



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

№ 2.3.1Б

(краткое описание)

Москва — 2019 год

Современные средства получения и измерения вакуума. Лабораторная работа № 2.3.1Б. (краткое описание) 2-е изд., испр. / Ворона Н. А., Гавриков А. В. — М.: МФТИ, 2019 — 49 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 49 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. Пластинчато-роторный насос	12
3.2. Турбомолекулярный насос.....	14
4. Средства измерения вакуума.....	15
4.1. Терморезисторный вакуумметр (Пирани)	15
4.2. Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)	17
4.3. Термоэлектронный вакуумметр (с накаливаемым катодом).....	19
5. Вакуумные материалы и компоненты.....	20
6. Вакуумная гигиена	21
Экспериментальный стенд.....	22
Меры предосторожности	23
Задание	26
I. Подготовка к работе и подключение системы управления	26
II. Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом	31
III. Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума	32
IV.* Откачка объема через диафрагмы.....	34
V. Выключение установки.....	36
VI. Обработка экспериментальных данных	36
Приложение А. Некоторые типы вакуумных компонентов.....	38
1А. Тип ISO-KF.....	38
Приложение Б. Технические характеристики экспериментального стенда	39
1Б. Пластинчато-роторный насос E2M1.5 (ПРН)	39
2Б. Турбомолекулярный насос EXT70H (ТМН)	40
3Б. Вакуумметр APG100-ХМ типа Пирани (В1)	40
4Б. Инверсно-магнетронный вакуумметр AIM-X (В2).....	41
5Б. Термоэлектронный вакуумметр AIGX-S (В3) (с накаливаемым катодом).....	42
6Б. Кран-натекатель LV10K (КН)	42
Приложение В. Работа с файлом данных	44
Приложение Г. Соотношения между часто используемыми единицами	47
Список литературы.....	48

2.3.1А Современные средства получения и измерения вакуума

Версия 0.2.5 от 05 февраля 2019 года¹

Изучаются принципы получения и измерения вакуума в экспериментальном стенде на основе компактного высоковакуумного откачного поста Edwards серии EXPT, вакууметров Edwards и вакуумных компонентов типа 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 λ сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда d , в котором газ находится. Для воздуха при *нормальных условиях*² $\lambda \sim 10^{-5}$ 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*.

¹ 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.

² 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 значительно отличаться от приведённых значений, что необходимо учитывать при использовании справочных данных или в расчётах.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

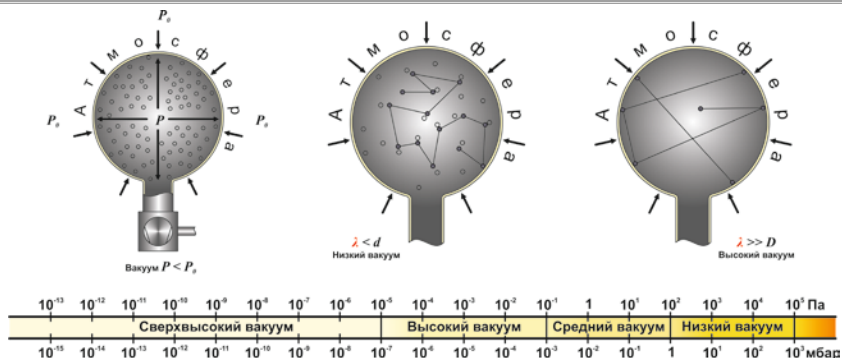


Рис. 1. Понятие о вакууме

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]:

$$1 \text{ тех. атм.} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98,0665 \text{ кПа} = 0,980665 \text{ бар,}$$

$$1 \text{ физ. атм.} = 760 \text{ Торр} = 101,325 \text{ кПа} = 1,01325 \text{ бар,}$$

$$1 \text{ бар} = 10^6 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ МПа.}$$

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.

2.3.1Б 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.

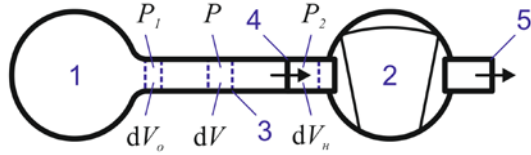
2. Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой

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

Предельное остаточное давление (предельный вакуум) $P_{np} [L^{-1}MT^{-2}]^3$ — 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.

³ 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 объём, 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 $S [L^3T^{-1}]$ — объём 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 $Q [L^2MT^{-3}]$ — *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:

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

2.3.1Б 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; Δt — время между измерениями давления. При наличии течей, нормальной работе средств откачки и отсутствии в системе источников паров или газов, зависимость потока газа через течь от времени $Q_n(t)$ носит, как правило, линейный характер.

Для заданного давления P_1 в замкнутом исследуемом 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 изменениям⁴.

- 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]:

$$v = v_2 - v_1 = \frac{1}{4} n_2 \vartheta - \frac{1}{4} n_1 \vartheta = \frac{1}{4} \frac{P_2}{kT} \vartheta - \frac{1}{4} \frac{P_1}{kT} \vartheta = \frac{1}{4} \frac{\vartheta}{kT} (P_2 - P_1), \quad (2.8)$$

с другой стороны:

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

где v — число молекул пролетающих через единицу площади отверстия за единицу времени, A — площадь отверстия, n — концентрация молекул, ϑ — 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.

⁴ 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 $P = (P_1 + P_2)/2$), η — 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_{Σ} — 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 $S_H \gg U_\Sigma$ не целесообразно, поскольку в этом случае скорость откачки будет определяться, в основном, проводимостью вакуумпровода:

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

Выполнение условия $U_\Sigma \gg S_H$ 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:

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

Для вычисления длительности откачки по формуле (2.16) необходимо иметь данные о значении S_H 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:

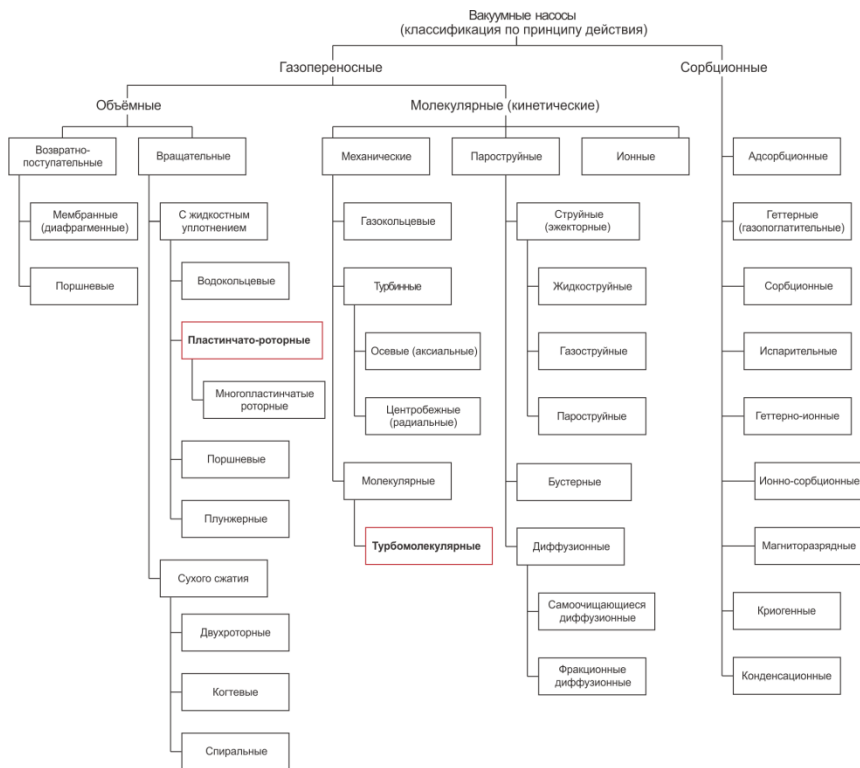
$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o} t\right). \quad (2.19)$$

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).

2.3.1Б 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. Пластинчато-роторный насос

В цилиндрическом корпусе (1) пластинчато-роторного насоса (рис. 4) со смещением эксцентрично размещен ротор (2), касающийся корпуса с одной стороны. Ротор снабжен пластинами (3), которые прижимаются к стенкам и скользят по внутренней поверхности. Газ, попадающий на вход (4) проталкивается пластинами и выталкивается из насоса через выпускной клапан (5). Подробнее ознакомиться с принципом работы пластинчато-роторного насоса можно, например, в описании работы № 2.3.1 [3]. Для уплотнения зазоров, а также для смазывания и охлаждения подвижных частей в работе насоса используется вакуумное

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

масло⁵. Для уменьшения загрязнения откачиваемого объема вакуумным маслом используются двухступенчатые насосы и специальные фильтры в вакуумных магистралях.

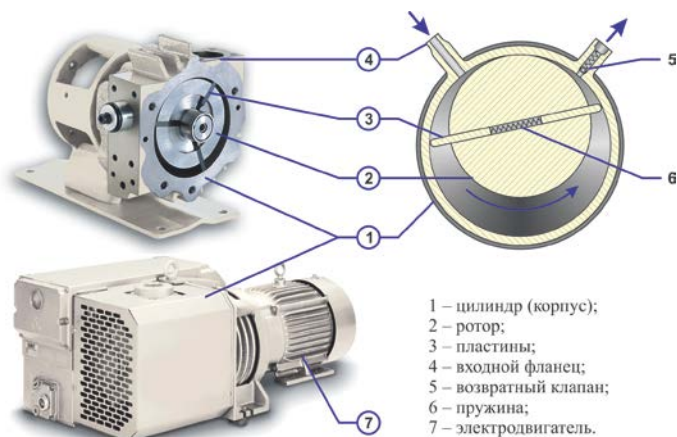


Рис. 4. Конструкция одноступенчатого пластинчато-роторного насоса

– Преимущества: неприхотлив в работе (может откачивать загрязненную среду, без ущерба для конструктивных элементов); используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах откачки с низкими требованиями по чистоте откачиваемого объема; используется до 2-х последовательных ступеней.

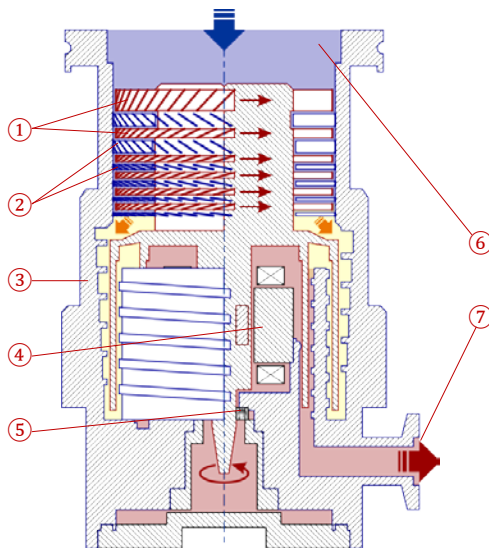
– Недостатки: присутствие в рабочей камере масла, контактирующего с откачиваемой средой (возможно попадание паров в откачиваемый объем) и необходимость периодической его замены; низкий предельный вакуум за счет обратного потока воздуха через выпускные клапаны; малоэффективен для откачки влажных сред (необходимо использовать газобалластное устройство⁶).

– Тип вакуума: средний.

⁵ Масло с низким давлением пара при комнатной температуре, обладает низкой упругостью пара при рабочей температуре, термической стойкостью, а также химической инертностью по отношению к кислороду воздуха и откачиваемым газам.

⁶ Устройство для дозированного добавления воздуха в камеру сжатия для предотвращения конденсации воды и смешивания с маслом. Водно-масляная эмульсия очень быстро ухудшает смазывающие свойства масла, что приводит к износу трущихся деталей и поломке насоса.

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

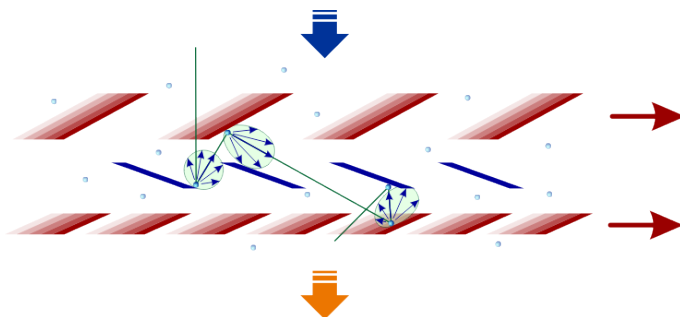


Рис. 6. Принцип работы турбомолекулярного насоса

Откачка в турбомолекулярном насосе (рис. 5) осуществляется за счет соударения частиц газа с быстродвижущимися турбинными лопатками дисков ротора (1) специальной геометрии, которые придают им до-

полнительный 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.

- 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

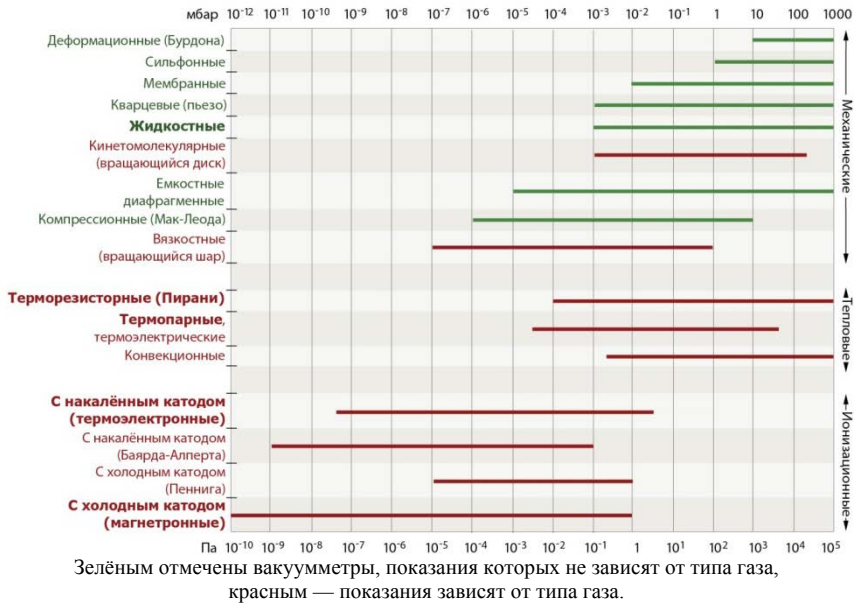
Тип вакуумметров выбирается в зависимости от глубины вакуума, требуемого диапазона и рабочих условий (агрессивные среды, вибрации, электромагнитные поля и т. п.). Основные типы вакуумметров, диапазоны давлений, при которых они используются, и принцип действия указаны на рис. 7. Остановимся подробнее на датчиках, использующихся в данной лабораторной работе (2.3.1А).

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 про-

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

пускаемым по ней током. Джоулево тепло, выделяемое нитью, отводится в основном через газовую среду со скоростью, зависящей от коэффициента теплопроводности. В зависимости от способа измерения 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).



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

Рис. 7. Основные типы вакуумметров

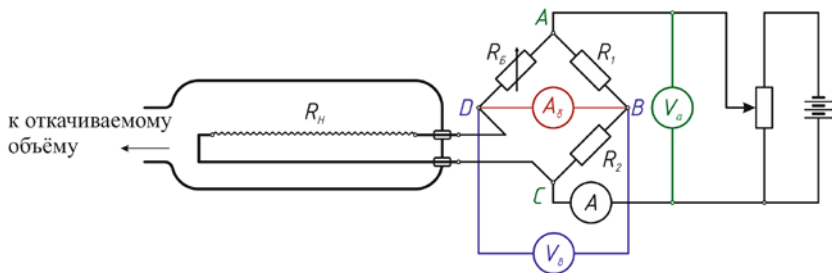
В первом случае (а) напряжение на клеммах A, C моста автоматически подбирается так, чтобы мост всё время оставался сбалансированным при изменении давления и, тем самым, является мерой давления в системе:

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

где V_0 — напряжение на клеммах при начальной балансировке.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

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



R_H — сопротивление нити накала; R_B — сопротивление балансировки; V_a — вольтметр для измерения напряжения на клеммах A, C в режиме (а); A_6 — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (б); V_b — вольтметр для измерения напряжения на клеммах B, D в режиме (в)

Рис. 8. Принципиальная схема терморезисторного вакуумметра (Пирани)

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 датчика 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 (~2–6 кВ), а также помещен в постоянное магнитное поле (~0,2–2 кГс).

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Случайным образом возникшие вблизи катода электроны (например, вследствие автоэлектронной эмиссии⁷⁾ 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-магнетроне датчике анодом служит центральный металлический стержень, а катодом — осесимметричная обечайка, магнитное поле создается внешним постоянным кольцевым магнитом (рис. 9).

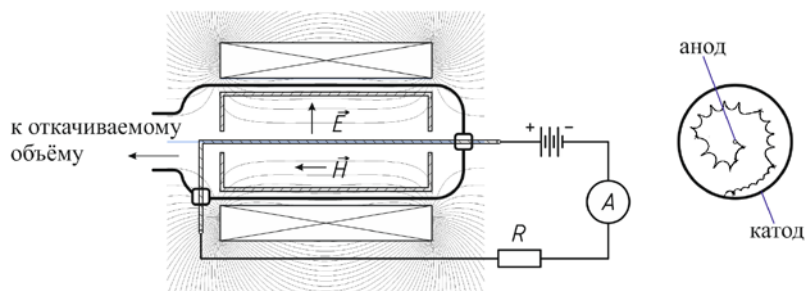


Рис. 9. Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в них

– Преимущества: Могут включаться в широком диапазоне давлений, т.к. не содержат нагретых 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

⁷ Автоэлектронная эмиссия — испускание электронов проводящими твёрдыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля.

к распылению материала катода потоком ионов, что, в свою очередь, может стать причиной короткого замыкания и сбоев датчика. Нежелательно 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.

4.3. Термоэлектронный вакуумметр (с накаливаемым катодом)

Катодом термоэлектронного вакуумметра является накаливаемая нить (1) (рис. 10). Эмитируемые накаливаемым катодом электроны под действием ускоряющего электрического поля устремляются по направлению к аноду (2), создавая в его цепи (5) электронный ток. Анод, как правило, выполнен в виде спирали или сетки с большим шагом, поэтому значительная часть электронов проходит между витками анода и тормозится полем коллектора 3, имеющего по отношению к катоду отрицательный потенциал. Не дойдя до коллектора ионов, электроны останавливаются и начинают движение обратно к аноду-сетке. Снова значительная часть электронов проходит между витками анода и тормозится уже полем катода. Каждый электрон может сделать несколько таких колебаний, прежде чем попасть на сетку.

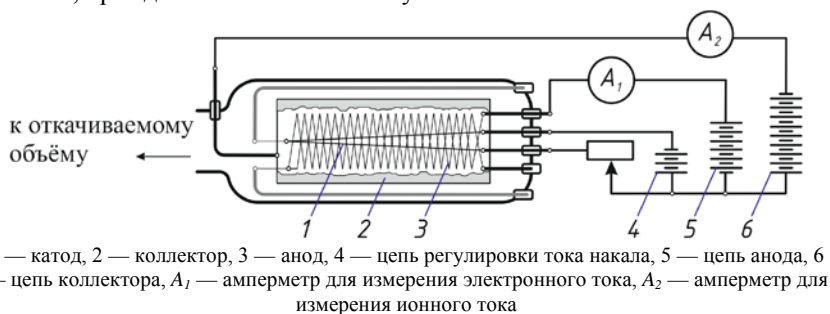


Рис. 10. Принципиальная схема термоэлектронного вакуумметра

Времени жизни электронов в откачиваемом объеме достаточно, чтобы ионизировать значительную часть находящегося в датчике газа. Ионы притягиваются полем коллектора, рекомбинируют на его поверхности, создавая в цепи коллектора 6 ионный ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и служит мерой давления.

- Преимущества: применимость для измерения давлений всех газов и паров.
- Недостатки: зависимость показаний от рода газов; необходимость обезгаживания для устранения искажения показаний, недопустимость работы выше заданного диапазона давлений и прорыва атмосферы при включенном катоде (накаленная спираль быстро окисляется и перегорает).
- Тип вакуума: высокий.

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, сильфоны, 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, паянные, 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 типа ISO-KF

с витонным⁸ 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 штурцных 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 на наличие загрязнений, царапин, порезов и обезжирить, протирая безворсовой тканью смоченной обезжиривающей жидкостью⁹.

— Вакуумные поверхности всех неиспользуемых в данный момент компонентов должны быть закрыты соответствующими пластиковыми

⁸ Viton® зарегистрированная торговая марка компании Du Pont — фторэластомер, из которого изготавливаются уплотнения для применения в агрессивных средах.

⁹ Водные растворы моющих средств, ацетон, этанол и др. в зависимости от загрязнения и типа поверхности.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

заглушками, а вакуумные уплотнения сложены в герметичные пакеты с замками для их защиты от загрязнений и механических повреждений.

Экспериментальный стенд

- БУ — блок управления
- ПРН — пластинчато-роторный насос
- ТМН — турбомолекулярный насос
- К — вакуумная камера
- ШЗ — шиберный затвор
- МК1–4 — мембранные краны
- В1 — терморезистонный вакуумметр
- В2 — магнетронный вакуумметр
- В3 — термоэлектронный вакуумметр
- КН — кран-натекатель
- Л — маслоуловитель
- З — заглушка
- Д — диафрагма
- С — сифоны
- Т — тройники
- ПК — компьютер

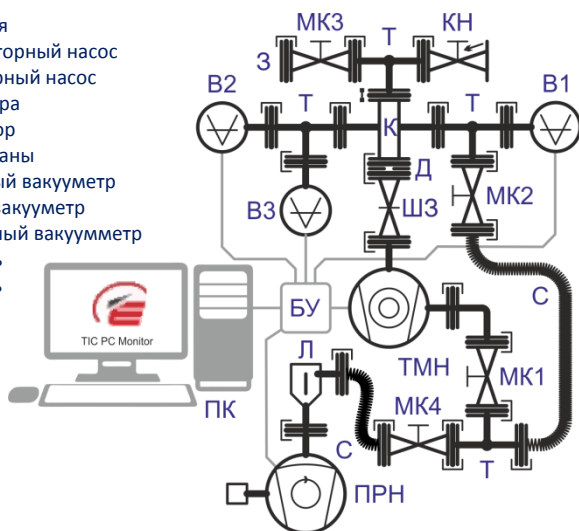


Рис. 11. Схема экспериментального стенда

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного высоковакуумного откачного поста Edwards серии EXPT с пластинчато-роторным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Edwards и вакуумных компонентов (см. прил. А). Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-232 с помощью специального программного обеспечения TIC PC Monitor¹⁰. Схема экспериментального стенда и его внешний вид представлены на рис. 11–13.

Вакуумный пост Edwards EXPT (TY1211601) выполнен на базе пластинчато-роторного форвакуумного насоса E2M1.5 (ПРН) и турбомолекулярного насоса EXT70N (ТМН). Откачка вакуумной камеры (К) мо-

¹⁰ В программе имеется краткий раздел помощи с описанием всех необходимых элементов управления. Смотрите меню [Help]→[Contents] на верхней панели окна программы.

жет происходить как двумя насосами (ТМН и ДН) через шиберный затвор (ШЗ) и мембранные краны 1 и 4 (МК1, МК4), так и только форвакуумным насосом (ПРН) по схеме «байпас» (англ. bypass — обходной путь), выполненной на основе вакуумных компонентов: сильфонов (С), мембранных кранов 2 и 4 (МК2, МК4), тройников (Т), переходников.

Для контроля и измерения давления в вакуумной камере используются цифровые вакууметры APG100-ХМ (В1) типа Пирани (терморезисторный), АИМ-Х (В2) инверсно-магнетронный и АIGX-S (В3) термоэлектронный (с накаливаемым катодом).

Контролируемый напуск воздушной атмосферы в камеру осуществляется через кран-накататель LV10K (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 и при попытке его открыть, отпирающий механизм может выйти из строя.

— 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.

— 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.

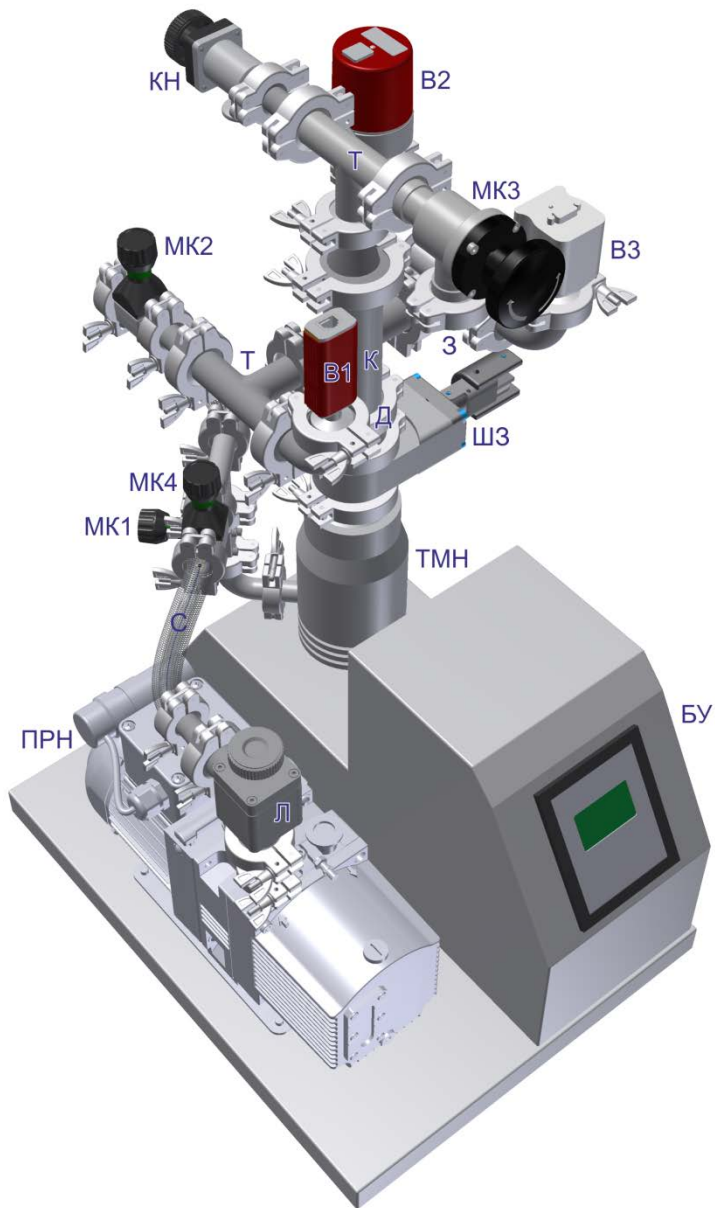


Рис. 12. Внешний вид экспериментального стенда (вид спереди-сбоку)

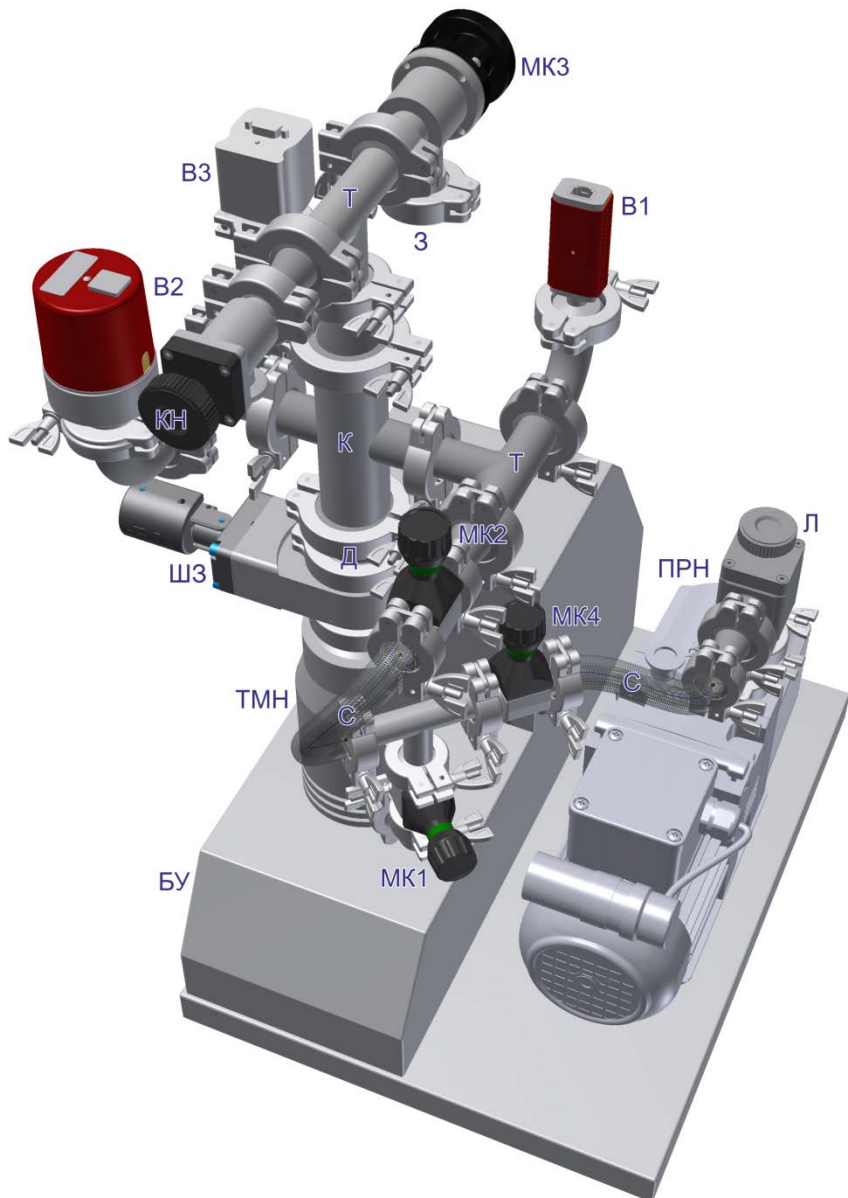


Рис. 13. Внешний вид экспериментального стенда (вид сзади-сбоку)

Задание

I. Подготовка к работе и подключение системы управления

I.1. Сопоставьте элементы схемы (рис. 11) с соответствующими частями самой установки.

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

Последовательно откройте краны МК1, МК2, МК3, МК4 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 поверните рукоятку (1) на 180°, как показано на рис. 14. При этом левой рукой придерживайте корпус (2), чтобы не сдвинуть установку. В результате такого движения заслонка (3) сдвинется вправо и откроет вход ТМН насоса.

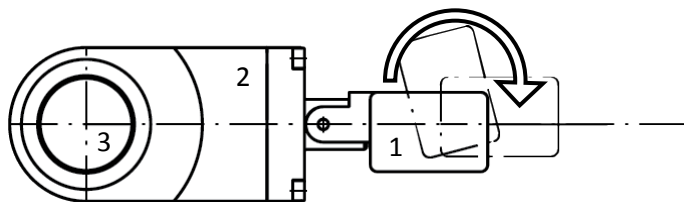


Рис. 14. Схема открытия шиберного затвора

I.2. *Впустите атмосферный воздух в установку через кран-напекатель КН.* ↓

Если на КН установлена пластиковая защитная заглушка, снимите её. Ручку тонкой регулировки КН со шкалой плавно вращайте до упора против часовой стрелки (около 14-ти полных оборотов).

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

Закройте КН плавно вращая ручку тонкой регулировки со шкалой до упора по часовой стрелке (около 14-ти полных оборотов). Закройте кран МК3, шибер ШЗ, а краны МК1, МК2 и МК4 оставьте открытыми. Определите по схеме, по каким магистралям и какие объёмы будут откачиваться форвакуумным насосом при данном состоянии кранов.

I.4. *Включите питание экспериментального стенда и компьютер ПК.* ↓

Белую кнопку на задней панели установки переведите в положение «I» (зеленый ЖК экран на БУ должен засветиться). Потом включите компьютер ПК и дождитесь загрузки операционной системы.

I.5. *Запустите программу управления TIC PC Monitor.* ↓

В результате откроется главное окно программы [Edwards – TIC PC Monitor]¹¹ и окно установления связи с блоком управления БУ насосами и вакуумметрами [Connect To System] (рис. 15).

Это же окно можно вызвать верхней крайней левой кнопкой [Connect To System] или через верхнее меню [Connect] → [Connect To System].

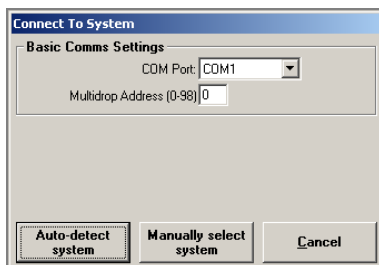


Рис. 15. Окно установления связи с блоком управления БУ насосами и вакуумметрами

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

В окне для установления связи [Connect To System] (рис. 15) нажмите кнопку [Auto-detect system]. После успешного соединения с БУ, программа предоставит доступ к информации о подключенном оборудовании.

Если автоматического подключения не происходит, остановите процесс подключения и смените номер COM-порта на следующий по списку [COM Port:] → COM#¹².

На вкладках [Pump speed and power] и [Pump status & control] находятся информационные данные и органы управления вакуумными насосами (рис. 16).

¹¹ Здесь и далее названия кнопок, окон, всплывающих меню и др. элементов программы указаны в квадратных скобках.

¹² # обозначена соответствующая цифра COM-порта для связи устройства с ПК.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

На вкладке [Gauges] находятся информационные данные и органы управления вакуумметрами (рис. 17).

Ознакомьтесь со справкой программного обеспечения, вызываемой кнопкой [Help] → [Contents], и пользуйтесь ей по мере необходимости. Вышеупомянутые действия описаны в п. 2.1 справки (разд. сп. 2.1 <Загрузка>¹³).

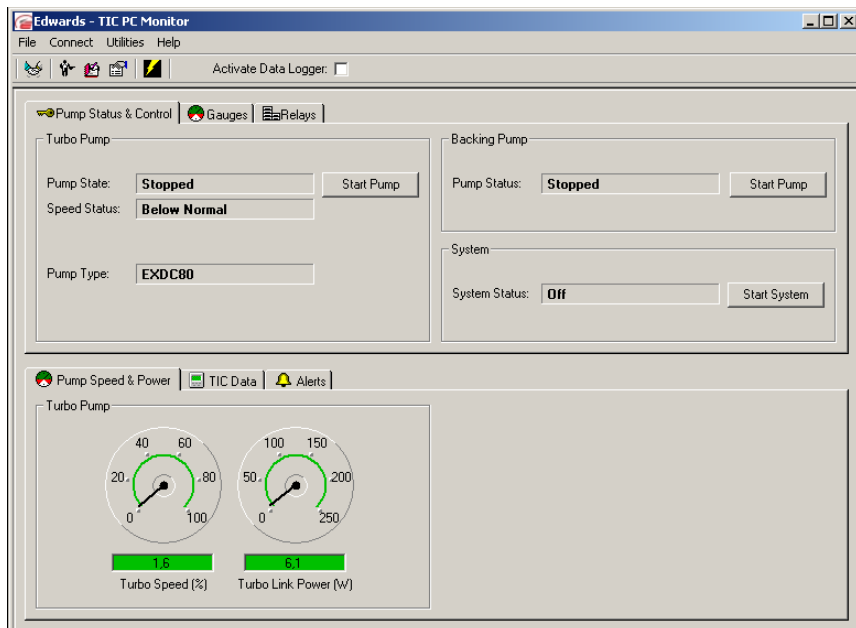


Рис. 16. Главное окно программы с открытыми вкладками данных о насосах

I.7. Выберите данные для записи в файл. ↓

Вызовите окно записи данных через верхнее меню [Utilities] → [Data Logging Manager].

В открывшемся окне установите «галочки» в чекбоксы (☑) напротив позиций:

- [TIC Turbo Speed] — скорость вращения турбины ТМ насоса;
- [TIC Turbo Power] — потребляемая турбиной ТМ насоса мощность;

¹³ Здесь и далее в треугольных скобках будут указаны соответствующие разделы справки, с которыми рекомендуется ознакомиться перед выполнением тех или иных действий (разд. спр. <Introduction>).

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

- [TIC Gauge 1] — показания вакуумметра В1;
- [TIC Gauge 2] — показания вакуумметра В2;
- [TIC Gauge 3] — показания вакуумметра В3.

Установите интервал опроса данных в колонке [Period] — 2 секунды (рис. 18).

Подтвердите выбор данных кнопкой [ОК] и окно закроется.

Данные показаний вакуумметров записываются в паскалях.

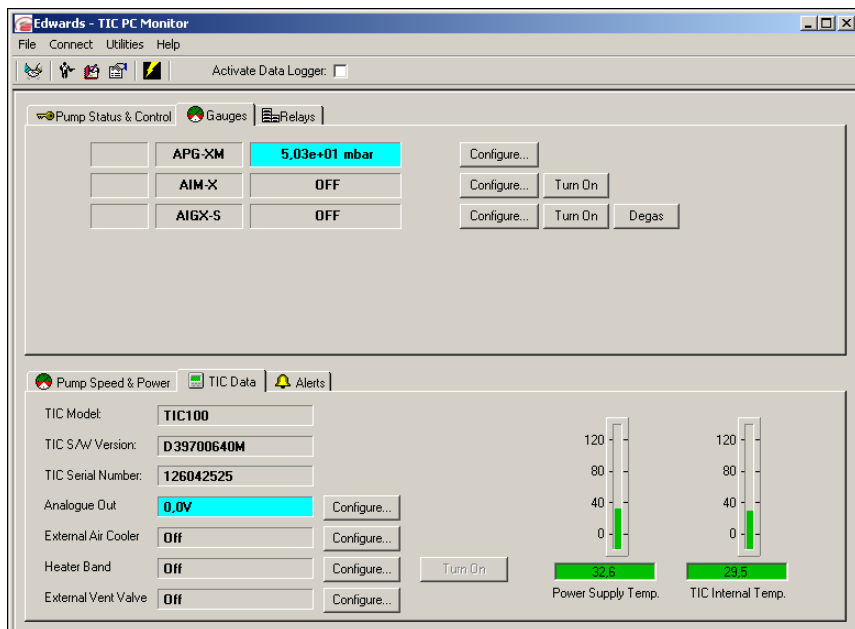


Рис. 17. Главное окно программы с открытыми вкладками данных о вакуумметрах и общих данных БУ

1.8. Включите запись выбранных данных в файл¹⁴. ↓

Активируйте запись данных, установив «галочку» в чекбокс [Activate Data Logger:]верху основного окна программы (рис. 17).

В результате указанных действий выбранные данные будут записываться в файл¹⁵ на протяжении выполнения всей работы.

¹⁴ Альтернативный, но менее удобный вариант — производить съемку показаний датчиков используя напр. смартфон. Также периодически можно делать скриншоты для выполнения оценок.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

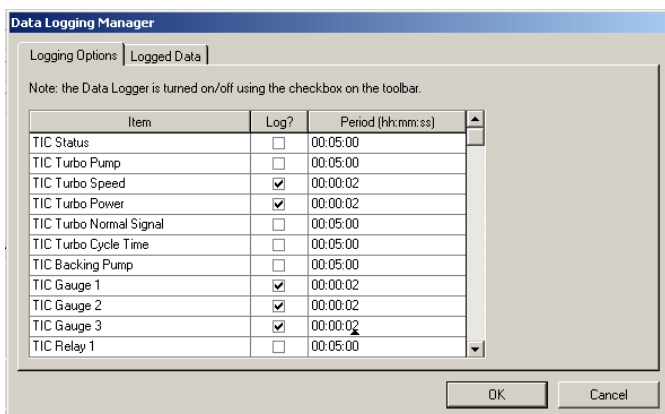


Рис. 18. Окно записи данных с необходимыми установками для записи

Табл. 1. Таблица записи ключевых показаний и действий

Время	Показания В1	Показания В2	Показания В3	Мощность ТМН	Пункты задания и комментарии
t , чч:мм:сс	P_1 , Па	P_2 , Па	P_3 , Па	W , Вт	
...

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

Так как запись данных происходит в течение всей работы, то в рабочей тетради можно фиксировать только ключевые показания, периоды времени по часам ПК 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.

¹⁵ Данные записываются в файл формата ГГГГММДД.csv, где ГГГГММДД дата записи файла.

II. Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом


II.1. *Откачайте установку форвакуумным насосом ПРН.* ↓

Включите ПРН кнопкой [Start Pump] окна [Backing Pump] вкладки [Pump status & control]. 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 $2,5 \times 10^{-2}$ мбар (см. прил. 1Б) более чем на порядок, остановите откачку (кнопка [Start Pump] окна [Backing Pump] вкладки [Pump status & control]) и ещё раз проверьте состояние кранов.

Зафиксируйте время откачки и предельное давление в системе.

II.2. *Присоедините к установке сиффон с воздухом при атмосферном давлении.* ↓

 **Внимание:** во время монтажа ко всем вакуумным поверхностям соединительных элементов, включая уплотнительные кольца, можно касаться только используя латексные перчатки¹⁶!

Отсоедините заглушку З от крана МКЗ (кран МКЗ **закрыт!**). Протрите вакуумные поверхности сиффона С, заглушки З, а также уплотнительные кольца безворсовой тканью смоченной обезжиривающей жидкостью. Установите заглушку З на один конец гибкого сиффона¹⁷, а другой конец присоедините к крану МКЗ (см. прил. 1А).

При этом в сиффоне между заглушкой и краном будет «заперто» 252 мл воздуха при атмосферном давлении.

II.3. *Выровняйте давления в сиффоне С и вакуумной камере К экспериментального стенда.* ↓

Перекройте откачку вакуумной камеры К, закрыв кран МК2. Далее **предельно плавно**, не допуская резкого изменения показаний вакуумметра В1, откройте кран МКЗ для распространения «запертого» воздуха по объёму вакуумной камеры К (насос ПРН должен оставаться **включенным!**). Зафиксируйте установившиеся показания вакуумметра В1¹⁸. Сделайте выводы о точности его показаний в данном диапазоне измерений.

¹⁶ См. правила вакуумной гигиены на стр. 21.

¹⁷ Все необходимые вакуумные элементы можно получить у лаборанта.

¹⁸ Время установления давления может составлять до 1–2 минут.

П.4. *Выровняйте давление вакуумной камеры К и форвакуумной магистрали установки.* ↓

Закройте краны МК1 и МК4. Далее плавно откройте кран МК2. Зафиксируйте установившиеся показания вакуумметра В1. Насос ПРН при этом остается **включенным** и откачивает только масляную ловушку и сильфон С до крана МК4.

П.5. *Выровняйте давление во всей установке, включая объем турбомолекулярного насоса ТМН.* ↓

Плавно откройте кран МК1, запустив воздух в объём насоса ТМН. Зафиксируйте установившиеся показания вакуумметра В1. (насос ПРН должен оставаться **включенным!**).

П.6. *Напустите в установку воздух до атмосферного давления.* ↓

Выключите насос ПРН и откройте кран МК4.

Ручку тонкой регулировки КН со шкалой плавно вращайте до упора против часовой стрелки (около 14-ти полных оборотов).

П.7. *Подготовьте установку к повторному выполнению части II задания.* ↓

Закройте КН плавно вращая ручку тонкой регулировки со шкалой до упора по часовой стрелке (около 14-ти полных оборотов). Закройте кран МК3.

П.9. Измерения по пп. П.1–П.7 повторите ещё 1–2 раза, каждый раз фиксируя время начала работы форвакуумного насоса ПРН.

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. VI.1. Определите скорость откачки системы насосом ПРН по улучшению вакуума во время откачки согласно пп. VI.2.¹⁹ 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,

¹⁹ Обработку данных рекомендуется выполнять после завершения работы на установке.

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.

III.2. *Откачайте установку форвакуумным насосом ПРН (см. пп. II.1).*

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.

Включите ТМН кнопкой [Start Pump] окна [Turbo Pump] вкладки [Pump status & control]. Отметьте время начала работы насоса ТМН.

Откачайте установку до предельного давления, которое можно определить по динамике показаний вакуумметров В2 и В3. Если по истечении ~5 минут скорость вращения турбины не выйдет на предельную 99,9 % (см. прил. 2Б), остановите откачку (кнопка [Start Pump] окна [Turbo Pump] вкладки [Pump status & control]) и ещё раз проверьте состояние кранов.

Проанализируйте работу вакуумметров. Убедитесь, что терморезисторный вакуумметр В1 достиг своего предела измерений, в то время как инверсно-магнетронный вакуумметр В2 включился и отображает корректное давление в системе. Зафиксируйте предельное давление в высоковакуумной части установки и время откачки установки насосом ТМН.

III.4. *Проведите обезгаживание накаливаемой спирали включившегося термоэлектронного вакуумметра В3 для устранения искажения его показаний.* ↓

Нажмите кнопку [Degas] вкладки [Gauges] датчика AIGX-S и дождитесь окончания процесса дегазации (исчезнет соответствующая надпись рядом с показаниями датчика). Сравните показания вакуумметров В2 и В3.

III.5. *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 вакуумметров В2 и В3 от времени. Когда давление превысит 10^{-3} мбар, снова откройте шибер.

Получите зависимость показаний вакуумметров В2 и В3 от времени после открытия шибера. Снова зафиксируйте предельное давление. Время снятия показаний по пп. III.5 не должно превышать 10 мин.

III.6. Измерения по пп. III.5 повторите ещё 1–2 раза, каждый раз фиксируя время закрытия и открытия шиберов 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. VI.3. Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки шибером согласно пп. VI.4. Для получения требуемых параметров используйте файл с записанными данными.

IV.* Откачка объема через диафрагмы²⁰

IV.1. *Остановите откачку установки.* ↓

Нажмите последовательно кнопки [Start Pump] окон [Turbo Pump] и [Backing Pump] вкладки [Pump status & control] для остановки насосов ТМН и ПРН. Зафиксируйте время выключения откачки. Когда ротор ТМН полностью остановится (показания скорости вращения ротора — 1,6 %), зафиксируйте время его остановки. К следующему подпункту задания можно переходить не дожидаясь полной остановки ротора.

IV.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 **5 мм** для установки вместо центрирующего и уплотнительного колец ISO-KF DN40 (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 шиберов ШЗ, также предварительно протерев его поверхность обезжиривающей жидкостью.

После остановки ротора выровняйте давления по обе стороны шиберов ШЗ открыв кран МК2. Откройте шибер ШЗ. Напустите воздух в установку через натекабель КН (см. пп. I.2), потом вновь закройте его (см. пп. I.3).

²⁰ Данный пункт настоятельно рекомендуется выполнять **только с ассистентом**.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Отвинтите гайку-барашек хомута между камерой К и шибером ШЗ (соответствующий хомут должен быть помечен цветной полосой). Снимите хомут.

Аккуратно приподнимите камеру К и извлеките из под нее центрирующее и уплотнительное кольцо ISO-KF DN40.

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

Вместо извлеченных центрирующего и уплотнительного колец ISO-KF DN40 установите приготовленную заранее диафрагму Д с уплотнением.

Установите камеру К на диафрагму Д и закрепите её тем же хомутом.

После установки диафрагмы Д и затягивания гайки-барашка хомута можно переходить к следующему пункту.

IV.3. *Подготовьте установку для откачки насосом ПРН 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.

IV.4. Откачайте установку форвакуумным насосом ПРН (см. пп. П.1, но с вышеуказанным состоянием кранов!).

Зафиксируйте время включения насоса, время откачки, предельное давление в системе. Во время откачки можно дополнительно затянуть винт-барашек помеченного хомута для уменьшения возможных течей.

IV.5. Откачайте установку турбомолекулярным насосом ТМН (см. пп. Ш.3, краны уже находятся в правильном состоянии!).

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

IV.6. Проведите измерения аналогично пп. Ш.5–Ш.6.

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

IV.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.

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Вновь установите центрирующее и уплотняющее кольца ISO-KF DN40 вместо диафрагмы и откачайте установку до предельного вакуума (см. пп. II.1, III.3 но без диафрагмы). После этого можно преступать к процедуре завершения работы на экспериментальном стенде.

Расчетное время выполнения части V задания не более 1 часа.

Определите скорость откачки системы насосом ПРН по улучшению вакуума во время откачки согласно п. VI.2. Определите скорость откачки системы насосом ТМН по улучшению вакуума во время откачки согласно п. VI.3. Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки шиббером согласно п. VI.4.

V. Выключение установки

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

V.2. Закройте последовательно краны МК3, МК2, МК1, Ш3, МК4 и отключите откачку (последовательно кнопки [Start System] оконн [Turbo Pump] и [Backing Pump] вкладки [Pump status & control]).

Установка в этом случае останется в откачанном состоянии.

V.3. Остановите запись данных сняв «галочку» чекбокса [Activate Data Logger:] вверху основного окна программы (рис. 17) и закройте программу TIC PC Monitor.

V.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 кафедры²¹.

VI. Обработка экспериментальных данных

VI.1. *Загрузите данные из файла.* ↓

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

VI.2. Зная объём «запертого» в сильфоне воздуха (пп. II.3) определите, пользуясь законом Бойля-Мариотта, полный объём установки, высокова-

²¹ Кафедра общей физики / II семестр / лаборатория — https://mipt.ru/education/chair/physics/S_II/lab/

куумной части (камера К), форвакуумной магистрали и самого насоса ТМН. Определите эти части на схеме, оцените погрешности.

VI.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.1, III.2), через диафрагмы 5 мм и 1 мм (пп. IV.4), через фланец насоса ТМН (пп. IV.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 τ (2.17) в диапазоне давлений 10^0 – 10^2 мбар. Зная объём камеры К установки V_0 (пп. VI.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 суммарную пропускную способность соответствующих доз U (включая диафрагмы) (2.5).

VI.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. IV.5–IV.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 τ (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).

VI.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.5, IV.5). Рассчитайте натекание Q_n (2.6) и проверьте, выполняется ли условие (2.7) для заданных выше диапазонов давлений (пп. VI.3, VI.4).

VI.6. 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 монтажа²².

1А. Тип ISO-KF

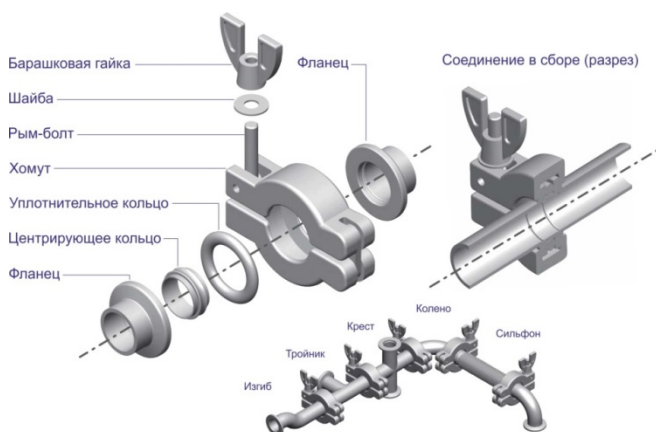


Рис. 19. Вакуумные компоненты типа ISO-KF

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 °С
Предельный вакуум	10 ⁻⁸ Торр
Стандарт изготовления	DIN 28403 / ISO 2861

* как правило, не применяются.

²² 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/>

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

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

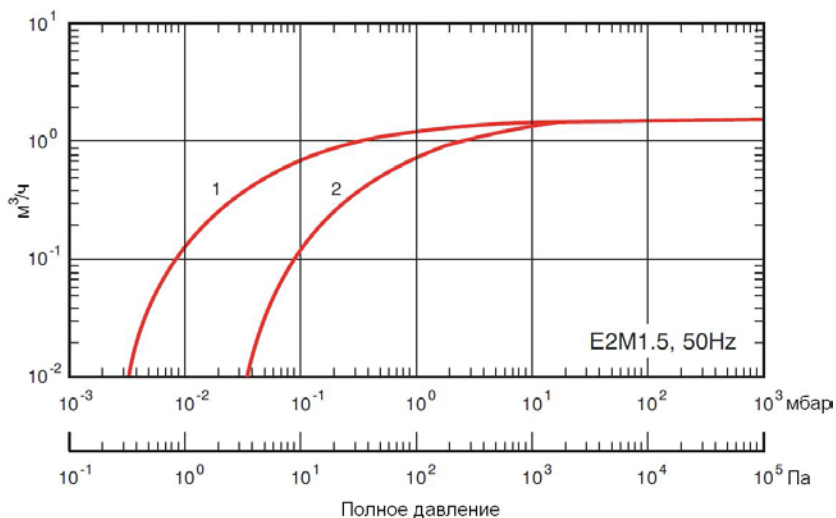
Приложение Б. Технические характеристики экспериментального стенда

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

1Б. Пластинчато-роторный насос E2M1.5 (ПРН)²³

Табл. 3. Технические характеристики

Внешнее давление, макс.	150 кПа 1125 Торр 1500 мбар
Фланец входной	DN 10 ISO-KF
Фланец выходной	Адаптер для присоединения гибкого шланга 3/8" BSP / 11 мм
Скорость откачки	1,8 м ³ /ч
Скорость вращения ротора	2 800 об/мин
Предельное давление с газобалластом	1,5×10 ⁻¹ Па 1,1×10 ⁻³ Торр 1,5×10 ⁻³ мбар
Предельное давление без газобалласта	2,5×10 ⁻¹ Па 1,9×10 ⁻³ Торр 2,5×10 ⁻² мбар



²³ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual E2M0.7, E2M1 and E2M1.5 Rotary Vacuum Pumps (A371-32-880 Issue E Original)

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

1 — без газобалласта, 2 — с газобалластом

Рис. 20. Зависимость быстроты действия на входе в насос от входного давления
2Б. Турбомолекулярный насос EXT70H (ТМН)²⁴

Табл. 4. Технические характеристики

Минимальная скорость откачки форвакуумного насоса на выходе	0,6 м ³ /ч
Фланец входной	DN 40 ISO-KF
Фланец выходной	DN 16 ISO-KF
Скорость откачки	46 л/с по H ₂ , 53 л/с по He, 52 л/с по N ₂
Скорость вращения ротора	90000 об/мин
Предельное давление	< 5 · 10 ⁻⁷ Па < 3,75 · 10 ⁻⁹ Торр < 5 · 10 ⁻⁹ мбар

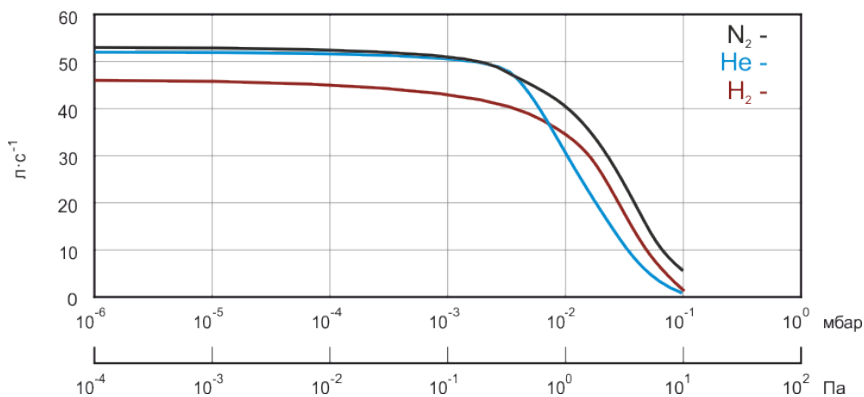


Рис. 21. Зависимость быстроты действия на входе в насос от входного давления

3Б. Вакууметр APG100-ХМ типа Пирани (В1)²⁵

Табл. 5. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 16 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	10 ⁵ Па 750 Торр 1000 мбар
Минимальное измеряемое давление	10 ⁻¹ Па 7,5 · 10 ⁻⁴ Торр 1 · 10 ⁻³ мбар
Точность измерений	в диапазоне 1 · 10 ⁻³ – 100 мбар : ± 15%
Метод измерений	датчик Пирани, терморезисторный вакуумметр

²⁴ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual Low Voltage EXT Compound Molecular Pumps: EXT70H 24V, EXT70Hi 24V, EXT255H 24V and EXT255Hi 24 V (B722-20-880 Issue D Original)

²⁵ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual APG100 Active Pirani Gauge (D026-01-880 Issue B)

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Интерфейс управления	RS-485 / RS-232
Внутренний объем	5 см ³

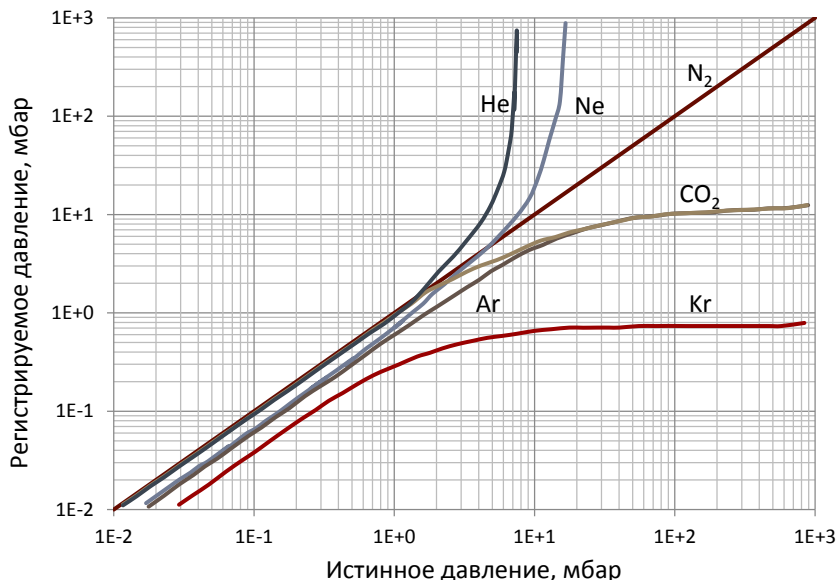


Рис. 22. Зависимость показаний от типа газа

Корректирующие коэффициенты для датчика Пирани или относительная чувствительность в молекулярном режиме (> 1 мбар): 1,0 (N_2), 1,0 (воздух), 1,5 (Ne), 1,1 (He), 1,7 (Ar), 1,0 (CO_2), Kr (2,6).

4Б. Инверсно-магнетронный вакуумметр AIM-X (B2)²⁶

Табл. 6. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 25 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	1 Па $7,5 \cdot 10^{-3}$ Торр $1 \cdot 10^{-2}$ мбар
Минимальное измеряемое давление	$1 \cdot 10^{-7}$ Па $7,5 \cdot 10^{-10}$ Торр $1 \cdot 10^{-9}$ мбар
Точность измерений	$\pm 30\%$
Метод измерений	ионизационный датчик с холодным катодом
Интерфейс управления	аналоговый, коннектор RJ45 8-штырьковый
Внутренний объем	26 см ³

²⁶ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual AIM-X Active Inverted Magnetron Gauge (D146-41-885 Issue G)

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Показания датчика откалиброваны по азоту (сухому воздуху).

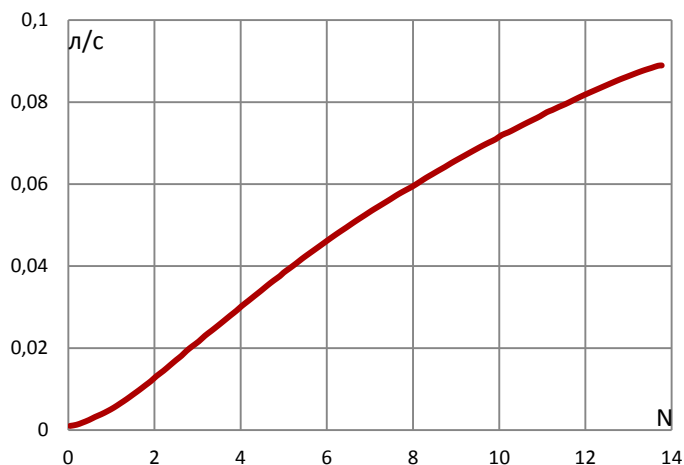
5Б. Термоэлектронный вакуумметр AIGX-S (B3) (с накали́мым катодом)²⁷

Табл. 7. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 25 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	$6,6 \cdot 10^{-4}$ Па $5 \cdot 10^{-2}$ Торр $6,6 \cdot 10^{-2}$ мбар
Минимальное измеряемое давление	$6,6 \cdot 10^{-12}$ Па $5 \cdot 10^{-10}$ Торр $6,6 \cdot 10^{-10}$ мбар
Точность измерений	$\pm 15\%$
Метод измерений	ионизационный датчик с накалимым катодом
Интерфейс управления	аналоговый, коннектор RJ45 8-штырьковый
Внутренний объем	21 см ³

Корректирующие коэффициенты для ионизационного датчика с накалимым катодом или относительная чувствительность в молекулярном режиме: 1,0 (N₂), 1,0 (воздух), 3,3 (Ne), 5,7 (He), 0,75 (Ar), 0,7 (CO₂), 0,5 (Kr), 0,35 (Xe), 2,4 (H₂), 1,0 (O₂), 1,15 (CO).

6Б. Кран-натекатель LV10K (KH)²⁸



²⁷ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual AIGX-S Active Ion Gauge (D048-50-880 Issue D)

²⁸ Более подробные данные смотрите в руководстве по эксплуатации — Instruction Manual LV10K Fine Control Leak Valve (C371-02-885 Issue C)

2.3.1Б Современные средства получения и измерения вакуума

Рис. 23. Типичная кривая натекания: количество оборотов (N) от величины потока (л/с)
Табл. 8. Технические характеристики

Соединительный фланец	DN 10 ISO-KF
Максимальный поток	0,1 л/с
Уровень герметичности	$1 \cdot 10^{-7}$ мбар л/с
Максимальный перепад давлений	2000 мбар / 1500 Торр
Запертый «мёртвый» объём	0,032 см ³

Приложение В. Работа с файлом данных

Пример структуры данных в файле показан в табл. 9. Ниже представлен способ обработки файла с данными с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel²⁹ версии 2007 и выше. Рассмотрим последовательность действий для графического выведения записанных параметров:

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

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 файла. В появившемся окне выберите необходимый файл с расширением <.csv> 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.* ↓

На первом шаге окна [Мастер текстов (импорт) — шаг 1 из 3] укажите формат данных [с разделителями] и нажмите кнопку [Далее]. На втором шаге [Мастер текстов (импорт) — шаг 2 из 3] укажите, что символом-разделителем является [запятая] (остальные не выбирайте). При этом образец разбора данных должен поделиться на колонки однотипных данных. На третьем шаге [Мастер текстов (импорт) — шаг 3 из 3] определите формат данных столбца <Value>, как «текстовый» для корректного отображения 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 данные.* ↓

Удалите колонки с данными <Units>, <Alert ID>, <Priority>.

Удалите дату проведения эксперимента. Для этого вызовите окно [Найти и заменить] сочетанием клавиш [Ctrl+F] и перейдите на вкладку [Заменить]. В поле [Найти:] введите указанную в файле дату в формате «DD.MM.YYYY» (без кавычек и обязательно с пробелом в конце), а поле [Заменить на:] оставьте незаполненным, и нажмите кнопку [Заменить всё]. В результате дата в каждой ячейке будет удалена, а останется только время в формате «hh:mm:ss».

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

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

Создайте рядом с колонкой <Time> колонку в формате времени «hh:mm:ss» (напр. <Start>) и заполните все ячейки одинаковым временем из 2-й строки (время начала измерений). После этого создайте ещё одну колонку (напр. <Synch.>), в которой выполните операцию вычитания данных колонки <Start> (с временем начала измерений) из колонки <Time> (с временем измерений). В результате отсчет времени будет начинаться с 00:00:00.

Создайте ещё одну колонку (напр. <Sec.>) и переведите полученное время в секунды. Для этого выполните в каждой ячейке колонки <Sec.> операцию: =МИНУТЫ(C2)*60+СЕКУНДЫ(C2)+ЧАС(C2)*3600, где C2 — текущий номер ячейки колонки <Start>.

Для вышеописанных действий достаточно заполнить первых две строчки соответствующих колонок, 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. *Удалите в колонке <Sec.> формулу, оставив только значения.* ↓

Скопируйте колонку <Sec.> и вставьте на то же место с помощью кнопки [Вставить] вкладки [Главная], выбрав параметр только [Значения]. После этого можно удалить колонки <Time>, <Start> и <Synch.>

В.6. *Отфильтруйте необходимые данные.* ↓

Выделите ячейки первой строчки с оставшимися названиями отображаемых параметров. Перейдите на вкладку [Данные] и нажмите кнопку [Фильтр]. Теперь можно отображать на странице только требуемые показания.

В.7. *Замените все точки на запятые.* ↓

Для корректной работы с числами необходимо заменить все точки в данных на запятые аналогично описанному в пп. В4 способом.

В.8. *Постройте необходимые зависимости.* ↓

Выберите требуемый параметр колонки <Object Name> (и <Status> режима измерений — 11, при необходимости).

Далее можно приступать 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 файла

	<i>столбец 1</i>	<i>столбец 2</i>	<i>столбец 3</i>	<i>столбец 4</i>	<i>столбец 5</i>	<i>столбец 6</i>	<i>столбец 7</i>
<i>строка 1</i>	Time	Object Name	Status	Value	Units	Alert ID	Priority
<i>строка 2</i>	30.05.2016 12:42	TIC Turbo Speed		97.4		0	0
<i>строка 3</i>	30.05.2016 12:42	TIC Turbo Power		66.7		0	0
<i>строка 4</i>	30.05.2016 12:42	TIC Gauge 1	11	1.0000e-02	59	0	0
<i>строка 5</i>	30.05.2016 12:42	TIC Gauge 2	11	2.1720e-02	59	0	0
<i>строка 6</i>	30.05.2016 12:42	TIC Gauge 3	11	1.4148e-02	59	0	0
...
<i>строка N</i>	30.05.2016 14:21	TIC Turbo Speed		1.6		0	0
<i>строка N+1</i>	30.05.2016 14:21	TIC Turbo Power		7.0		0	0
<i>строка N+2</i>	30.05.2016 14:21	TIC Gauge 1	11	1.1894e+01	59	0	0
<i>строка N+3</i>	30.05.2016 14:21	TIC Gauge 2	5	9.9000e+09	59	0	0
<i>строка N+4</i>	30.05.2016 14:21	TIC Gauge 3	5	9.9000e+09	59	0	0
...

- строка 1 — названия отображаемых параметров;
- строка 2 — данные по скорости вращения ротора ТМН в процентах (TIC Turbo Speed);
- строка 3 — данные по потребляемой турбиной ТМН мощности в ватах (TIC Turbo Power);
- строка 4 — данные по измерению давления вакуумметром APG100-ХМ в паскалях (TIC Gauge 1);
- строка 5 — данные по измерению давления вакуумметром AIM-X в паскалях (TIC Gauge 2);
- строка 6 — данные по измерению давления вакуумметром AIGX-S в паскалях (TIC Gauge 3);
- строки 7, 8, ..., N, N+1, N+2, ... — те же данные для других моментов времени;
- столбец 1 — дата и время соответствующих измерений;
- столбец 2 — название измеряемого параметра;
- столбец 3 — состояние вакуумметров (11 — в режиме измерений);
- столбец 4 — значение измеряемого параметра;
- столбец 5 — код единиц измерений вакуумметров (59 — в паскалях);
- столбец 6 — код возникшей ошибки (0 — в штатном режиме);
- столбец 7 — очередность измеряемых данных (0 — нет приоритета).

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}]:

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

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

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

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

³⁰ Фунт-сила на квадратный дюйм (англ. round-force per square inch, lbf/in²) — внесистемная единица измерения давления.

³¹ Стандартный кубический сантиметр в минуту (англ. standard cubic centimeters per minute, cm³/min) — единицы измерения потока в см³/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.