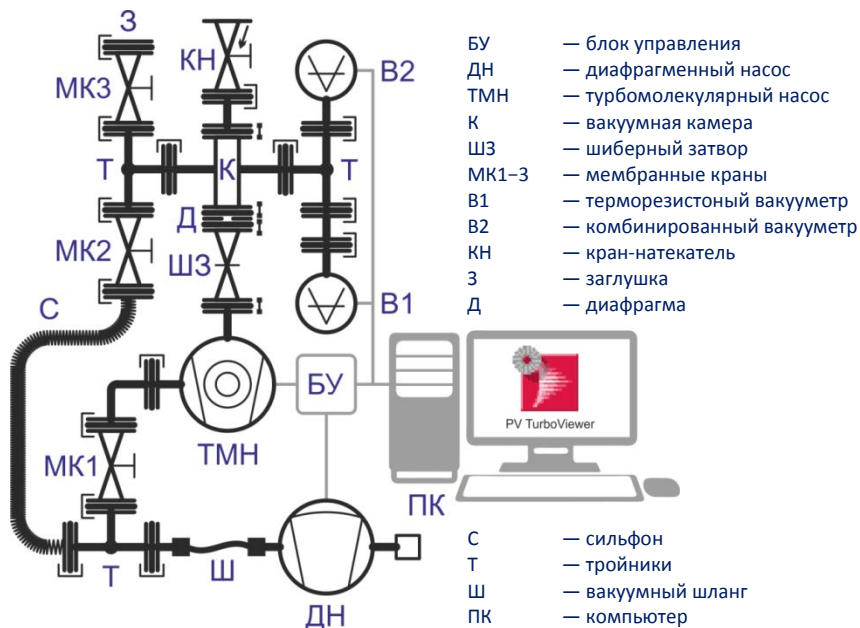


Рис. 10. Схема экспериментального стенда

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 струбцин 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 струбцин 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.

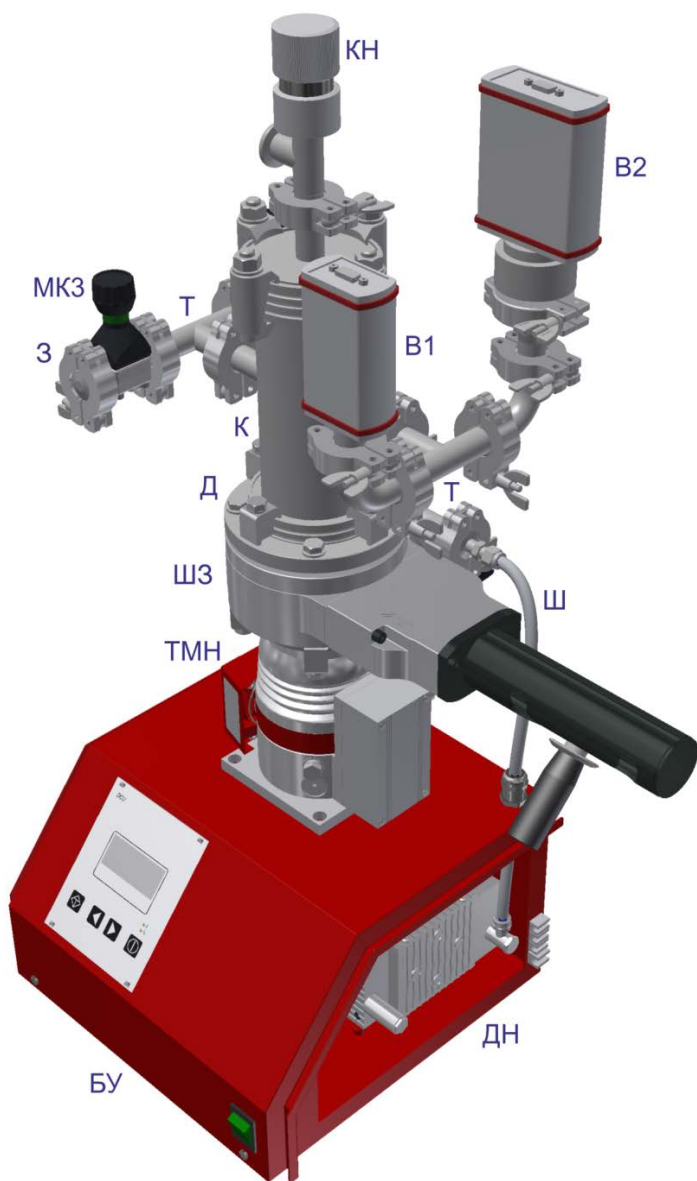


Рис. 11. Внешний вид экспериментального стенда (вид спереди-сбоку)



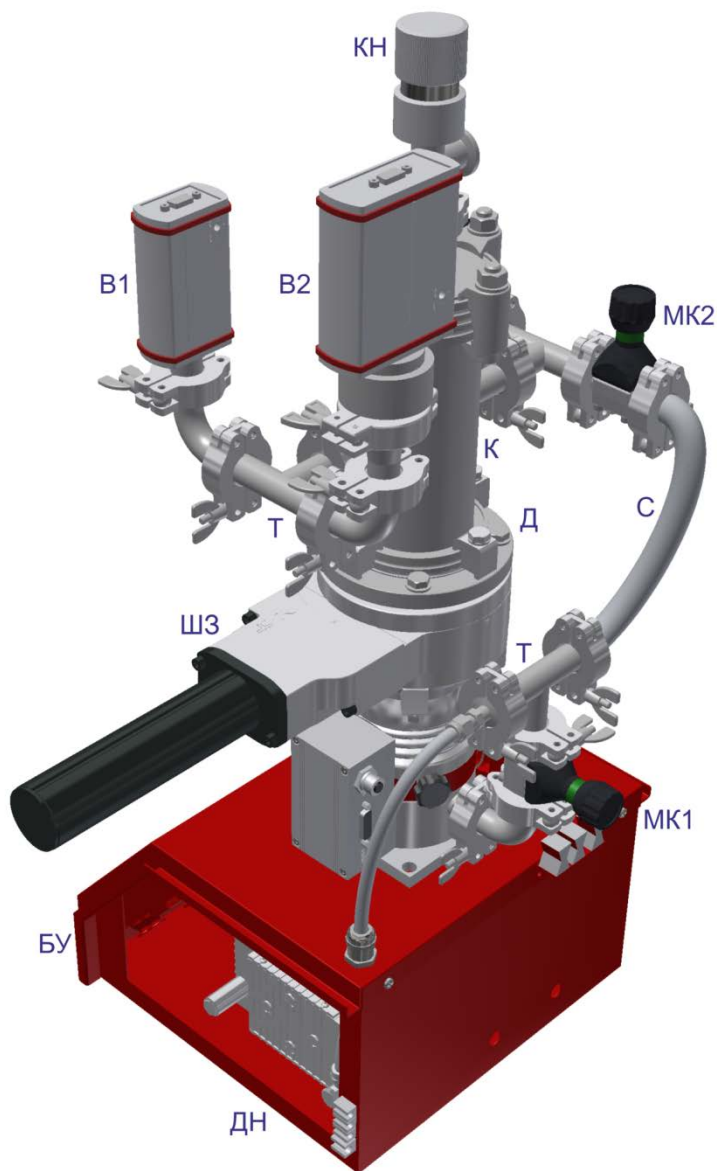


Рис. 12. Внешний вид экспериментального стенда (вид сзади-сбоку)

## Задание

## I. Подготовка к работе и подключение системы управления

**I.1.** Сопоставьте элементы схемы (рис. 10) с соответствующими частями самой установки.

**I.2.** *Выровняйте давление во всех частях установки.* ↓

Последовательно откройте краны МК1, МК2, МК3 поворотом ручек против часовой стрелки (зеленые метки на кранах должны быть максимально видны), потом откройте шибер ШЗ (ручка шибера в крайнем дальнем от установки положении).



**Внимание:** Для открытия шибера ШЗ нажмите левой рукой ручку вниз (1), далее потяните вправо (2) и в конце поднимите вверх (3), как показано на рис. 13. При этом правой рукой придерживайте корпус (4), чтобы не сдвинуть установку. В результате такого движения заслонка (5) сдвинется вправо и откроет вход ТМН насоса.

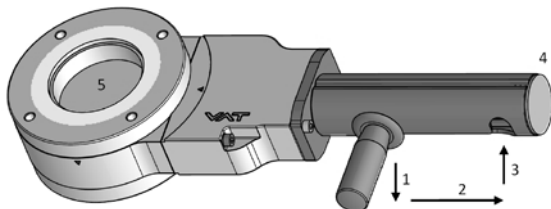


Рис. 13. Схема открытия шибера затвора

**I.2.** *Впустите атмосферный воздух в установку через кран-напекатель КН с верхней и нижней ручкой регулировки.* ↓

Если на КН установлена пластиковая защитная заглушка, снимите её. Нижнюю двухпозиционную ручку КН переведите в положение «открыто» (указатель в позиции «ореп»). Верхнюю ручку тонкой регулировки КН плавно вращайте до упора в сторону увеличения показаний механического счётчика.

**I.3.** *Подготовьте систему к форвакуумной откачке.* ↓

Закройте КН нижней поворотной ручкой (указатель в позиции «close»). Закройте кран МК3, шибер ШЗ, а краны МК1 и МК2 оставьте открытыми. Определите по схеме, по каким магистралям и какие объёмы будут откачиваться форвакуумным насосом при данном состоянии кранов.

### **I.4.** *Включите питание установки и компьютер ПК.* ↓

Зелёную кнопку на передней панели установки переведите в положение «I» (она должна засветиться). Потом включите компьютер ПК и дождитесь загрузки операционной системы.

### **I.5.** *Запустите программу управления PV TurboViewer.* ↓

Разверните окно программы на весь экран. Ознакомьтесь со справкой программного обеспечения, вызываемой кой [help?]<sup>9</sup> (рис. 14), и пользуйтесь ей по мере необходимости.

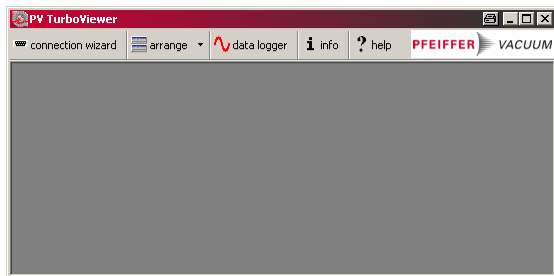


Рис. 14. Главное окно

### **I.6.** *Установите связь с блоком управления БУ насосами и вакуумметрами.* ↓

Вызовите окно мастера подключения [connection wizard] (рис. 15). В появившемся окне нажмите кнопку поиска множества устройств [find multiple devices]. Остановите процесс поиска кнопкой [enough] после того, как будет обнаружено три (3 devices found) подключённых устройства (рис. 16): откачной пост и два вакуумметра (разд. сп. <Connection Wizard><sup>10</sup>).

В результате этих действий в программе должно появиться три окна: окно индикации и управления вакуумным постом с помощью блока управления TC 110 (БУ) [COM#.00#: TC 110], окна индикации и управления терморезисторным вакуумметром PPT 100 (B1) [COM#.00#: PPT 100] и комбинированным вакуумметром MPT 100 (B2) [COM#.00#: MPT 100]. В окнах вакуумметров отображаются текущие показания в миллибарах [mbar] (разд. сп. <Pressure Gauge>), в окне управления

<sup>9</sup> Здесь и далее названия кнопок, окон, всплывающих меню и др. элементов программы указаны в квадратных скобках.

<sup>10</sup> Здесь и далее в треугольных скобках будут указаны соответствующие разделы справки, с которыми рекомендуется ознакомиться перед выполнением тех или иных действий (разд. спр. <Introduction>).

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

насосами отображаются текущие показания скорости вращения ротора насоса ТМН в оборотах в минуту [rpm] и потребляемая турбиной мощность в ватах [W] (разд. сп. <Turbopump>).

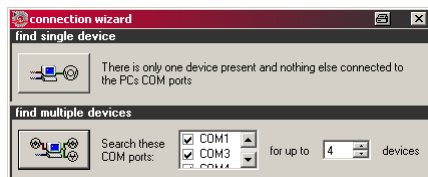


Рис. 15. Окно мастера подключения

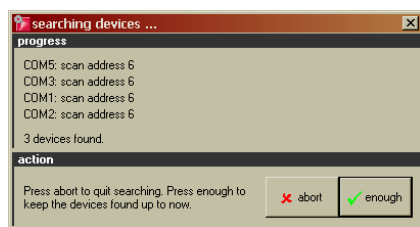


Рис. 16. Окно поиска устройств

Переключение между разными единицами измерения вакууметров и показаниями параметров работы насоса ТМН осуществляются нажатием левой кнопкой мыши на значении соответствующего параметра<sup>11</sup>.

#### 1.7. Выберите данные для отображения и сохранения. ↓

Вызовите окно загрузки данных кнопкой [data logger]. Расположите все окна удобным образом с помощью кнопки [arrange]. Поочередно одной из четырёх кнопок с цветными линиями выберите следующие параметры для отображения и записи (при этом индикатор на кнопке станет зелёным):

– скорость вращения турбины ТМ насоса:

[select data source for this graph] → [COM#.00#: TC 110] → [309: ActualSpd]<sup>12</sup>;

<sup>11</sup> Для вакуумметров рекомендуется выбрать единицы измерения *мбар (mbar)* (см. прил. Г) в экспоненциальном виде <x,yE-z>, где x,y — мантисса, -z — порядок, поскольку именно в таком виде данные записываются в файл.

<sup>12</sup> # обозначены текущие цифры соответствующего номера адреса связи устройства с ПК.

## 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

- потребляемая турбиной ТМ насоса мощность:  
[select data source for this graph] → [COM#.00#: TC 110] → [316: DrvPower];
  - показания вакуумметра В2:  
[select data source for this graph] → [COM#.00#: MPT 100] → [740: Pressure];
  - показания вакуумметра В1:  
[select data source for this graph] → [COM#.00#: PPT 100] → [740: Pressure].
- Расположите все показания на одном графике кнопкой [show all data in one diagram]. Установите интервал получения данных [time resolution] 2 секунды (разд. сп. <Data Logger>).

### 1.8. Включите запись выбранных данных в файл<sup>13</sup>. ↓

В окне загрузки данных [data logger] с помощью кнопки сохранения [store to file]<sup>14</sup> создайте в окне [save data to file] текстовый документ<sup>15</sup> и выберите его для сохранения данных лабораторной работы (при этом индикатор на кнопке станет зелёным). Включите запись кнопкой [start/stop logging].

В результате указанных действий выбранные данные будут записываться в созданный файл, строиться на графике и отображаться в таблице с заданным интервалом времени (рис. 17).

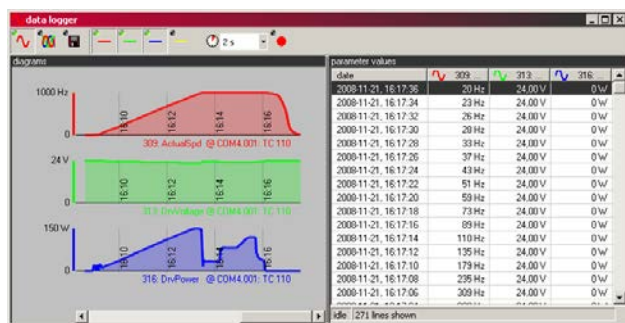


Рис. 17. Основное окно загрузки данных

<sup>13</sup> Альтернативный, но менее удобный вариант — производить съемку показаний датчиков используя напр. смартфон. Также периодически можно делать скриншоты для выполнения оценок.

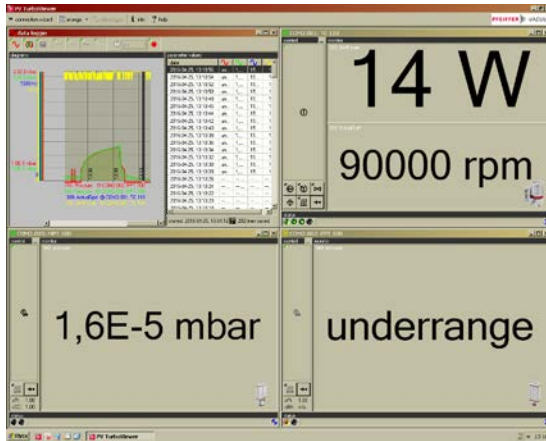
<sup>14</sup> Названия кнопок с пиктограммами появляется во всплывающем меню при наведении мыши, что позволяет быстро их отыскать.

<sup>15</sup> Желательно название файла указать в следующем формате <ГГГГ-ММ-ДД Фамилия\_студента Номер\_группы.txt>, где ГГГГ-ММ-ДД – текущая дата в указанном формате.

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

Во время выполнения операций с блоком БУ может быть временно прекращено получение выбранных данных, что отображается на графике серой областью, а в файле с данными — прочерками в соответствующих местах. Кнопкой [start/stop logging] можно останавливать запись данных, однако для возобновления записи в таком случае понадобится создать новый файл, иначе информация в первоначальном файле будет стерта.

Характерный вид программы со всеми необходимыми для работы окнами представлен на рис. 18.



Слева направо и сверху вниз: окно загрузки данных, окно индикации и управления вакуумным постом ТС 110 (БУ), окна индикации и управления комбинированным вакуумметром МРТ 100 (B2) и терморезисторным вакуумметром РРТ 100 (B1)

Рис. 18. Характерный вид программы со всеми необходимыми для работы окнами

### 1.9. *Подготовьте рабочую тетрадь для фиксации ключевых параметров.* ↓

Табл. 1. Таблица записи ключевых показаний и действий

Время	Показания B1	Показания B2	Мощность TMH	Пункты задания и комментарии
$t$ , чч:мм:сс	$P_1$ , мбар	$P_2$ , мбар	$W$ , Вт	
...	...	...	...	...

Так как запись данных происходит в течение всей работы, то в рабочей тетради можно фиксировать только ключевые показания, периоды времени по часам ПК (поле [date] таблицы [parameter values] окна [data logger]) и делать соответствующие пометки, чтобы в дальнейшем при обработке записанных данных идентифицировать их со своими действиями. Для этих целей удобно предварительно заготовить в тетради несколько листов в виде таблицы (табл. 1.) и заполнять соответствующие ячейки по мере необходимости.

### II. Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом

**II.1.** *Убедитесь, что турбомолекулярный насос ТМН не будет задействован в процессе откачки.* ↓

Вызовите параметр блокировки насоса ТМН в окне блока БУ [COM#.00#: TC 110] и проверьте, отключен ли он: [set random parameter value]<sup>16</sup> → [023: MotorPump] → [set value] (переверните индикатор в серый цвет) → [set to selected value]. Ещё раз проверьте состояние кранов (см. пп. I.3).


**II.2.** *Откачайте установку форвакуумным насосом ДН.* ↓

Включите форвакуумный насос кнопкой [pumping station] окна блока БУ [COM#.00#: TC 110]. Отметьте время запуска в тетради. Откачайте установку до предельного давления, которое можно определить по динамике показаний вакуумметров.

Если по истечении ~5 минут показания вакуумметров будут отличаться от заявленного производителем предельного давления насоса 3,5 мбар (см. прил. 1Б) более чем на порядок, остановите откачку (кнопка [pumping station]) и ещё раз проверьте состояние кранов.

Зафиксируйте время откачки и предельное давление в системе.

**II.3.** *Присоедините к установке сильфон с воздухом при атмосферном давлении.* ↓

 **Внимание:** во время монтажа ко всем вакуумным поверхностям соединительных элементов, включая уплотнительные кольца, можно касаться только используя латексные перчатки<sup>17</sup>!

Отсоедините заглушку 3 от крана МКЗ (кран МКЗ **закрыт!**). Протрите вакуумные поверхности сильфона С, заглушки 3, а также уплотнительные кольца безворсовой тканью смоченной обезжиривающей жидко-

<sup>16</sup> Нижняя правая кнопка окна [COM#.00#: TC 110] из шести кнопок управляющих параметрами.

<sup>17</sup> См. правила вакуумной гигиены на стр. 25.

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

стью. Установите заглушку 3 на один конец гибкого шланга<sup>18</sup>, а другой конец присоедините к крану МК3 (см. прил. 1А).

При этом в шланге между заглушкой и краном будет «заперто» **265 мл** воздуха при атмосферном давлении.

**II.4.** Выровняйте давления в шланге С и вакуумной камере К экспериментального стенда.

Переключите откачку вакуумной камеры К, закрыв кран МК2. Далее **предельно плавно**, не допуская резкого изменения показаний вакуумметров, откройте кран МК3 для распространения «запертого» воздуха по объёму вакуумной камеры К (насос ДН должен оставаться **включенным!**). Зафиксируйте установившиеся показания вакуумметров<sup>19</sup>. Сделайте выводы о точности показаний каждого из вакуумметров в данном диапазоне измерений.

**II.5.** *Выровняйте давление вакуумной камеры К и форвакуумной магистрали установки.* ↓

Закройте кран МК1 и отключите форвакуумный насос ДН. При этом, несмотря на отключенный насос, в связи с хорошей герметичностью вакуумных соединений и запирающему обратному клапану насоса давление в форвакуумной линии будет оставаться практически постоянным достаточное для проведения измерений время. Тем не менее, рекомендуется не делать больших пауз между действиями, чтобы исключить влияние возможного натекания. Далее плавно откройте кран МК2 и зафиксируйте установившиеся показания вакуумметров.

**II.6.** Выровняйте давление во всей установке, включая объем турбомолекулярного насоса ТМН.

Плавно откройте кран МК1, запустив воздух в объем насоса ТМН. Зафиксируйте установившиеся показания вакуумметров (насос ДН должен оставаться **выключенным!**).

**II.7.** *Напустите в установку воздух до атмосферного давления.* ↓

Плавно поверните нижнюю поворотную ручку натекателя КН против часовой стрелки (против указанного стрелками направления) до упора (указатель в позиции «open»).

**II.8.** *Подготовьте установку к повторному выполнению части II задания.* ↓

Закройте натекатель КН нижней поворотной ручкой (указатель в позиции «close»). Закройте кран МК3.

<sup>18</sup> Все необходимые вакуумные элементы можно получить у лаборанта.

<sup>19</sup> Время установления давления может составлять до 1–2 минут.



**П.9.** Измерения по пп. П.2–П.8 повторите ещё 1–2 раза, каждый раз фиксируя время начала работы форвакуумного насоса ДН.

Если достигается приемлемая повторяемость, можно переходить к следующей части задания.

Расчетное время выполнения частей I, II задания не более 1 часа.

*Определите объёмы вакуумных частей установки согласно пп. VII.1. Определите скорость откачки системы насосом ДН по улучшению вакуума во время откачки согласно пп. VII.2.<sup>20</sup> Для получения требуемых параметров используйте файл с записанными данными.*

### III. Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума

**III.1.** *Отсоедините сильфон от установки.* ↓



**Внимание:** во время демонтажа ко всем вакуумным поверхностям соединительных элементов, включая уплотнительные кольца, можно касаться, только используя латексные перчатки! После окончания демонтажа поместите все неиспользуемые вакуумные детали в герметичный пакет с замком.

Отсоедините сильфон от установки и установите заглушку 3 на кран МК3. Откройте кран МК3, чтобы убрать из установки запертый объем с воздухом между заглушкой 3 и краном МК3. Убедитесь, что натекаТЕЛЬ КН закрыт.

**III.2.** Откачайте установку форвакуумным насосом ДН (см. пп. П.2).

**III.3.** *Откачайте объём турбомолекулярным насосом ТМН.* ↓

Откройте шибер ШЗ, закройте кран МК2. Определите по схеме, по каким магистралям и какие объёмы будут откачиваться двумя насосами при данном состоянии кранов.

Для включения насоса ТМН снимите его блокировку: [set random parameter value] → [023: MotorPump] → [set value] (переведите индикатор в зелёный цвет) → [set to selected value]. Отметьте время начала работы насоса ТМН.

Откачайте установку до предельного давления, которое можно определить по динамике показаний вакуумметров. Если по истечении ~5 минут скорость вращения турбины не выйдет на предельные 90 000 об/мин (см. прил. 2Б), остановите откачку (кнопка [pumping station] окна блока БУ [COM#.00#: TC 110]) и ещё раз проверьте состояние кранов.

<sup>20</sup> Обработку данных рекомендуется выполнять после завершения работы на установке.

Проанализируйте работу вакууметров. Убедитесь, что терморезисторный вакуумметр В1 достиг своего предела измерений, в то время как комбинированный вакуумметр В2 (точнее его магнетронная часть) продолжает отображать корректное давление в системе. Зафиксируйте предельное давление в высоковакуумной части установки и время откачки установки насосом ТМН.

**III.4.** *Определите уровень течей и скорость откачки системы.* ↓

Закройте шибер ШЗ, при этом давление в системе начнёт повышаться за счёт наличия течей. Получите таким образом зависимость показаний вакуумметра В2 от времени. Когда давление превысит  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар, снова откройте шибер.

Получите зависимость показаний вакуумметра В2 от времени после открытия шибера. Снова зафиксируйте предельное давление. Время снятия показаний по пп. III.4 не должно превышать 10 мин.

**III.5.** Измерения по пп. III.4 повторите ещё 1–2 раза, каждый раз фиксируя время закрытия и открытия шибера ШЗ.

Если достигается приемлемая повторяемость, можно переходить к следующей части задания.

Расчетное время выполнения части III задания не более 0,5 часа. Если времени на выполнение следующих заданий не остается, переходите к завершающей части VI.

*Определите скорость откачки системы насосом ТМН по улучшению вакуума во время откачки согласно пп. VII.3. Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки шиберам согласно пп. VII.4. Для получения требуемых параметров используйте файл с записанными данными.*

## IV.\* Создание искусственной течи и определение давления перехода в молекулярный режим

**IV.1.** Убедитесь, что камера откачана до предельного давления (см. пп. III.3).

Зафиксируйте предельное давление и мощность, потребляемую турбиной ТМН.

**IV.2.** *Подготовьте натекатель КН к напуску воздуха в камеру.* ↓

Закройте натекатель КН ручкой тонкой регулировки сверху, плавно вращая ее в сторону уменьшения показаний механического счётчика до упора. После чего переведите нижнюю двухпозиционную ручку натекателя КН в положение «открыто» (указатель в позиции «open»).

### IV.3. *Создайте искусственную течь в системе натекателем КН.* ↓



**Плавно** начинайте поворачивать ручку тонкой регулировки КН в сторону увеличения показаний счетчика, тем самым создавая искусственную течь в системе. Наблюдайте за показаниями вакуумметра В2, потребляемой турбиной ТМН мощностью и скоростью её вращения. Как только мощность изменится на 1 Вт зафиксируйте показания вакуумметра В2 и мощность турбины ТМН. При этом показания мощности могут «плавать» вокруг среднего значения изменяясь на 1–2 Вт, однако среднее значение во времени должно быть фиксировано.

После фиксации текущих значений продолжайте **крайне плавно** поворачивать ручку тонкой регулировки КН, увеличивая течь, до очередного изменения мощности турбины на 1 Вт. Поскольку натекание растёт нелинейно с показаниями счетчика (см. прил. 4Б), необходимо **замедлять вращение** ручки тонкой регулировки КН с увеличением давления в системе. Таким образом, снимите подробную зависимость мощности от давления в объеме камеры (до 30 точек).

Во время выполнения данной части задания обязательно следите за скоростью вращения турбины, она всегда должна вращаться на предельной скорости 90 000 об/мин. Как только обороты начнут уменьшаться, нужно закончить текущую серию измерений.

### IV.4. *Повторите измерения п. IV.3. в обратном порядке.* ↓

Плавно поворачивайте ручку тонкой регулировки в сторону уменьшения показаний счетчика. Таким образом, снимите подробную зависимость мощности от давления в объеме камеры (до 30 точек).

### IV.5.\* Измерения по пп. IV.3–IV.4 повторите ещё 1–2 раза.

Если достигается приемлемая повторяемость, можно переходить к следующей части задания.

Расчетное время выполнения части IV задания не более 0,5 часа. Если времени на выполнение следующего задания не остается, переходите к завершающей части VI.

*Постройте зависимость мощности турбины от давления, оцените давление перехода в молекулярный режим течения согласно пп. VII.5, укажите её на графике зависимости.*

#### V.\* Откачка объема через диафрагмы<sup>21</sup>

##### V.1. *Остановите откачку установок.* ↓

Нажмите кнопку [pumping station] окна блока БУ [COM#.00#: TC 110]. Зафиксируйте время выключения откачки. Когда ротор ТМН полностью остановится (частота ротора 0 Гц), зафиксируйте время его остановки. К следующему подпункту задания можно переходить не дожидаясь полной остановки ротора.

##### V.2. *Установите диафрагму Д перед входным фланцем насоса ТМН.* ↓



**Внимание:** во время монтажа ко всем вакуумным поверхностям соединительных элементов, включая уплотнительные кольца, можно касаться только используя латексные перчатки!

Пока ротор останавливается, приготовьте диафрагму Д с отверстием **10 мм** для установки вместо центрирующего и уплотнительного колец ISO-K DN63 (см. прил. 2А) между шибером ШЗ и камерой К. Тщательно протрите все поверхности диафрагмы и соответствующего уплотнительного кольца обезжиривающей жидкостью. Соедините их между собой и разместите рядом с камерой К на алюминиевой поверхности шибера ШЗ, также предварительно протерев его поверхность обезжиривающей жидкостью.

После остановки ротора выровняйте давления по обе стороны шибера ШЗ открыв кран МК2. Откройте шибер ШЗ. Напустите воздух в установку через натекатель КН (см. пп. I.2). После напуска атмосферы переведите нижнюю двухпозиционную ручку натекателя КН в положение «закрыто» (указатель в позиции «close»).

Отвинтите гайки-барашки, постепенно и попарно ослабляя ручную противоположные крепления. Снимите все гайки-барашки, шайбы и соответствующие струбины, оставив только резьбовые шпильки.

Аккуратно приподнимите камеру К и извлеките из под нее центрирующее и уплотнительное кольцо ISO-K DN63.

Во время этой процедуры, заглянув в отверстие шибера ШЗ, можно увидеть лопасти ротора насоса ТМН. Оцените «на глаз» размеры зазоров между лопатками ротора. Также посмотрите на механизм заслонки шибера затвора, несколько раз закрыв и открыв его.

Вместо извлеченных центрирующего и уплотнительного колец ISO-K DN63 установите приготовленную заранее диафрагму с уплотнением.

Установите камеру К на диафрагму Д и закрепите её используя струбины, шайбы и гайки-барашки. Для попарного и постепенного затя-

<sup>21</sup> Данный пункт рекомендуется выполнять только с ассистентом.

гивания вручную гаек-барашек можно дополнительно воспользоваться шестигранником, который поможет зафиксировать положение соответствующих резьбовых шпилек.

После установки диафрагмы Д и затягивания креплений можно переходить к следующему пункту.

**V.3.** *Подготовьте установку для откачки насосом ДН через диафрагму.* ↓

Закройте кран МК2, а остальные, включая шибер ШЗ, оставьте открытыми. Определите по схеме, по каким магистралям будет откачиваться форвакуумным насосом камера К при данном состоянии кранов.

**V.4.** *Откачайте установку форвакуумным насосом ДН (см. пп. II.1–II.2, **но с вышеуказанным состоянием кранов!**).*

Зафиксируйте время включения насоса, время откачки, предельное давление в системе. Во время откачки можно дополнительно затянуть винты-барашки для уменьшения возможных течей.

**V.5.** *Откачайте установку турбомолекулярным насосом ТМН, сняв его блокировку (см. пп. III.3, **краны уже находятся в правильном состоянии!**).*

Зафиксируйте время включения насоса, время откачки, предельное давление в системе.

**V.6.** *Проведите измерения аналогично пп. III.4–III.5.*

**V.7.** *Проведите ещё одну серию экспериментов аналогично пп. V.1–V.6, используя диафрагму Д с отверстием диаметром **3 мм**.*

**V.8.** *Снимите диафрагму Д с установки.* ↓



**Внимание:** во время демонтажа ко всем вакуумным поверхностям соединительных элементов, включая уплотнительные кольца, можно касаться только используя латексные перчатки! После окончания демонтажа пометите все неиспользуемые вакуумные детали в герметичный пакет с замком.

Вновь установите центрирующее и уплотняющее кольца ISO-K DN63 вместо диафрагмы и откачайте установку до предельного вакуума (см. пп. II.1–II.2, III.3 но без диафрагмы). После этого можно приступить к процедуре завершения работы на экспериментальном стенде.

Расчетное время выполнения части V задания не более 1 часа.

*Определите скорость откачки системы насосом ДН по улучшению вакуума во время откачки согласно п. VII.2. Определите скорость откачки системы насосом ТМН по улучшению вакуума во время откачки согласно п. VII.3. Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки шибером согласно п. VII.4.*

## VI. Выключение установки

**VI.1.** После завершения всех действий на установке вновь откачайте её до предельного вакуума (см. пп. II.1–II.2, III.3).

**VI.2.** Закройте последовательно краны МК3, МК2, МК1, ШЗ и отключите откачку (кнопка [pumping station] окна блока БУ [COM#.00#: TC 100]).

Установка в этом случае останется в откачанном состоянии.

**VI.3.** Остановите запись данных и закройте программу PV TurboViewer.

**VI.4.** Загрузите файл с данными на ваш облачный сервис или на флеш-накопитель, выключите компьютер и питание экспериментального стенда.

*Все необходимые материалы для подготовки отчёта (в том числе и это описание) вы найдёте на сайте кафедры<sup>22</sup>.*

## VII. Обработка экспериментальных данных

**VII.1.** Загрузите данные из файла. ↓

Для этого удобно воспользоваться рекомендациями, указанными в прил. В.

**VII.2.** Зная объём «запертого» в сильфоне воздуха (пп. II.3) определите, пользуясь законом Бойля-Мариотта, полный объём установки, высоковакуумной части (камера К), форвакуумной магистрали и самого насоса ТМН. Определите эти части на схеме, оцените погрешности.

**VII.3.** *Оцените эффективную скорость откачки системы форвакуумным насосом в области, где она почти постоянна* (см. прил. 1Б, рис. 21) *в разных условиях: по схеме «байпас»* (пп. II.2, III.2), *через диафрагмы 10 мм и 3 мм* (пп. V.4), *через фланец насоса ТМН* (пп. V.8). ↓

Из файла возьмите данные зависимости давления в камере К от времени откачки насосом ДН. По зависимости  $\ln P$  от  $t$  определите постоянную времени откачки  $\tau$  (2.17) в диапазоне давлений  $10^1$ – $10^2$  мбар. Зная объём камеры К установки  $V_0$  (пп. VII.2), рассчитайте эффективную скорость её откачки  $S_0$ . Сделайте вывод о влиянии пропускной способности элементов вакуумной системы, оцените погрешности, сравните полученные данные с техническими характеристиками насоса. Определите

---

<sup>22</sup> Кафедра общей физики / II семестр / лаборатория —  
[https://mipt.ru/education/chair/physics/S\\_II/lab/](https://mipt.ru/education/chair/physics/S_II/lab/)

суммарную пропускную способность соответствующих доз  $U$  (включая диафрагмы) (2.5).

**VII.4.** *Оцените эффективную скорость откачки системы турбомолекулярным насосом в области, где она почти постоянна (см. прил. 2Б, рис. 22) в разных условиях: через фланец насоса ТМН (п. III.3–III.4), через диафрагмы 10 мм и 3 мм (п. V.5–V.7).* ↓

Из файла возьмите данные зависимости давления в камере К от времени откачки насосом ТМН. По зависимости  $\ln P$  от  $t$  определите постоянную времени откачки  $\tau$  (2.17) в диапазоне давлений  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  мбар. Зная объём камеры К установки  $V_0$  (п. VII.2), рассчитайте эффективную скорость её откачки  $S_0$ . Сделайте вывод о влиянии пропускной способности диафрагм, оцените погрешности, сравните полученные данные с техническими характеристиками насоса. Определите пропускную способность диафрагм  $U$  (2.5), сравните экспериментальные данные с расчетными значениями (2.10).

**VII.5.** *Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН.* ↓

Из файла возьмите данные зависимости давления в камере К от времени натекания после перекрытия откачки шибером ШЗ (пп. III.4, V.5). Рассчитайте натекание  $Q_n$  (2.6) и проверьте, выполняется ли условие (2.7) для заданных выше диапазонов давлений (пп. VII.3, VII.4).

**VII.6.\*** *Исследуйте зависимость мощности турбины ТМН от давления в камере К при создании искусственной течи.* ↓

Из файла возьмите данные зависимости мощности турбины ТМН от давления в камере К (пп. IV.3–IV.5). Исследуйте монотонность зависимости  $W$  от  $P$ . Определите коэффициент угла наклона линейного участка кривой. Оцените давление перехода в молекулярный режим течения используя в качестве характерной длины расстояние между лопатками турбины, укажите полученное давление на графике  $W(P)$ .

Предложите объяснение линейной зависимости  $W$  от  $P$ , используя соотношения для явлений переноса в газах, оцените из этих соображений угол наклона прямой.

Чем можно объяснить нелинейный участок зависимости  $W(P)$  в области предельных давлений? Для наглядности данных в области предельных давлений можно дополнительно построить зависимость  $W(\ln P)$ .

**VII.7.** Оцените число Кнудсена для предельных давлений при форвакуумной и высоковакуумной откачке в разных частях вакуумной системы.

## Приложение А. Некоторые типы вакуумных компонентов

Ниже представлены наиболее распространённые фланцевые быстроразъёмные типы вакуумных компонентов с витонным уплотнением и тип соединений с металлическими уплотнителями. Приведены их основные свойства, типоразмеры и примеры монтажа<sup>23</sup>.

### 1А. Тип ISO-KF

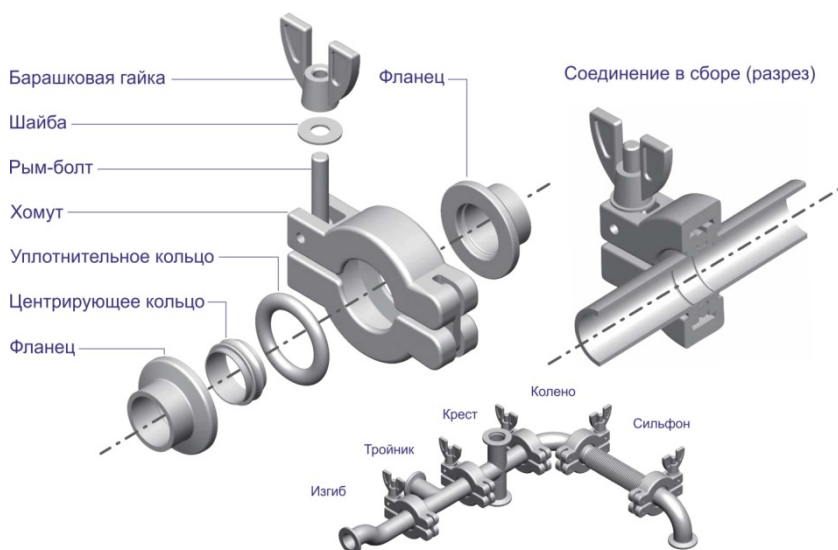


Рис. 19. Вакуумные компоненты типа ISO-KF

Табл. 2. Свойства компонентов типа ISO-KF

Другие названия	Quick Flange (QF), Klein Flange (KF) или NW
Типоразмеры (диаметр условный, ДУ)	DN10, 16, 20*, 25, 32*, 40, 50*
Материал	нержавеющая сталь, алюминий, стекла, пластики
Уплотнение	витон (Viton), каучук (NBR, CR) и др.
Рабочая температура	от -20 до 200 °C
Предельный вакуум	10 <sup>-8</sup> Торр
Стандарт изготовления	DIN 28403 / ISO 2861

<sup>23</sup> По материалам Htc Vacuum <http://www.high-light.com.tw/>, Kurt J. Lesker Company <http://www.lesker.com/>, Vacom Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH <http://www.vacom.de/>



### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

\* как правило, не применяются.

Преимущества использования: быстрый и простой монтаж без использования инструментов, многообразие компонентов, уплотнения многократного использования.

#### 2А. Тип ISO-K (ISO-F)



Рис. 20. Вакуумные компоненты типов ISO-K (под хомуты), ISO-F (болтовые)

Табл. 3. Свойства компонентов типа ISO-K (под хомуты), ISO-F (болтовые)

Другие названия	ISO, Large ISO, Large-Flange (ISO LF)
Типоразмеры (диаметр условный, ДУ)	DN63, 80, 100, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630
Материал	нержавеющая сталь, алюминий
Уплотнение	витон (Viton), каучук (NBR, CR) и др.
Рабочая температура	от -20 до 200 °C
Предельный вакуум	10 <sup>-8</sup> Торр
Стандарт изготовления	DIN 28404 / ISO1609

Преимущества использования: быстрый и простой монтаж, многообразие вариантов соединений и компонентов, уплотнения многократного использования.

Приложение Б. Технические характеристики экспериментального стенда

Ниже представлены основные технические характеристики средств откачки и измерения давления экспериментального стенда.

1Б. Диафрагменный форвакуумный насос MVP 015 (ДН)<sup>24</sup>

Табл. 4. Технические характеристики

Внешнее давление, макс.	110 кПа   825 Торр   1100 мбар
Фланец входной	G 1/8" коленчатое соединение + армированный шланг DN 6 x 1000 мм с прямым переходником G 1/4" на конце
Фланец выходной	G 1/8" + глушитель
Уровень течей	$5 \cdot 10^{-4}$ Па м <sup>3</sup> /с   $3,75 \cdot 10^{-3}$ Торр л/с   $5 \cdot 10^{-3}$ мбар л/с
Скорость откачки	0,50 м <sup>3</sup> /ч
Скорость вращения ротора	1500 об/мин
Предельное давление с газобалластом	$\leq 450$ Па   $\leq 3,38$ Торр   $\leq 4,5$ мбар
Предельное давление без газобалласта	$\leq 350$ Па   $\leq 2,62$ Торр   $\leq 3,5$ мбар

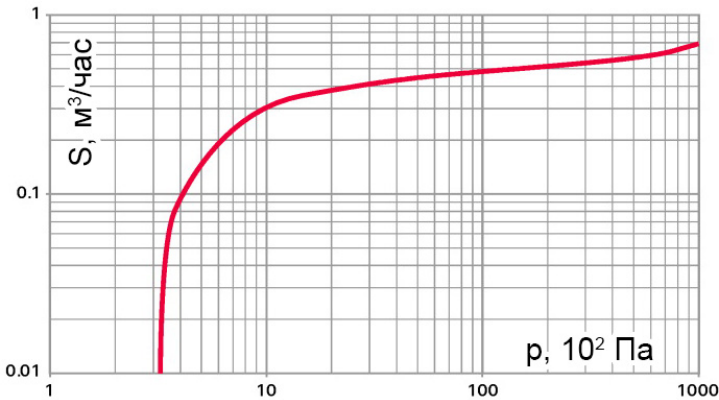


Рис. 21. Зависимость быстроты действия на входе в насос от входного давления

<sup>24</sup> Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Operating instructions MVP 015-2 with GB valve and single phase wide range motor (PU0012BEN\_G)

## 2Б. Турбомолекулярный насос HiPace 80 (ТМН)<sup>25</sup>

Табл. 5. Технические характеристики

Максимальное разрежение на выходе по N <sub>2</sub>	2200 Па   16,5 Торр   22 мбар
Фланец входной	DN 63 ISO-K
Фланец выходной	DN 16 ISO-KF + переходник на G 1/4"
Уровень течей при предельной скорости вращения ротора по N <sub>2</sub>	1,3 · 10 <sup>2</sup> Па л/с   0,98 Торр л/с   1,3 мбар л/с
Скорость откачки	66 л/с по Ar, 48 л/с по H <sub>2</sub> , 58 л/с по He, 67 л/с по N <sub>2</sub>
Скорость вращения ротора	90000 об/мин
Предельное давление	< 1 · 10 <sup>-7</sup> Па   < 7,5 · 10 <sup>-8</sup> Торр   < 1 · 10 <sup>-7</sup> мбар
Интерфейс управления	RS-485

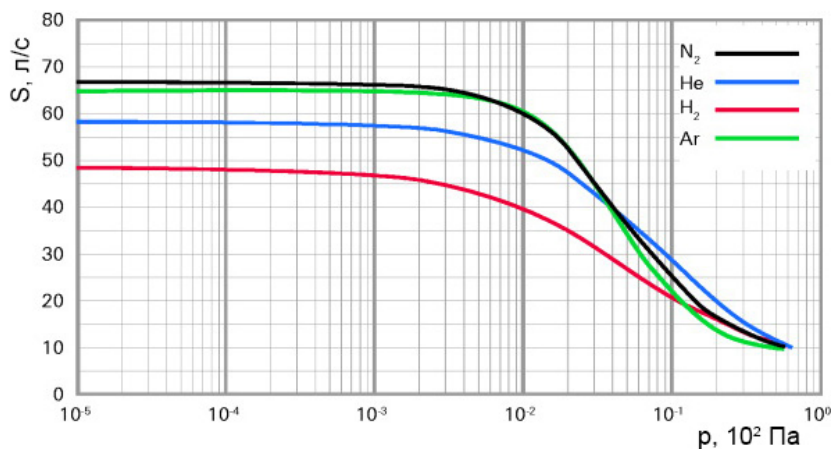


Рис. 22. Зависимость быстроты действия на входе в насос от входного давления

<sup>25</sup> Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Operating instructions HiPace 80 with TC 110 (PT0208BEN\_I)

ЗБ. Вакууметр PPT 100 типа Пирани (В1)<sup>26</sup>

Табл. 6. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 16 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	10 <sup>5</sup> Па   750 Торр   1000 мбар
Минимальное измеряемое давление	10 <sup>-2</sup> Па   7,5 · 10 <sup>-5</sup> Торр   1 · 10 <sup>-4</sup> мбар
Точность измерений	в диапазоне 1 · 10 <sup>-3</sup> – 1 мбар : ± 5%
Метод измерений	датчик Пирани, терморезисторный вакуумметр
Цикл измерений	40 мс
Интерфейс управления	RS-485 / RS-232

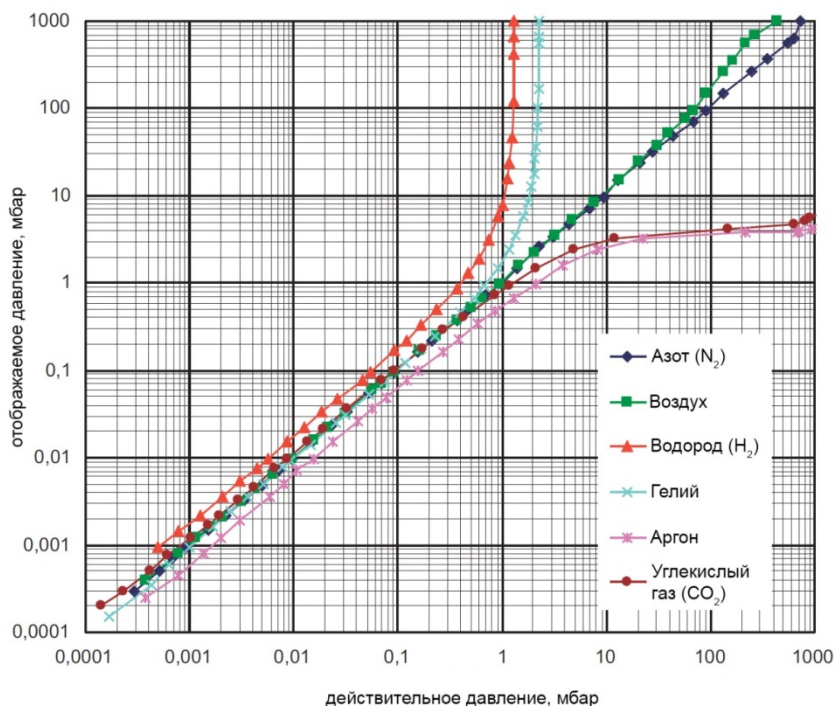


Рис. 23. Зависимость показаний от типа газа

<sup>26</sup> Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Operating instructions PPT 100 Digital Pirani Transmitter (PG0002BEN\_I)

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

Корректирующие коэффициенты для датчика Пирани или относительная чувствительность в молекулярном режиме ( $1 \cdot 10^{-1}$  мбар): 1,00 ( $N_2$ ), 1,00 (воздух), 0,58 ( $H_2$ ), 1,02 (He), 1,59 (Ar), 0,89 ( $CO_2$ ).

#### 4Б. Комбинированный вакуумметр MPT 100 (B2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон)<sup>27</sup>

Табл. 7. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 25 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	$10^5$ Па   750 Торр   1000 мбар
Минимальное измеряемое давление	$5 \cdot 10^{-7}$ Па   $3,75 \cdot 10^{-9}$ Торр   $5 \cdot 10^{-9}$ мбар
Точность измерений	в диапазоне $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-3}$ мбар : $\pm 25\%$ в диапазоне $1 \cdot 10^{-2} - 100$ мбар : $\pm 15\%$
Метод измерений	датчик Пирани, терморезисторный вакуумметр / ионизационный датчик с холодным катодом
Цикл измерений	40 мс
Интерфейс управления	RS-485 / RS-232

Корректирующие коэффициенты для ионизационного датчика с холодным катодом или относительная чувствительность в молекулярном режиме ( $1 \cdot 10^{-1}$  мбар): 2,39 ( $H_2$ ), 5,93 (He), 0,80 (Ar), 0,74 ( $CO_2$ ). Корректирующие коэффициенты для датчика Пирани такие же, как и в вакууметре PPT 100.

<sup>27</sup> Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Operating instructions MPT 100 Pirani/Cold Cathode Transmitter (PG0017BEN\_E)

### 2.3.1A Современные средства получения и измерения вакуума

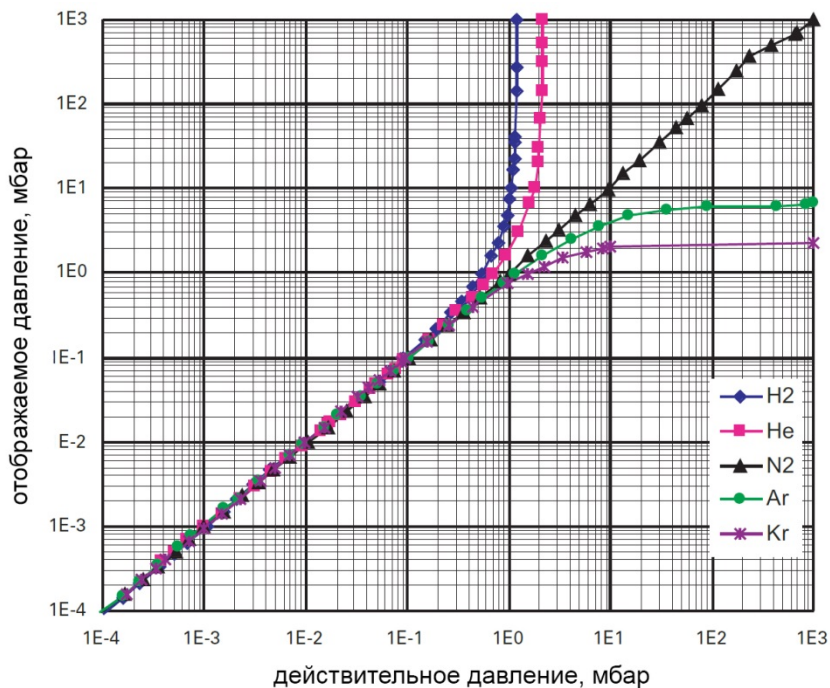


Рис. 24. Зависимость показаний от типа газа

## 4Б. Кран-натекатель EVN 116 (KH)<sup>28</sup>

Табл. 8. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 16 ISO-KF
Диапазон контролируемого потока	$5 \cdot 10^{-6}$ мбар л/с – 1000 мбар л/с
Уровень герметичности	$1 \cdot 10^{-9}$ мбар л/с
Максимальный перепад давлений	2,5 мбар
Запертый «мёртвый» объём	0,032 см <sup>3</sup>

<sup>28</sup> Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Operating instructions EVN 116 Dosing Valve (BP5005BEN)

### 2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

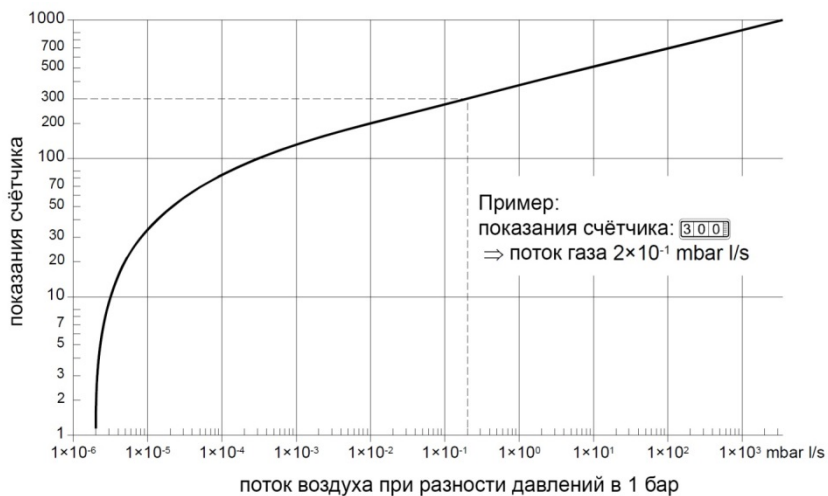


Рис. 25. Градуировочная кривая

## Приложение В. Работа с файлом данных

Пример структуры данных в текстовом файле показан в табл. 9. Ниже представлен способ обработки файла с данными с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel<sup>29</sup> версии 2007 и выше. Рассмотрим последовательность действий для графического выведения записанных параметров:

**В.1.** *Загрузите данные из текстового файла в программу.* ↓

Для этого в программе Microsoft Excel откройте необходимый лист, выделите мышкой левую верхнюю ячейку, перейдите на вкладку [Данные] и в группе [Получение внешних данных] нажмите [из текста] для загрузки данных из полученного в работе текстового файла. В появившемся окне выберите необходимый файл и нажмите кнопку [Импорт]. После этого откроется окно [Мастер текстов (импорт)] для выполнения нескольких последовательных шагов.

**В.2.** *Выполните необходимые действия для корректного отображения данных.* ↓

Для этого на первом шаге окна [Мастер текстов (импорт)] — шаг 1 из 3] укажите формат данных [с разделителями], укажите начать импорт со строки: 3 (первых две содержат техническую информацию) и нажмите кнопку [Далее]. На втором шаге [Мастер текстов (импорт)] — шаг 2 из 3] укажите, что символом-разделителем является [знак табуляции] (пробел] и [запятая] не выбирайте). При этом образец разбора данных должен поделиться на колонки однотипных данных. Для завершения импорта в программу нажмите кнопку [Готово]. Выберите, на какой лист следует поместить данные в следующем окне и нажмите кнопку [Ок]. В результате описанных действий в программе отобразится таблица с колонками записанных данных.

**В.3.** *Удалите все лишние нечисловые данные.* ↓

Для этого вызовите окно [Найти и заменить] сочетанием клавиш [Ctrl+F] и перейдите на вкладку [Заменить]. В поле [Найти:] введите «mbar» (без кавычек), а поле [Заменить на:] оставьте незаполненным, и нажмите кнопку [Заменить всё]. В результате единицы измерения давления в каждой ячейке будут удалены, а останутся только численные значения.

Выполните аналогичные действия с другими неиспользуемыми при обработке данными: с текущей датой в формате «YYYY-MM-DD», надписью «underrange», надписью «--- no data ---», единицами измерения частоты «Hz», единицами измерения мощности «W» (см. табл. 9). После

---

<sup>29</sup> Официальный сайт программы — <https://products.office.com/ru-ru/excel>



этого на странице останутся только 5 колонок с данными, необходимыми для анализа.

**В.4.** *Переведите время в формате «hh:mm:ss» в секунды.* ↓

Для этого просто создайте ещё одну колонку с отображением времени в секундах: 0, 2, 4, 6, 8, ... для всего периода измерений. Достаточно заполнить первых две ячейки числами 0 и 2, выделить их, навести мышь на нижний правый угол рамки выделения отмеченный точкой, и двойным щелчком левой кнопкой мыши продлить зависимость на весь временной интервал.

**В.5.** Далее можно приступить к построению необходимых диаграмм с помощью группы [Диаграммы] на вкладке [Вставка]. Полезно сначала построить зависимости на всём временном интервале для наглядности, а далее выбирать необходимые части для детального анализа согласно плану обработки экспериментальных данных.

Табл. 9 Структура данных текстового файла

	столбец 1	столбец 2	столбец 3	столбец 4	столбец 5
строка 1	date	COM#.00#: PPT 100	COM#.00#: MPT 100	COM#.00#: TC 110	COM#.00#: TC 110
строка 2	(YYYY-MM-DD hh:mm:ss)	P740: Pressure (mbar)	P740: Pressure (mbar)	P309: ActualSpd (Hz)	P316: DrvPower (W)
строка 3	2016-04-23, 13:36:58	underrange	1,1E-5 mbar	682 Hz	0 W
строка 4	2016-04-23, 13:37:00	underrange	1,1E-5 mbar	679 Hz	0 W
строка 5	2016-04-23, 13:37:02	--- no data ---	--- no data ---	--- no data ---	--- no data ---
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
строка N	2016-04-23, 13:38:36	--- no data ---	--- no data ---	--- no data ---	--- no data ---
строка N+1	2016-04-23, 13:38:38	7,5E-4 mbar	8,1E-4 mbar	449 Hz	0 W
строка N+2	2016-04-23, 13:38:40	8E-4 mbar	1E-3 mbar	446 Hz	0 W
...	...	...	...	...	...

- строка 1 — названия отображаемых параметров;
- строка 2 — единицы измерения отображаемых параметров;
- строки 3, 4, ..., N, N+1, N+2, ... — значения параметров;
- столбец 1 — дата и время соответствующих измерений;
- столбец 2 — данные по измерению давления вакуумметром PPT 100 в миллибарах;
- столбец 3 — данные по измерению давления вакуумметром MPT 100 в миллибарах;
- столбец 4 — данные по скорости вращения ротора ТМН в герцах;
- столбец 5 — данные по потребляемой турбиной ТМН мощности в ватах;
- underrange — давление ниже предела измерений вакуумметра PPT 100;
- --- no data --- — данные не получены.

## Приложение Г. Соотношения между часто используемыми единицами

Давление [ $L^{-1}MT^{-2}$ ]:

$$1 \text{ Торр (мм рт. ст.)} = 133,3 \text{ Па (Н/м}^2\text{)} = 1,333 \text{ мбар} = 19,337 \cdot 10^{-3} \text{ psi};$$

$$1 \text{ Па} = 0,01 \text{ мбар} = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ psi} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Торр};$$

$$1 \text{ мбар} = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ psi} = 100 \text{ Па} = 0,75 \text{ Торр};$$

$$1 \text{ psi}^{30} = 51,715 \text{ Торр} = 6894,8 \text{ Па} = 68,948 \text{ мбар}.$$

Быстрота откачивающего действия (скорость откачки), пропускная способность (проводимость) [ $L^3T^{-1}$ ]:

$$1 \text{ м}^3/\text{час} = 0,278 \text{ л/с} = 278 \text{ см}^3/\text{с};$$

$$1 \text{ л/с} = 10^3 \text{ см}^3/\text{с} = 3,6 \text{ м}^3/\text{час};$$

$$1 \text{ см}^3/\text{с} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{час} = 10^{-3} \text{ л/с}.$$

Поток, производительность, натекание [ $L^2MT^{-3}$ ]:

$$1 \text{ Торр л/с} = 0,133 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с} = 1,33 \text{ мбар} \cdot \text{л/с} = 1,3 \text{ sccm};$$

$$1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с (Вт)} = 10 \text{ мбар} \cdot \text{л/с} = 10 \text{ sccm} = 7,5 \text{ Торр} \cdot \text{л/с};$$

$$1 \text{ мбар} \cdot \text{л/с} = 1 \text{ sccm} = 0,75 \text{ Торр} \cdot \text{л/с} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с};$$

$$1 \text{ sccm}^{31} (\text{атм.} \cdot \text{см}^3/\text{мин}) = 0,76 \text{ Торр} \cdot \text{л/с} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с} = 1 \text{ мбар} \cdot \text{л/с}.$$

<sup>30</sup> Фунт-сила на квадратный дюйм (англ. pound-force per square inch, lbf/in<sup>2</sup>) — внесистемная единица измерения давления.

<sup>31</sup> Стандартный кубический сантиметр в минуту (англ. standard cubic centimeters per minute, см<sup>3</sup>/min) — единицы измерения потока в см<sup>3</sup>/мин при стандартной температуре (0°C) и давлении (760 мм. рт. ст.).

### Список литературы

1. Овчинников К.А. Измерительные приборы в лабораторном практикуме по общей физике. Приложение к сборнику лабораторных работ: Учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2003. 48 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. испр. и доп. 3-е изд. М.: Физматлит, 2013. 792 с.
3. Гладун А.Д., Александров Д.А., Игошин Ф.Ф., Коротков П.Ф., Корявов В.П., Овчинников А.П., Самарский Ю.А., Теврюков А.А. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие. В трёх томах. Т. 1. Термодинамика и молекулярная физика. испр. 3-е изд. М.: МФТИ, 2012. 292 с.
4. Умрас В., редактор. Основы вакуумной технологии. 00.200.07-е изд. Кёльн: Oerlikon Leybold Vacuum GmbH, 2007. 225 с.
5. Шешин Е.П. Вакуумные технологии. Догопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 504 с.
6. Плисковский В.Я. Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. М.: Машиностроение, 1976. 64 с.
7. Рот А. Вакуумные уплотнения. М.: Энергия, 1971. 464 с.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т.1. Механика. стер. 6-е изд. М.: Физматлит, 2013. 560 с.