



Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

В.Л. Шатохин

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Москва 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

В.Л. Шатохин

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

*Допущено Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по УГСН 14.00.00
«Ядерная энергетика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлениям подготовки
14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок,
14.03.02 и 14.04.02 «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2025

УДК 621.52(076.5)
ББК 31.77я7
Ш 28

Шатохин В.Л. Лабораторный практикум по вакуумной технике: Учебно-методическое пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – 160 с.

Пособие содержит описание и методические указания к выполнению четырех лабораторных работ: «Исследование режимов откачки вакуумной системы», «Измерение вакуума и газовых потоков», «Исследование состава остаточного газа», «Изучение техники течеискания». Тематика лабораторных работ рассчитана на закрепление лекционного курса по вакуумной технике и приобретение практических навыков работы с вакуумными установками.

Каждая лабораторная работа содержит развернутую теоретическую вводную часть по тематике работы, перечень практических заданий и методические рекомендации по их выполнению, вопросы для подготовки.

Все лабораторные стенды оснащены современным вакуумным оборудованием. Значительную часть материала учебного пособия составляют описание лабораторного оборудования, принципов его работы, технических характеристик и руководства по работе с оборудованием и установками.

Предназначено для учащихся инженерно-физических специальностей.

Рецензенты: канд. тех. наук, доц. А.Е. Новожилов; гл. специалист ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова А.В. Самошин.

ISBN 978-5-7262-3151-8

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2025

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Лаборатория вакуумной техники оснащена современным высокотехнологичным вакуумным оборудованием. Работа с таким оборудованием требует обязательной предварительной подготовки, изучения конструкции оборудования, принципов его работы и инструкций по эксплуатации. В связи с этим к обучающимся в лаборатории вакуумной техники предъявляются определенные требования по уровню подготовки и соблюдению правил выполнения лабораторных работ.

Правила выполнения лабораторных работ

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после получения допуска у преподавателя.

При подготовке к лабораторным работам необходимо подробно изучить устройство, характеристики, принципы работы и способы управления оборудованием в разделе данного пособия «Оборудование лабораторных стендов».

Перед выполнением каждого задания лабораторной работы необходимо сначала внимательно до конца прочитать и изучить последовательность выполнения всех пунктов данного задания.

По окончании выполнения основных заданий лабораторной работы вакуумный стенд оставить в рабочем откачанном состоянии. Последнее задание «**Выключение установки**» выполнять после проверки преподавателем выполнения лабораторной работы и получения разрешения на выключение установки.

При работе с вакуумным оборудованием соблюдать требования вакуумной гигиены (прил. 3).

Меры предосторожности при работе с оборудованием лабораторных стендов

Запрещено выполнять действия с клапанами и затворами, в результате которых может возникнуть резкий перепад давлений на лопатках работающего турбомолекулярного насоса (ТМН). На полной мощности скорость вращения ротора ТМН достигает 90000 об/мин, и резкий перепад давлений на лопатках может привести к разрушениям турбины и самого насоса.

Для повышения давления в системе до уровня атмосферного необходимо дождаться полной остановки ротора ТМН.

Вращение рукоятки ручного привода вакуумных клапанов и затворов производить плавными движениями, без чрезмерных усилий, до перевода запорного элемента в крайнее положение с упором. Закрытие производится вращением рукоятки по часовой стрелке (правое вращение), открытие – против часовой стрелки (левое вращение).

Рукоятка тонкой регулировки натекателя является прецизионным механизмом и требует бережного обращения. В противном случае механизм натекателя может быть испорчен. Закрывать натекатель вращением рукоятки до появления сопротивления вращению. Не затягивать до упора, так как при этом может произойти заклинивание игольчатого механизма натекания.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ (лабораторная работа I)

Цель: получить представление о характерных особенностях работы вакуумной системы, включающей низко- и высоковакуумный насосы; изучение устройства и принципов работы вакуумных насосов; приобретение практических навыков работы с вакуумной системой; исследование рабочих параметров вакуумной системы.

1.1. Общие сведения

1.1.1. Откачка вакуумной системы

Вакуумной системой называется совокупность взаимосвязанных устройств для получения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых объемов (камер) и связывающих их вакуумных трубопроводов.

Во время откачки происходит уменьшение массы газа в вакуумном объеме. Осуществляется откачка с помощью устройств для получения и поддержания вакуума – вакуумных насосов, удаляющих или поглощающих газ из вакуумной системы.

При постоянных температуре и составе газа скорость изменения количества газа, выраженного в единицах pV , пропорциональна результирующему потоку газа и определяется выражением

$$d(pV)/dt = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}},$$

где V – объем вакуумной камеры, м^3 ; p – давление в камере, Па; t – время, с; $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$ – входящий и выходящий газовые потоки в вакуумной камере, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Выходящий поток связан с работой вакуумного насоса и равен $Q_{\text{вых}} = S_{\text{эф}} \cdot p$, где $S_{\text{эф}}$ – эффективная быстрота откачки насосом вакуумной камеры, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для камеры постоянного объема можно записать:

$$V \cdot (dp/dt) = Q_{\text{вх}} - S_{\text{эф}} \cdot p.$$

Предполагая $Q_{\text{вх}}$ постоянным и интегрируя данное выражение, получим так называемое уравнение откачки, зависимость давления от времени:

$$p(t) = \frac{Q_{\text{вх}}}{S_{\text{эф}}} - \left(\frac{Q_{\text{вх}}}{S_{\text{эф}}} - p_{\text{нач}} \right) \cdot \exp \left(-\frac{S_{\text{эф}}}{V} t \right),$$

где $p_{\text{нач}}$ – начальное давление в вакуумной камере. Следовательно, в процессе откачки давление падает по экспоненциальному закону с постоянной времени откачки $\tau = V/S_{\text{эф}}$, определяющей скорость снижения давления в откачиваемом объеме. При $t \rightarrow \infty$ давление в камере будет приближаться к величине $p_{\text{пр}} = Q_{\text{вх}}/S_{\text{эф}}$. Эта величина – *предельное остаточное давление*, наименьшее давление, которое может быть достигнуто в данных условиях откачки.

У входящего газового потока есть несколько составляющих, в том числе потоки натекания $Q_{\text{т}}$ из атмосферы и потоки газовыделения $Q_{\text{гв}}$ с внутренних поверхностей. Таким образом, величина предельного давления определяется, с одной стороны, качеством изготовления вакуумной камеры и эффективностью работы системы откачки, с другой.

Другим фактором, препятствующим получению в откачиваемой системе низкого давления, может стать ограничение, связанное с самим вакуумным насосом. Любой насос в силу конструктивных особенностей характеризуется минимальной величиной давления – *предельным давлением насоса* p_0 , которое обеспечивается насосом без подключения к нему откачиваемого объема. При достижении предельного давления на входе насоса поступающий в насос поток газа из камеры уменьшается до величины обратного потока, выходящего из насоса, т.е. производительность насоса падает до нуля. Насос продолжает работать, однако суммарный поток откачки насосом $Q = 0$ и $dp/dt = 0$. Параметр p_0 является одной из наиболее важных характеристик вакуумного насоса и указывается в его технических данных. Соответственно, и при откачке вакуумной системы конкретным насосом давление в системе не может быть получено ниже предельного давления данного насоса.

Графики зависимостей $p(t)$ в полулогарифмическом масштабе на начальном участке имеют вид прямых с углом наклона, определяемым τ . При приближении давления к предельному остаточному давлению $p_{\text{пр}}$ скорость снижения давления уменьшается, и в пределе

давление остается практически постоянным (для конечного интервала времени).

1.1.2. Проводимость вакуумных элементов

Любой элемент вакуумной системы, трубопровод, характеризуется пропускной способностью или *проводимостью* U , м³/с:

$$U = Q / (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}),$$

где Q – поток газа через элемент; $p_{\text{вх}}$ – давление на входе элемента; $p_{\text{вых}}$ – давление на выходе элемента.

Наличие соединительных трубопроводов между вакуумным насосом и откачиваемым объемом вакуумной камеры приводит к тому, что возникает перепад давлений: $p - p_{\text{н}} = Q/U$, где p – давление в камере, $p_{\text{н}}$ – давление на входе в насос. В условиях непрерывного газового потока из камеры в насос будет выполняться равенство

$$Q = S_{\text{н}} \cdot p_{\text{н}} = S_{\text{эф}} \cdot p = U \cdot (p - p_{\text{н}}),$$

где $S_{\text{н}}$ – *быстрота действия насоса*. Таким образом, с учетом ограничивающего действия проводимости U соединительного трубопровода, откачка вакуумной камеры будет осуществляться с некоторой $S_{\text{эф}}$, заведомо меньшей быстроты действия насоса $S_{\text{н}}$:

$$1/S_{\text{эф}} = 1/U + 1/S_{\text{н}}.$$

Данное уравнение часто называют *основным уравнением вакуумной техники*. Наличие трубопровода между камерой и насосом приводит к тому, что $S_{\text{эф}} = U/(1+U/S_{\text{н}})$. Соотношение между $S_{\text{н}}$ и $S_{\text{эф}}$ называется *коэффициентом использования насоса*. Допустимыми считаются значения $S_{\text{н}}/S_{\text{эф}}$, равные 1,5–2.

Для трубопровода пропускную способность в достаточно широком диапазоне давлений можно вычислять по следующей формуле (уравнение Кнудсена): $U = U_{\text{в}} + U_{\text{м}} \cdot K$, где $U_{\text{в}}$ и $U_{\text{м}}$ – проводимости в вязкостном и молекулярном режимах течения газа соответственно; K – коэффициент, зависящий от среднего давления в трубопроводе. Соответствующие выражения проводимостей для круглого трубопровода длиной L и диаметром d в азотном эквиваленте равны:

$$U_{\text{в}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{L} p_{\text{ср}}; \quad U_{\text{м}} = 121 \frac{d^3}{L}; \quad K = \frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 dp_{\text{ср}}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 dp_{\text{ср}}};$$

здесь $p_{\text{ср}} = (p_{\text{вх}} + p_{\text{вых}})/2$.

1.1.3. Этапы вакуумной откачки

Число насосов в вакуумной системе определяет число ступеней откачки. Каждый из насосов предназначен для работы в определенном диапазоне давлений. Для обеспечения заданного перепада давлений между вакуумной камерой и атмосферой может потребоваться несколько насосов. Высоковакуумные установки состоят из двух и более ступеней откачки. В таких установках используются диффузионные, молекулярные и (или) сорбционные насосы. В установках для получения сверхвысокого вакуума на верхних ступенях откачки применяются некоторые типы магниторазрядных насосов и криогенные агрегаты.

В лабораторной работе изучается двухступенчатая система откачки, состоящая из высоковакуумного турбомолекулярного (ТМН) и низковакуумного пластинчато-роторного насосов (ПРН). Соответствующие им качественные характеристики быстроты действия насосов $S_n(p)$ приведены на рис. 1.1.

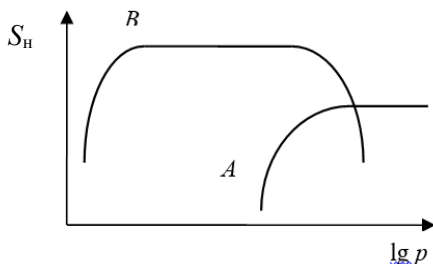


Рис. 1.1. Качественные зависимости быстроты действия насосов от входного давления: *A* – низковакуумный; *B* – высоковакуумный

Рис. 1.1 иллюстрирует важную особенность высоковакуумного насоса: имея максимальную быстроту действия при давлениях порядка 10^{-1} – 10^{-5} Па, с увеличением давления он становится крайне неэффективным. Более того, физические принципы, лежащие в основе работы такого насоса, не позволяют ему нормально функционировать при давлениях 10 Па и выше. Поэтому в качестве предварительной ступени откачки используется низковакуумный насос,

имеющий высокую производительность при давлениях, близких к атмосферному.

Весь процесс откачки можно разделить на два этапа.

На первом этапе откачки с помощью низковакуумного насоса осуществляется удаление из камеры основного количества газа. При этом поток газа, десорбированного с внутренних поверхностей системы, по сравнению с потоком газа, откачиваемого из объема, является ничтожно малым. На этом этапе можно считать $Q_{\text{вх}} = 0$, и в уравнении откачки получаем

$$p(t) = p_{\text{нач}} \cdot \exp\left(-\frac{S_{\text{эф}}}{V} t\right).$$

Время откачки до заданного давления p :

$$t = \frac{V}{S_{\text{эф}}} \cdot \ln \frac{p_{\text{нач}}}{p}.$$

Однако при давлениях, близких к атмосферному, когда реализуется вязкостный режим течения газа, проводимость трубопровода U сильно зависит от давления. Она будет максимальной при атмосферном давлении и станет резко уменьшаться со снижением давления. Следовательно, при откачке станет уменьшаться и $S_{\text{эф}}$, тем самым увеличивая время откачки.

Давление, достигаемое на этапе низковакуумной откачки, определяется предельным давлением вакуумного насоса.

При давлении около 10 Па уже может включаться высоковакуумный насос. На этапе высоковакуумной откачки удаляется не только оставшийся объемный газ, но и газ, сорбированный деталями установки. Поток газа $Q_{\text{вх}}$ будет сравним с потоком газа, откачиваемого из объема. Необходимо рассматривать полное уравнение откачки, которое можно преобразовать к виду

$$\frac{p - Q_{\text{вх}}/S_{\text{эф}}}{p_{\text{нач}} - Q_{\text{вх}}/S_{\text{эф}}} = \exp\left(-\frac{S_{\text{эф}}}{V} t\right).$$

Или для времени откачки:

$$t = \frac{V}{S_{\text{эф}}} \cdot \ln \frac{p - Q_{\text{вх}}/S_{\text{эф}}}{p_{\text{нач}} - Q_{\text{вх}}/S_{\text{эф}}}.$$

Это время может быть достаточно коротким в силу большой скорости действия высоковакуумных насосов.

Полученное предельное остаточное давление будет квазистационарным, медленно уменьшающимся со снижением потока газовыделения с поверхностей при длительной откачке: $p_{\text{пр}}(t) = Q_{\text{вх}}(t)/S_{\text{эф}}$.

На этапе высоковакуумной откачки низковакуумный насос, как правило, используется в качестве вспомогательного для высоковакуумного насоса. При одновременной последовательной работе двух насосов давление на входе низковакуумного насоса не должно превышать допустимую величину выходного давления для высоковакуумного насоса (принцип согласования последовательно работающих насосов).

1.1.4. Вакуумные насосы

Для работы в области низкого или среднего вакуума в основном применяют механические вакуумные насосы объемного принципа действия. В них происходит периодическое изменение объема рабочей камеры насоса – всасывание, сжатие и удаление газа отдельными порциями. Работа этих насосов основана на использовании закона Бойля–Мариотта, когда газ представляет собой непрерывную среду и рассматривается с макроскопической точки зрения. Такие насосы используются в качестве вспомогательных при работе с высоковакуумными насосами, а также применяются для самостоятельной откачки.

Принцип объемной откачки положен в основу конструкций вращательных вакуумных насосов. Процесс откачки создается с помощью вращения ротора внутри насоса.

Пластинчато-роторные насосы (ПРН) состоят из цилиндрического корпуса, в котором со смещением подвешен ротор, вращающийся в направлении, указанном стрелкой (рис. 1.2). Ротор снабжен пластинами, которые скользят по внутренней поверхности корпуса и прижимаются к стенкам с усилием, создаваемым пружиной или по инерции. Газ, поступающий на вход, проталкивается пластиной и вытесняется из насоса через выхлопной клапан.

Масло в насосе служит для смазки и уплотнения зазоров в насосе, а также заполняет вредное пространство в щелях. Масло отводит тепло, создаваемое при сжатии газа, т.е. охлаждает насос. С помощью уплотняющего масла в таких насосах можно получить высокие

коэффициенты компрессии. Без масла «внутренние течи» значительно больше, а возможный коэффициент компрессии будет на порядок меньше.

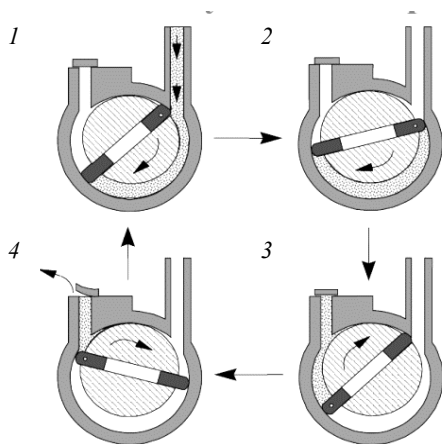


Рис. 1.2. Схема работы пластинчато-роторного насоса (ПРН)

Полное остаточное давление вакуумного насоса зависит от состава и состояния уплотняющей жидкости — масла. Пары на входе насоса являются не парами масла, а в основном продуктами его разложения (крекинга). В то время как давление насыщенных паров при комнатной температуре для масел, используемых в насосах с масляным уплотнением, меньше 10^{-2} – 10^{-3} Па, легколетучие продукты крекинга масла имеют гораздо более высокое давление насыщения. Крекинг масла в насосах происходит из-за возникновения высоких местных температур в области контактов трущихся поверхностей, которые не полностью разделены слоем масла. Наличие обратного потока продуктов крекинга масла из насосов приводит к загрязнению откачиваемых объемов.

Двухступенчатые насосы с масляным уплотнением (рис. 1.3) позволяют получить более низкое рабочее и предельное давления, чем одноступенчатые. Работа высоковакуумной первой ступени происходит с небольшим количеством масла или без масла, так как на ней создается небольшой перепад давления (около 0,1 Па), а уплотнение достигается за счет большого сопротивления узких зазоров.

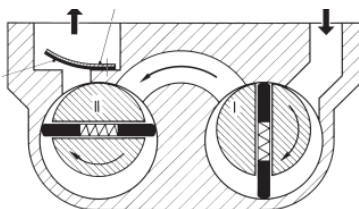


Рис. 1.3. Схема двухступенчатого пластинчато-роторного насоса

У насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов в основном определяется качеством изготовления. У одноступенчатых насосов остаточное давление обычно составляет 2–6 Па. Предельное остаточное давление двухступенчатых насосов – 10^{-2} Па.

Для уменьшения обратного потока, поступающего из насоса в откачиваемый сосуд, на впускном патрубке насоса устанавливают ловушки. Механические ловушки представляют собой устройства, препятствующие прямому пролету паров масла из насоса в откачиваемый объект. Поглощение паров в ловушках осуществляется адсорбцией на стенках капиллярных каналов сорбционных материалов.

При откачке вакуумных систем с большим количеством паров воды или других газов с высокими значениями давления насыщенного пара возникает опасность загрязнения насоса откачиваемыми веществами. На этапе сжатия может образовываться конденсат, который смешивается с маслом и ухудшает его свойства. Затем попавший в масло конденсат будет вновь испаряться в камере насоса. В этом случае насосы снабжают газобалластным устройством для дозированной подачи неконденсирующегося газа в камеру сжатия, позволяющим снизить коэффициент компрессии откачиваемого пара в образующейся смеси газов. В ПРН в качестве газобалластного устройства используется натекагель для подачи атмосферного воздуха в рабочую камеру. Если натекагель закрыт, то насос работает в обычном режиме.

Высоковакуумные насосы работают в условиях молекулярного режима течения газа. В основе принципа молекулярной откачки используется специфика удара молекул газа о поверхность твердого тела. При столкновении с поверхностью молекулы не отражаются,

как упругие шары, а удерживаются на ней некоторое время (сорбируются), после чего удаляются от поверхности в направлениях, подчиняющихся распределению по «закону косинуса». Приведя в движение твердое тело, мы тем самым сообщим сталкивающимся с его поверхностью молекулам газа скорость, направленную в сторону движения поверхности. На этом способе откачки основана работа механических молекулярных вакуумных насосов.

Простейшая схема реализации молекулярной откачки состоит из металлического цилиндра – ротора, вращающегося с большой скоростью внутри закрытого корпуса – статора (рис. 1.4).

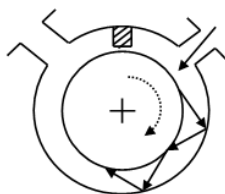


Рис. 1.4. Схема механической молекулярной откачки

Для эффективной молекулярной откачки необходимо, чтобы приобретаемая молекулой дополнительная скорость превосходила скорость ее теплового движения и существовал режим молекулярного течения газа. Угловая скорость вращения ротора ω может быть определена из условия равенства линейной скорости вращения v и тепловой скорости молекул $v_{\text{ар}}$. Для воздуха при 20°C $v_{\text{ар}} = 465$ м/с, тогда при радиусе ротора $R = 0,5$ м угловая скорость вращения ротора

$$\omega = v/R \geq v_{\text{ар}}/R$$

и частота вращения ротора

$$n = \omega/2\pi = 10000 \text{ об/мин.}$$

Максимальная быстрота действия, которая может быть получена в такой схеме откачки $S_0 \sim F \cdot \omega$, где F – постоянный множитель, определяемый геометрией и площадью поверхности рабочего зазора. Быстрота действия насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора. В современных насосах она может достигать 30 000–90 000 об/мин.

В одной из конструкций (рис. 1.5) ротор – гладкий цилиндр, а каналы откачки образованы двойными винтообразными канавками в статоре. Для нормальной работы насоса зазор между ротором и статором должен быть не более 0,1 мм.

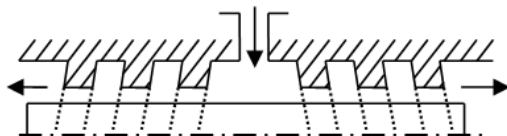


Рис. 1.5. Насос Хольвека

Такие насосы эффективно работают в режиме молекулярного течения газа. При увеличении давления и переходе режима течения газа в молекулярно-вязкостный и вязкостный эффективность откачки падает за счет возникновения отдельных слоев газа и уменьшения вероятности ударов молекул о поверхность ротора (рис. 1.6).

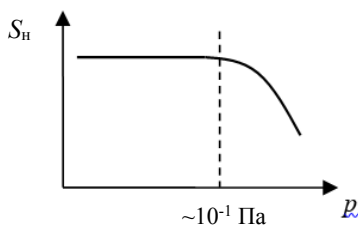


Рис. 1.6. Быстрота действия молекулярного насоса

В связи с тем, что проводимость каналов в насосе при молекулярном режиме течения газа пропорциональна $(T/m)^{0,5}$, коэффициент компрессии возрастает с увеличением молекулярной массы и снижением температуры газа. То есть насос более эффективно откачивает тяжелые газы.

В турбомолекулярном вакуумном насосе (ТМН) реализуется схема молекулярной откачки, в которой для удаления газов используется зависимость проводимости наклонного канала, движущегося перпендикулярно газовому потоку, от направления течения газа. Рассмотрим тонкую пластину с каналом, бомбардируемую с двух

сторон по нормали к поверхности молекулами газа (рис. 1.7). Скорость движения пластины сопоставима с тепловой скоростью молекул газа.

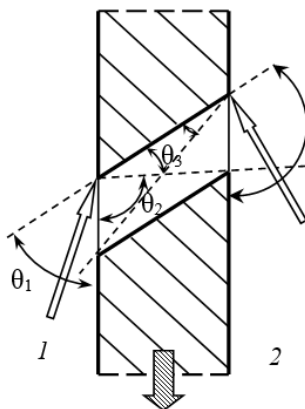


Рис. 1.7. Схема откачки перемещающейся пластиной

Относительные скорости молекул составляют с направлением движения пластины довольно острый угол, и молекулы будут ударяться о ее кромки. В предположении «косинусного» закона распределения направлений выхода «отраженных» молекул та их часть, которая отлетает в пределах угла θ_1 , будет возвращаться, θ_3 – пройдут на другую сторону пластины, θ_2 – могут оказаться по обе стороны. Вероятность того, что молекулы перейдут с одной стороны пластины на другую, зависит от соотношения этих углов. Оказывается, что вероятность переноса молекул из области 1 в область 2 намного выше вероятности обратного процесса, т.е. по такой схеме можно организовать направленный перенос молекул газа.

Этот механизм переноса был исследован с помощью метода Монте-Карло, позволяющего вычислить вероятности перехода молекул через канал в прямом (P_{12}) и обратном (P_{21}) направлениях. Оказалось, что зависящая от скорости перемещения и угла наклона канала вероятность P_{12} примерно в 10 раз больше P_{21} . Коэффициент компрессии в этом случае $K_{\max} = P_{12}/P_{21}$.

Современный вариант ТМН по своей конструкции напоминает многоступенчатый компрессор или паровую турбину (рис. 1.8, а).

Статор и ротор снабжены лопастями, установленными под определенными углами. Откачка происходит вдоль оси. Каждая пара лопаток ротора и статора представляет одну ступень откачки. Поскольку молекула, отраженная лопаткой, приобретает тангенциальную составляющую скорости в направлении вращения ротора, соответствующий наклон лопаток статорного паза здесь также обеспечивает преимущественное направление прохождения молекул (рис. 1.8, б).

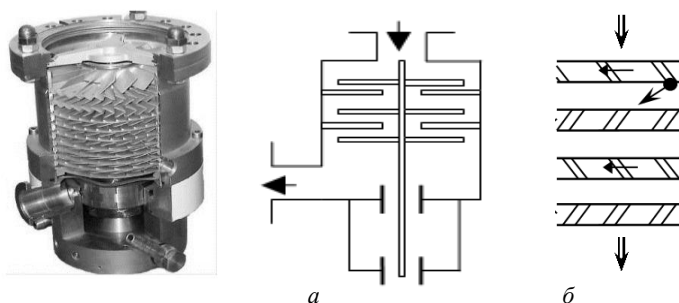


Рис. 1.8. Конструкции и схема расположения лопаток в многоступенчатом турбомолекулярном насосе

Суммарный поток газа вдоль оси ротора зависит не только от рассмотренных выше вероятностей переноса молекул, но и от перепада давлений на лопатках. Конструкция, рассчитанная на максимальную быстроту откачки, обычно характеризуется низкой степенью сжатия и наоборот. В одном насосе может быть десяток ступеней откачки, причем часто несколько ступеней на входе конструируют из расчета достижения максимальной быстроты откачки, тогда как остальные, на выходе, для достижения высоких степеней сжатия (до $10^{7(9)}$ по воздуху).

Удельная быстрота откачки может составлять ~ 2 л/с на 1 см^2 площади входного отверстия. Давление запуска 1–10 Па. Предельное давление насосов 10^{-7} – 10^{-8} Па. С увеличением молекулярной массы газа коэффициент компрессии растет за счет уменьшения перетечек газа через зазоры и увеличения отношения линейной скорости ротора к тепловой скорости молекул.

Поскольку максимальная степень сжатия соответствует тяжелым молекулам, пары масла из подшипников турбины и из низковакуумной полости не попадают в систему. Однако при остановке насоса должны быть приняты соответствующие меры предосторожности. Для предотвращения диффузии паров испаряющегося масла по объему насоса рекомендуется наполнять насос осушенным газом, азотом или воздухом.

Конструкции современных ТМН оптимизируются с точки зрения максимальной скорости вращения ротора и конструктивных особенностей. Вместо масляных подшипников используются газодинамические и магнитные подвески. Создаются комбинированные варианты насосов, соединяющие высокую быстроту откачки ТМН и большую степень сжатия молекулярного насоса в качестве выходной ступени откачки.

1.2. Лабораторная установка № 1

Принципиальная схема лабораторного экспериментального стенда показана на рис. 1.9. Вакуумная камера разделена калиброванной проводимостью U на две части – $CV1$ и $CV2$.

Система откачки установки состоит из высоковакуумного ТМН NR и низковакуумного ПРН NL . В высоковакуумном тракте откачки над ТМН установлен изолирующий шиберный затвор VT . Вспомогательная откачка во время работы ТМН производится насосом NL через клапан $V2$.

Линия байпасной, предварительной откачки проходит через клапан $V1$. Клапанами $V1$ и $V2$ производится переключение режима работы насоса NL с предварительной низковакуумной откачки камер на вспомогательную откачку ТМН.

Давление в вакуумных камерах измеряется широкодиапазонными вакуумметрами $P1$ и $P2$. Для контроля работы насоса NL и измерения давления в низковакуумном тракте установлен тепловой вакуумметр PT .

Натекатель $VF1$ позволяет напускать регулируемый поток газа для исследования рабочих режимов системы или используется для разгерметизации установки. Для предотвращения ошибочной разгерметизации на входе натекателя может быть установлена заглушка.

Натекатель $VF2$ предназначен для напуска атмосферы в выключенный насос NL для предотвращения подъема масла из камеры насоса.

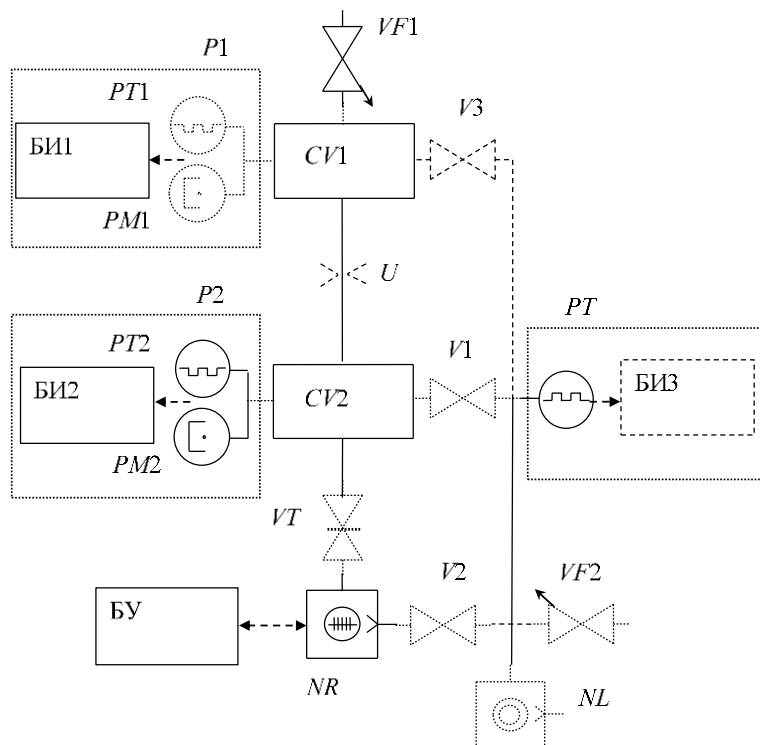


Рис. 1.9. Схема лабораторного экспериментального стенда:

CV – вакуумные камеры; U – разделительная диафрагма; VF – натекаль; VT – шиберный изолирующий затвор; V – вакуумные клапаны; PT – тепловой преобразователь; PM – магнитный электроразрядный преобразователь; $P1$, $P2$ – широкодиапазонные вакуумметры; $БИ$ – блоки измерения и индикации вакуумных датчиков; NR – турбомолекулярный насос; NL – пластинчато-роторный насос; $БУ$ – блок управления ТМН; $V3$ – резервный клапан

Турбомолекулярный насос (NR) – модели FF63/80 [1, 2]. Обеспечивает быстроту действия 62 л/с по воздуху, предельное давление $3 \cdot 10^{-5}$ Па. Управление ТМН производится с помощью блока управления ($БУ$) ТСР100 [3].

Пластинчато-роторный насос (NL) – модели VRD-4 [4]. Имеет быстроту действия $4 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1,1 \text{ л/с}$), предельное давление $0,5 \text{ Па}$ (с газобалластом 3 Па).

Тепловой вакуумметр (PT) – модели МТР4D серии MultiTorr [2, 5]. Содержит преобразователь сопротивления (Пирани). Измеряет давление в диапазоне $10^5 - 1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

Широкодиапазонный вакуумметр (P1 и P2) – модели МТМ9D [2, 6] серии MultiTorr. Имеет комбинированный датчик с двумя измерительными системами: тепловой (Пирани) *PT* и электроразрядный с холодным катодом *PM* (инверсно-магнетронного типа). Измеряет давление в диапазоне $10^5 - 5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$.

Шиберный затвор (VT) – модели СС63В [2, 7], с уплотнением эластомерным кольцом и ручным приводом с механическим индикатором положения затвора. *Запрещено* открывать шиберный затвор при перепаде давлений по обе стороны затвора более $3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ (30 мбар). При таком перепаде затвор сильно прижат к корпусу, и при попытке его открыть отпирающий механизм может выйти из строя.

Клапан (V1 и V2) – модели MAV-HV-KF-16 [2, 8]. Угловой тарельчатый с уплотнением эластомерным кольцом и с ручным приводом.

Натекатель (VF) – модели 2701 KF16-0,8 [2]. Ручной механический игольчатого типа.

1.3. Порядок выполнения

1.3.1. Подготовка к выполнению работы

Сопоставить элементы схемы установки (см. рис. 1.9) с соответствующими деталями самой установки.

Изучить технические характеристики вакуумного оборудования лабораторной установки.

Включить общее питание оборудования стенда. Включаются цифровые табло вакуумметров. Время выхода вакуумметров на рабочий режим – несколько минут.

Включить лабораторный компьютер.

Проверить давление в вакуумной системе установки по показаниям вакуумметров.

Установить в системе атмосферное давление при открытом натекателе. Проверить положение натекателя *VF1* плавным поворотом регулирующей головки: против часовой стрелки – «Открыто», по часовой стрелке до легкого упора – «Закрыто».

При открытом натекателе *VF1* выровнять давление во всех частях вакуумной системы. Для этого последовательно открыть клапаны *I1* и *I2* вращением рукоятки против часовой стрелки, после чего можно открыть затвор *VT* вращением рукоятки привода затвора против часовой стрелки до перемещения индикатора положения затвора в крайнее правое положение «Открыто».

При открытом натекателе *VF1* проверить калибровку вакуумметров на атмосферное давление. В случае неточных показаний *по указанию преподавателя* выполнить дополнительную калибровку.

Проверить положение натекателя *VF2*. Установить **натекатель *VF2*** в положение «Закрыто».

Перевести **натекатель *VF1*** в положение «Закрыто».

Закрыть шиберный затвор *VT* вращением рукоятки привода затвора по часовой стрелке до перемещения индикатора положения затвора в крайнее левое положение «Закрыто».

Закрыть клапаны *I1* и *I2* вращением рукоятки по часовой стрелке.

1.3.2. Низковакуумная откачка установки (задание 1)

Процесс откачки вакуумной системы регистрируется в виде зависимостей изменения давления от времени $p(t)$.

Запустить программу вакуумных измерений на лабораторном компьютере, проверить подключение и опрос программой вакуумных датчиков. Включить построение временных диаграмм давления.

Проверить уровень масла в насосе *NL*.

Включить насос *NL* кнопкой «Вкл/Выкл» на корпусе насоса.

Наблюдать за снижением давления в низковакуумном тракте по вакуумметру *PT*. Дождаться выхода на квазистационарный уровень, когда давление практически не меняется в течение нескольких минут.

Зафиксировать кривую откачки низковакуумного тракта. Отметить достигнутое предельное давление, сравнить с паспортными данными насоса.

Измерить величину предельного давления с открытым клапаном газобалласта у *NL*. После измерений клапан закрыть.

Открыть клапан *I1* вращением рукоятки против часовой стрелки.

Наблюдать за снижением давления в камерах установки. Дождаться выхода давления на квазистационарный уровень.

Зафиксировать полученные кривые откачки. Отметить соотношение достигнутого давления в камерах. Провести анализ полученных кривых откачки, определить постоянные времени откачки, сделать оценки быстроты откачки вакуумных камер.

1.3.3. Высоковакуумная откачка установки (задание 2)

Насос *NL* включен, работает.

Закрыть клапан *I1*.

Открыть клапан *I2*, откачать объем ТМН.

Включить питание БУ ТМН. После проведения внутренней диагностики БУ перейдет в дежурный режим.

Включить ТМН кнопкой «Пуск/Стоп» на БУ. Дождаться выхода насоса на рабочий режим, ожидаемое время не более 3 мин.

Проверить давление в камерах установки. Давление в камере *I2* над ТМН должно быть не более $1 \cdot 10^3$ Па (10 мбар). В случае превышения давления дополнительно откачать камеры насосом *NL*. Для этого открыть клапан *I1*, дождаться снижения давления менее $1 \cdot 10^3$ Па и снова закрыть клапан *I1*.

Открыть шиберный затвор *IT* плавным вращением рукоятки привода против часовой стрелки, перевести указатель положения затвора в состояние «Открыто» (крайнее правое).

Наблюдать за снижением давления в камерах установки. Дождаться выхода на квазистационарный уровень, когда давление практически не меняется в течение нескольких минут. Зафиксировать полученные кривые откачки. Отметить соотношение достигнутого давления в камерах.

Провести анализ полученных кривых откачки, определить постоянные времени откачки, сделать оценки быстроты откачки вакуумных камер, уровней теплового газовыделения с поверхностей камер.

1.3.4. Оценка газовой нагрузки в вакуумных камерах (задание 3)

Вакуумные насосы включены, работают.

Затвор VT и клапан $V2$ открыты.

Дождаться устойчивого состояния давления в вакуумных камерах.

Закрыть полностью шиберный затвор VT . Плавным вращением рукоятки привода по часовой стрелке перевести указатель положения затвора в состояние «Закрето» (крайнее левое).

Отслеживать динамику роста давления в камерах, **не допускать превышения давления в камере $CV2$ уровня $0,1 \text{ Па}$ (10^{-3} мбар).**

Открыть шиберный затвор VT .

По графикам динамики роста давления оценить величину потока натекания в вакуумных камерах. Вследствие поступления в камеру за время Δt газового потока Q давление увеличится на Δp , а количество газа возрастет на $\Delta p V$, где V – объем изолированной части вакуумной системы. Тогда измеряемый поток

$$Q = V \cdot (\Delta p / \Delta t).$$

Объем вакуумных камер вычисляется по их геометрическим размерам.

1.3.5. Определение быстроты действия насоса (задание 4)

Для экспериментального определения быстроты действия насоса NR требуется измерить давление на входе в насос, создаваемое входящим газовым потоком Q . Тогда можно вычислить эффективную быстроту откачки вакуумной камеры:

$$S = \frac{Q}{p_2} = \frac{U(p_1 - p_2)}{p_2},$$

где p_1 и p_2 – давление в камерах $CV1$ и $CV2$ соответственно, U – проводимость диафрагмы между камерами. Здесь использовано вычисление стационарного газового потока по перепаду давления на вакуумном элементе известной проводимости. Регулировка потока газа осуществляется с помощью натекателя $VF1$.

Вакуумные насосы включены, работают.

Затвор *VT* и клапан *V2* открыты.

Медленным плавным вращением регулировочного винта натека-
теля устанавливать давление в камере *CV2* в пределах рабочего диа-
пазона ТМН, **не допускается превышение верхней границы диа-
пазона 0,1 Па (10^{-3} мбар).**

Провести измерения для нескольких значений давлений.

Закрыть натекаТЕЛЬ.

Вычислить эффективную скорость откачки, затем – быстроту
действия насоса, рассчитав проводимость вакуумного тракта. Оце-
нить величину производительности насоса.

1.3.6. Выключение установки

***Выключение установки выполняется по указанию преподава-
теля.***

Для выключения ТМН *NR* нажать кнопку «Пуск/Стоп» на блоке
БУ. Начнется процесс остановки насоса, отображаемый на табло БУ
ТМН.

Дождаться остановки ТМН.

Закрыть клапан *V2*.

Медленным вращением рукоятки натекателя *VF1*, с остановками
и контролем давления в камерах, произвести плавный напуск атмо-
сферы.

Закрыть шиберный затвор *VT*.

Перед выключением ПРН рекомендуется провести обезгажива-
ние масла и осушение камер насоса от возможного конденсата водя-
ного пара (*выполняется по заданию преподавателя*). Для этого на
работающем ПРН следует открыть клапан газобалласта, затем через
30 мин закрыть клапан.

Выключить ПРН *NL* клавишей «Вкл/Выкл» на корпусе насоса.

Плавно приоткрыть натекаТЕЛЬ *VF2* для напуска атмосферы в ли-
нию предварительной откачки. Контролировать давление в линии
по вакуумметру *PT*. Напуск атмосферы необходим для предотвра-
щения попадания масляных включений из ПРН в вакуумную си-
стему.

Питание аппаратуры установки не отключать.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется скорость изменения количества газа в вакуумном объеме?
2. По какому закону падает давление в объеме при откачке?
3. Что называется уравнением откачки? Запишите его.
4. Чему равно предельное остаточное давление в объеме?
5. Что такое предельное давление вакуумного насоса?
6. Что является проводимостью вакуумного элемента?
7. Чем определяется эффективная быстрота откачки насоса?
8. Сколько ступеней откачки в лабораторном стенде?
8. Чем характеризуется этап низковакуумной откачки?
9. В чем особенность этапа высоковакуумной откачки?
10. Какие насосы работают по принципу объемной откачки?
11. Что представляет конструкция пластинчато-роторного насоса?
12. В чем особенность насосов с масляным уплотнением?
13. Что такое газобалластное устройство?
14. Как работают молекулярные механические насосы?
15. В чем заключается механизм откачки ТМН?

ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА И ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

(лабораторная работа 2)

Цель: рассмотреть методы и способы измерения вакуума в различных диапазонах давлений, изучить принципы работы вакуумметрической аппаратуры; провести измерение давлений и газовых потоков в условиях низкого и высокого вакуума; выполнить сравнение показаний вакуумметров по методике градуировки.

2.1. Общие сведения

2.1.1. Характеристики вакуумных измерений

Измерения, основанные на определении величины силы давления газа на ограничивающую поверхность, являются абсолютными и основаны на механических процессах в измерительном механизме – прогибе, смещении и т.п. Приборы, которые непосредственно измеряют давление газа, называются *вакуумметрами прямого действия*, или *абсолютными вакуумметрами*. Отсчет давления вакуумметров прямого действия не зависит от состава газа. Эти приборы покрывают диапазон давлений 10^5 – 10^{-3} Па. Относительная погрешность абсолютных измерений тем меньше, чем выше давление.

При низких давлениях прямые измерения становятся проблематичны, и тогда измеряется молекулярная концентрация разреженного газа. В основу таких измерений положена зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от концентрации и рода газа. Поэтому такие измерения всегда косвенные. *Вакуумметры косвенного действия* измеряют не само давление, а некоторую его функцию. Диапазон таких измерений достигает до 10^{-13} Па.

Вакуумметры косвенного действия нуждаются в градуировке путем сличения их показаний с показаниями абсолютных вакуумметров. Для обеспечения единства вакуумных измерений метрические характеристики промышленных вакуумметров обычно приводят для воздуха или азота. Поэтому шкалы вакуумметров градуируют в еди-

ницах давления, используя эквивалентное азотное давление, т.е. такое давление чистого азота, которое давало бы показание вакуумметра, равное показанию при измерении давления другого газа.

Область давлений, в которой будут нормированы допускаемые погрешности измерений конкретного вакуумметра, представляет собой *диапазон измерений вакуумметра*.

Другая важная характеристика – *чувствительность вакуумметра*, определяемая как отношение изменения сигнала на выходе вакуумметра к вызывающему его изменению давления.

2.1.2. Вакуумметрия

Деформационные вакуумметры

Принцип действия деформационных вакуумметров основан на использовании в качестве меры давления газа на поверхность упругой механической деформации чувствительного элемента (закон Гука), т.е. выполняется непосредственное измерение величины давления газа.

Различаются деформационные вакуумметры по типу применяемого упругого чувствительного элемента и способу измерения деформаций.

Трубчатые вакуумметры чаще всего применяются для измерения давления вблизи атмосферного (барометры).

Более чувствительными являются мембранные вакуумметры с чувствительным упругим элементом в виде тонкой мембраны. В общем случае мембранные вакуумметры имеют две вакуумно-изолированные камеры (рис. 2.1, *а*), разделенные мембраной.

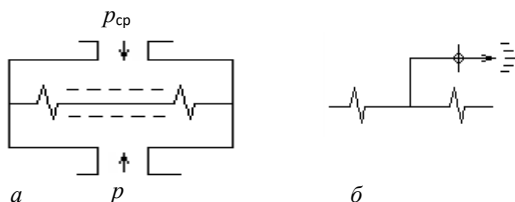


Рис. 2.1. Схема камер деформационного мембранного вакуумметра (*а*) и стрелочного указателя (*б*)

Деформация мембраны пропорциональна разности давлений: $(p - p_{\text{ср}}) = kx$, где p и $p_{\text{ср}}$ – измеряемое и сравнительное (опорное) давление, k – коэффициент пропорциональности (упругости), x – смещение (деформация мембраны).

Здесь реализуются дифференциальные измерения. Однако при условии, что опорное давление в откачанной и изолированной камере много меньше измеряемого, измеряется абсолютное давление.

Различаются приборы по способу регистрации деформаций и методу измерений. Смещение мембраны регистрируется в простейших мембранных преобразователях (барометрах) стрелочными указателями (рис. 2.1, б). В современных чувствительных мембранных вакуумметрах для регистрации смещения мембраны используются тензодатчики и электрические методы. Один из них заключается в определении электрической емкости между мембраной и вспомогательным неподвижным электродом (рис. 2.2, а), другой – в измерении индуктивности катушки, в которую вдвигается металлический сердечник, связанный с мембраной.

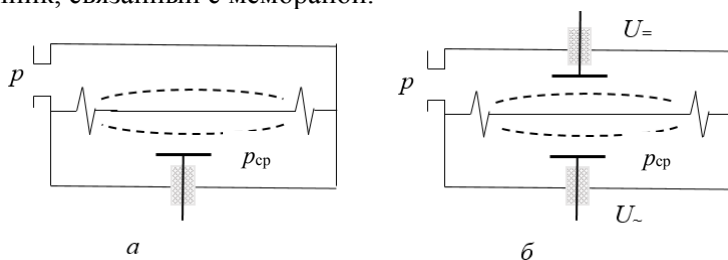


Рис. 2.2. Схемы измерений мембранного вакуумметра

Верхний предел измерения мембранных вакуумметров ограничивается пределом упругости материала мембраны и возникающими остаточными деформациями. Нижний предел – уменьшением чувствительности и точностью отсчета малых смещений.

Линейность показаний таких преобразователей наблюдается только при небольших смещениях мембраны в области постоянства коэффициента k . Поэтому широко используются методы с компенсацией смещения мембраны электрическим или механическим воздействием, приводящими мембрану в исходное состояние (нулевой

метод измерения). В этом случае мерой давления становится величина компенсирующей силы, удерживающей мембрану в равновесном состоянии.

При электрическом методе компенсации смещения постоянный потенциал на еще одном дополнительном электроде (рис. 2.2, б) приводит к возникновению электростатических возвращающих сил, компенсирующих отклонение мембраны: $F_э = -dW/dx$, где W – энергия электрического поля, а x – расстояние между мембраной и дополнительным электродом. Подставляя выражение для W , получаем

$$F_э = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \left(\frac{U}{x} \right)^2 \pi R^2,$$

где U – приложенная разность потенциалов, R – радиус дополнительного электрода. В этом случае разность давлений в приборе будет пропорциональна квадрату постоянного компенсирующего напряжения. Смещение мембраны измеряется емкостным методом с помощью переменного напряжения на другом вспомогательном электроде.

В зависимости от диапазона измерений и условий эксплуатации мембраны изготавливают из различных материалов (нержавеющая сталь, ковар, кварц, металлизированная керамика). Диаметр мембран достигает 120 мм при толщине 10 мкм. Диапазон измерения мембранных вакуумметров составляет 10^5 – 10^{-3} Па, однако один прибор регистрирует давление в пределах 3–4 порядков.

Для мембранно-емкостных преобразователей верхний предел измерений ограничивается пробойным напряжением между обкладками, а нижний – порогом чувствительности емкостного моста для измерения емкости промежутка мембрана – измерительный электрод.

Тепловые вакуумметры

Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газа от его давления, поэтому в данном случае реализуются косвенные измерения давления. В газ вводится нагреваемый элемент, и по температуре его поверхности, зависящей от теплоотвода через газ, возможно далее судить о величине давления. На рис. 2.3 представлена качественная зависимость от давления теплового потока E_T через разреженный газ.

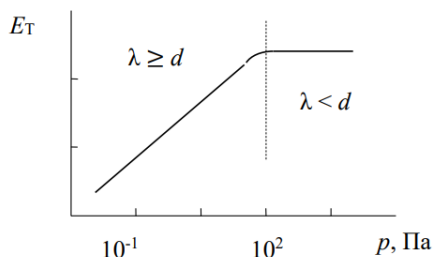


Рис. 2.3. Зависимость теплопроводности газа от давления для коаксиальной цилиндрической системы из баллона диаметром d и тонкой металлической нити

В области низкого вакуума теплопроводность газа практически не зависит от давления. Со снижением давления, когда λ сравнивается с расстоянием между нагреваемым элементом и стенками прибора, обмен энергиями между поверхностями будет осуществляться уже отдельными молекулами, пролетающими это расстояние без соударений. Появится зависимость теплового потока от давления. Таким образом, тепловой вакуумметр работает в области среднего и высокого вакуума, а переход от низкого вакуума к среднему является верхним пределом измерения теплового вакуумметра.

В качестве теплового элемента может использоваться тонкая металлическая нить, нагреваемая пропускаемым по ней электрическим током. Нить располагается внутри баллона вакуумного датчика. Уравнение теплового баланса такого преобразователя можно записать в следующем упрощенном виде: $I^2 R = E_T$, где I – ток накала нити; R – сопротивление нити; E_T – потери теплоты (потоки) за счет теплопроводности газа. Эти потери можно определить так: $E_T = v \cdot (E_n - E_p) \cdot A$, где v – частота столкновений молекул газа с поверхностью; A – площадь поверхности нити; E – тепловая энергия молекулы газа, соответствующая либо температуре нити T_n , либо температуре поверхности колбы (газа) T_p .

В более общем случае должны также учитываться потери за счет конвекции, излучения газа, теплопроводности нити. Также следует учитывать эффективность обмена энергией молекулы при соударении с поверхностью (температурная аккомодация). Второстепенные потери стараются минимизировать в конструкции преобразователя

и выбором рабочих условий. Потери на излучение зависят от рабочей температуры нити, а теплопроводность зависит от ее толщины и длины.

При очень низких давлениях, когда $\lambda \gg d$, отвод тепла через газ становится пренебрежимо малым по сравнению с тепловым излучением и потерями тепла через металлические вводы. Этим определяется нижний предел измерения теплового преобразователя.

При высоких давлениях газа, когда $\lambda \ll d$, нарушаются условия молекулярного переноса, и теплопроводность перестает зависеть от давления (верхний предел). Теплоотвод с нити в основном осуществляется за счет возникающей конвекции газа, которая может быть использована только для индикации высоких давлений.

Существуют два способа организации работы тепловых вакуумметров:

- фиксировать ток нити I и измерять изменяющуюся с давлением температуру T_n ;
- поддерживать постоянной T_n регулировкой величины тока I и по току судить об изменении давления.

Соответственно, применяются два метода измерения давления тепловым вакуумметром – постоянного тока и постоянной температуры.

В зависимости от способа измерения температуры тепловые преобразователи делятся на *термопарные* и *преобразователи сопротивления* (датчик Пирани).

В термопарном преобразователе (рис. 2.4, а) температура нити измеряется термопарой. В преобразователе сопротивления (рис. 2.4, б) определение температуры нити производится через зависимость сопротивления R от температуры: $R = R_0(1 + \beta T_n)$. Для измерения R применяется мостовая схема с уравнительным сопротивлением. Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

Диапазон рабочих давлений тепловых преобразователей $5 \cdot 10^3 - 10^{-1}$ Па. Инерционность показаний, связанная с тепловой инерцией нити, максимальна при низких давлениях и может составлять секунды.

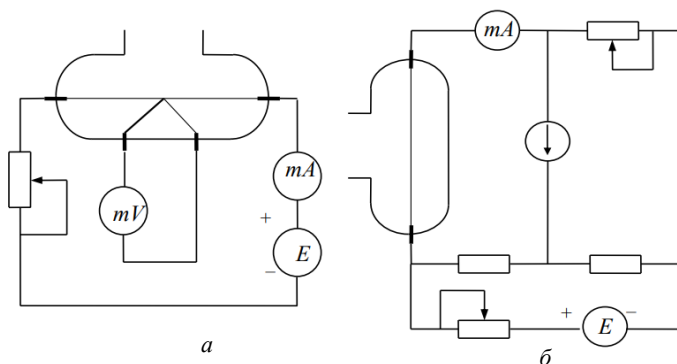


Рис. 2.4. Схемы тепловых вакуумметров: а) термопарного;
б) сопротивления (Пирани)

Показания тепловых вакуумметров зависят от рода газа, для разных газов изменяются коэффициент молекулярной теплопроводности и коэффициент температурной аккомодации на нагретой поверхности.

Ионизационные вакуумметры

В основе работы ионизационных вакуумметров лежат явления ионизации в газах. Образующиеся в объеме свободные заряды обуславливают электрическую проводимость газового промежутка или возникновение газового разряда. В первом случае мерой степени разрежения газов может служить величина тока только положительных ионов, во втором – величина полного разрядного тока. Такие измерения давления газов очевидно являются косвенными.

В *электронных ионизационных вакуумметрах* ионизация в объеме преобразователя происходит вследствие соударения с частицами газа электронов, эмитируемых накалившимся катодом и ускоренных в электрическом поле. Число образующихся положительных ионов пропорционально концентрации молекул газа n : $I_n = C \cdot n \cdot I_e$, где I_n – ионный ток; I_e – электронный ток эмиссии катода; C – коэффициент пропорциональности. При учете соотношения $p = nkT$ получаем измерительное уравнение ионизационного преобразователя:

$p = I_n / (K_n I_e)$, где $K_n = C/kT$ – чувствительность ионизационного преобразователя.

При поддержании постоянного значения электронного тока эмиссии градуировочная характеристика преобразователя $I_n(p)$ будет представлять линейную зависимость. Величина $a = I_e \cdot K_n$, называемая *постоянной термоэлектронного преобразователя*, равна тангенсу угла наклона градуировочной характеристики преобразователя $I_n(p)$.

В условиях высокого вакуума длина свободного пробега электронов $\lambda_e \gg d_{\text{эф}}$ ($d_{\text{эф}}$ – эффективный размер корпуса преобразователя), поэтому вероятность ионизационного столкновения с частицами газа очень мала, а величины коэффициента чувствительности низки. Для повышения вероятности ионизации необходимо увеличить эффективность ионизации.

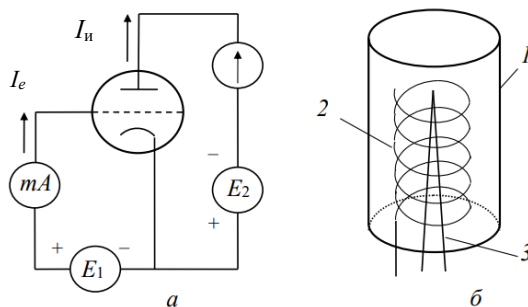


Рис. 2.5. Схема включения триодного ионизационного вакуумметра (а) и конструкция преобразователя (б)

На рис. 2.5 показана конструкция термоэлектронного преобразователя с коллектором в виде цилиндра 1, содержащего спиральную сетку 2 и накаливаемую нить катода 3. Электроны, вышедшие из катода, ускоряются по направлению к сетке, находящейся под положительным потенциалом. Ввиду большой прозрачности сетки значительная часть электронов пролетает в пространстве сетка – коллектор, где и происходит ионизация. Образованные положительные ионы собираются коллектором, имеющим небольшой отрицательный потенциал относительно катода. Электроны при дальнейшем движении оказываются в тормозящем поле и отталкиваются от коллектора в обратном направлении. Далее, ускорившись и пройдя

сетку, они снова попадают в тормозящее поле сетка – катод. Если на этом пути электрон растратил часть энергии на возбуждение или ионизацию, то он не достигнет катода и снова повторит колебательное движение. Колебания эмитированных катодом электронов около витков сетки увеличивают длину траектории электронов и повышают вероятность ионизации молекул газа.

Верхний предел измерений термоэлектронного преобразователя соответствует нарушению линейности градуировочной характеристики, когда λ_e становится меньше расстояния между электродами. При высоких давлениях заметными по сравнению с электронными становятся ионные токи. Вторичная ионизация может привести к зажиганию газового разряда и повреждению катода. Верхний предел измерений составляет примерно 10^{-1} Па.

Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, которые не зависят ни от давления, ни от коэффициента чувствительности, и которые практически невозможно выделить из общего измеряемого тока. Причинами паразитного фонового тока являются:

- фотозмиссия электронов с коллектора, вызванная электромагнитным излучением катода и мягким рентгеновским излучением анодной сетки при ее бомбардировке электронами;
- десорбция ионов с анода в результате его бомбардировки электронами;
- токи утечки.

Главная причина возникновения фонового тока – эффект рентгеновского излучения. Эти токи образуются благодаря большой поверхности охватывающего остальные электроды цилиндрического коллектора, который поглощает почти все мягкое рентгеновское излучение. В итоге нижний предел измерений вакуумметра повышается до 10^{-5} Па.

Существенное уменьшение фоновых токов наблюдается в конструкции преобразователя с осевым коллектором (рис. 2.6), где катод 1 и коллектор 2 как бы поменялись местами (вакуумметр Байярда–Альперта, ВБА). В такой конфигурации электродов значительно уменьшен телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки анода 3 попадает на коллектор, и фототок также уменьшится на 2–3 порядка по сравнению с током в обычном преобразователе.

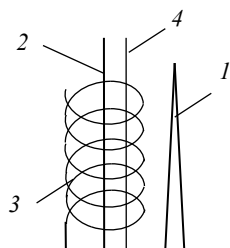


Рис. 2.6. Схема ионизационного преобразователя вакуумметра Байярда–Альперта

Если катод расположен на небольшом расстоянии от сетки, то ионизация газа происходит в сравнительно большом объеме внутри спиральной сетки. Благодаря соответствующему профилю электрического поля основная часть ионов, возникающая в пространстве сеточного анода, будет собираться на центральном коллекторе. Чувствительность данного преобразователя сравнима с триодной конструкцией. Нижний предел измерений такого вакуумметра увеличен до 10^{-8} Па.

Дополнительный электрод 4 – модулятор (см. рис. 2.6) используется для реализации дифференциальных измерений ионного тока за вычетом фоновой составляющей. Такой метод позволяет расширить предел измерений преобразователем до 10^{-10} Па.

Работа *магнитных электроразрядных вакуумметров* основана на принципе использования зависимости от давления тока самостоятельного газового разряда, возбуждаемого в скрещенных магнитном и электрическом полях. При размещении разрядного промежутка в магнитном поле ионизация газа при пониженном давлении происходит намного интенсивнее. Удлинение траектории электронов в скрещенных электромагнитных полях эквивалентно увеличению давления газа, что при прочих равных условиях приводит к значительному снижению пределов измеряемых давлений.

В вакуумметре Пеннинга преобразователь выполнен в виде разрядной ячейки Пеннинга. Магнитное поле направлено вдоль оси системы электродов (рис. 2.7), состоящей из цилиндрического анода 1 и двух дисковых катодов 2 по торцам анода.

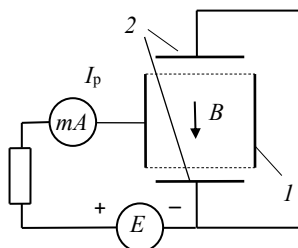


Рис. 2.7. Схема вакуумметра Пеннинга

На анод подается положительное относительно катодов напряжение 2–6 кВ, приводящее к ионизации в газе. Ионная бомбардировка холодных катодов вызывает эмиссию электронов, которые ускоряются электрическим полем и под действием магнитного поля начинают двигаться по длинной циклоиде. Одновременно накладывается колебательное движение между противокатодами, что в итоге приводит к высокой эффективности ионизации газа. Число образующихся ионов увеличивается, и между электродами зажигается тлеющий разряд.

Значение магнитной индукции выбирается больше критического, соответствующего равенству диаметров анода и окружности, по которой движется электрон. Его величина составляет около 0,1 Тл. На движение положительных ионов, в силу большой их массы, магнитное поле практически не влияет.

Ток разряда I_p является характеристикой давления:

$$I_p = I_i + I_e = C p^n,$$

где C и n – постоянные, $C = 10^{-2}–10^{-1}$ А/Па, $n = 1–1,4$. Отсюда получим измерительное уравнение магнитного преобразователя: $I_p = K_m p$, где $K_m = C p^{n-1}$ – чувствительность магнитного преобразователя. Таким образом, ток разряда магнитного преобразователя нелинейно зависит от давления.

Верхний предел измерения связан с ограничением максимального разрядного тока балластным сопротивлением, защищающим измерительный прибор от возникновения дугового разряда. Обычно верхний предел измерения находится в области давлений 10–100 Па.

Нижний предел измерений определяется фоновыми токами и составляет примерно 10^{-5} Па. Вследствие высокого потенциала может

возникать автоэлектронная эмиссия по краям катода, которая не зависит от давления и, следовательно, является фоновым током. Кроме того, при более низких давлениях тлеющий разряд либо гаснет, либо не зажигается.

В инверсно-магнетронном вакуумметре преобразователь представляет собой трехэлектродное устройство (рис. 2.8).

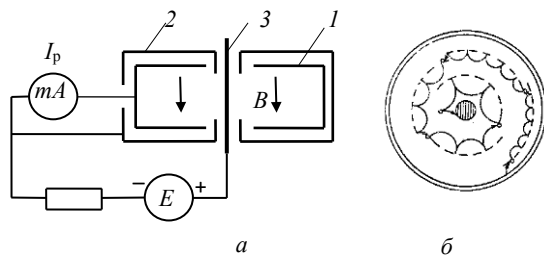


Рис. 2.8. Схема инверсно-магнетронного вакуумметра (а) и траектория движения электрона (б)

Коллектор 1 выполнен в форме почти полностью закрытого цилиндра. Катод 2 имеет две короткие экранные трубки, которые входят в полость коллектора и служат электростатической защитой от возникновения автоэлектронной эмиссии. Анодный стержень 3 расположен по оси системы.

В такой электродной системе электроны движутся по длинным циклоидальным траекториям. Приближение электронов к аноду возможно только в результате соударений с молекулами газа, сопровождающихся потерей энергии и уменьшением радиуса орбиты вращения электрона. Этим механизмом обеспечивается поддержание разряда при очень низких давлениях. Анодное напряжение составляет ~ 6 кВ, а магнитная индукция $\sim 0,2$ Тл. Зажигание разряда происходит при давлениях ниже 10^{-8} Па, а нижний предел измерений составляет 10^{-10} Па, т.е. возможно измерение и сверхвысокого вакуума.

Преимуществом магнитных преобразователей перед электронными является более высокая надежность в работе в связи с заменой накаливаемого катода холодным, а недостатком – нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении поверхностей катодов.

Показания ионизационных и электроразрядных вакуумметров будут зависеть от рода газа в силу изменения вероятности ионизации разных газов. Кроме того, на коэффициент чувствительности будет влиять конструкция электродной системы и эффективность сбора ионного тока.

Комбинированные вакуумметры

Широкодиапазонный вакуумный датчик представляет собой комбинацию двух типов преобразователей в одном корпусе, низковакуумного и высоковакуумного, что позволяет производить измерения от атмосферы до глубокого вакуума одним прибором. Синхронизация работы всех элементов датчиков осуществляется при помощи микропроцессора, который осуществляет переключение между двумя измерительными преобразователями.

2.1.3. Градуировка вакуумметров

Преобразователи для косвенных измерений давления, показания которых не могут быть рассчитаны с необходимой точностью, градуируются путем сличения их показаний с показаниями абсолютных вакуумметров, имеющих низкую погрешность измерений.

Существует два основных метода градуировки вакуумметров: статический и динамический.

При использовании статического метода градуируемый вакуумметр подсоединяется к вакуумной камере вблизи образцового, и производится сравнение показаний обоих приборов. Вакуумная система должна обеспечивать достижение и сохранение значительно более низкого давления по сравнению с требуемым для проведения измерений, что необходимо для исключения влияния натеканий и сорбционных процессов на поверхностях. Этот метод наиболее целесообразно использовать для вакуумметров с рабочим диапазоном давлений $10\text{--}10^{-3}$ Па.

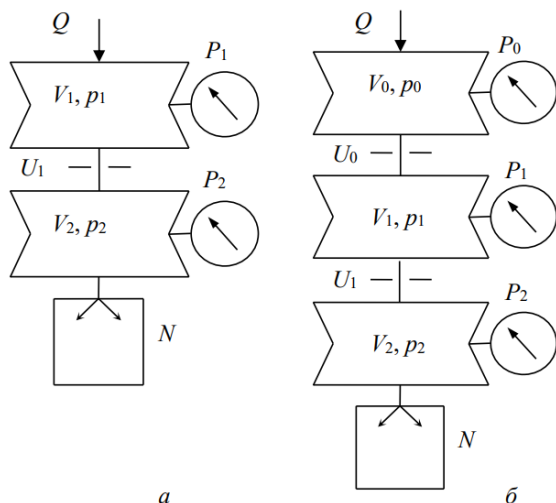


Рис. 2.9. Схемы динамической градуировки вакуумметров по калиброванным проводимостям с двумя (а) и тремя (б) камерами

Более совершенным является динамический метод градуировки вакуумметров (метод потока). Две камеры (рис. 2.9, а) соединяются между собой патрубком (диафрагмой) с известной проводимостью U_1 . Газ из этих камер непрерывно откачивается. В первую камеру, используемую для градуировки вакуумметров, подается известный входной калиброванный поток Q . В этом случае можно записать для условий равновесия и молекулярного режима течения газа:

$$Q = U_1 \cdot (p_1 - p_2) = S_2 p_2,$$

где p_1 и p_2 — давления в первой и во второй камерах; S_2 — эффективная быстрота откачки насосом второй камеры. Давление p_2 должно быть по возможности минимальным, тогда для градуировки получаем $p_1 = Q/U_1$. Недостаток данной схемы заключается в необходимости регистрации потока Q и сложности проведения измерений в условиях сверхвысокого вакуума, когда давление p_2 должно быть ниже на порядок и более по сравнению с минимальным градуируемым давлением.

Другой метод реализуется в трехкамерной динамической системе (рис. 2.9, б) с установленными между камерами калиброванными

проводимостями U_0 и U_1 . Метод основан на измерении перепада давления на проводимости U_0 . Для трехкамерной системы получаем

$$Q = U_0 \cdot (p_0 - p_1) = U_1 \cdot (p_1 - p_2) = S_2 p_2.$$

На практике величина U_0 выбирается настолько малой, что давление p_0 может быть измерено прямыми методами с достаточной точностью. Подбирая такие условия, чтобы $S_2 \gg U_1$, а $U_1 \gg U_0$, можно записать $Q = U_0 p_0 = U_1 p_1 = S_2 p_2$, откуда получаем градуировочное соотношение $p_1 = U_0 \cdot p_0 / U_1$. Для этого метода не нужно измерять величину потока. Кроме того, поскольку давление определяется величиной отношения U_0/U_1 – коэффициент редукции, а проводимости U_0 и U_1 одинаковым образом зависят от температуры и молекулярной массы газа, на параметры откалиброванной системы эти параметры влиять не будут.

Важным условием является сохранение молекулярного режима течения газа через диафрагмы, что необходимо для постоянства значения величины проводимости в процессе измерений.

Для систем высокого вакуума вполне достаточно точности градуировки с погрешностью $\pm 10\%$; градуировку вакуумметров с этой точностью возможно проводить вплоть до 10^{-8} Па. При более низких давлениях приходится применять экстраполяцию градуировочных характеристик или выполнять сравнение по нескольким вакуумметрам. При этом точность градуировки естественно снижается. Кроме того, необходимо учитывать, что чувствительность преобразователей при эксплуатации может изменяться, и достаточно существенно – вплоть до 25% .

В идеальном случае вакуумметры должны градуироваться по каждому газу. Однако в действительности достаточно выполнить градуировку по какому-то одному газу, а затем воспользоваться коэффициентами относительной чувствительности. В случае равенства показаний преобразователя для разных газов выполняется соотношение для давлений и коэффициентов чувствительности K : $K_1 p_1 = K_2 p_2 = \dots = K_i p_i$. Выпускаемые промышленностью приборы проградуированы по сухому воздуху, поэтому все их показания будут выражены в воздушном эквиваленте (или азотном). Если необходимо измерить давление других газов, то нужно учитывать относительную чувствительность преобразователя к i -му газу $C_i = K_v/K_i$, где K_v – коэффициент по воздуху. Тогда давление i -го газа p_i пере-

считывается по показаниям вакуумметра p_v в воздушном эквиваленте: $p_i = p_v C_i$. Значения C_i для различных газов по отношению к воздуху могут отличаться в несколько раз.

2.2. Лабораторная установка № 2

Принципиальная схема лабораторного экспериментального стенда показана на рис. 2.10.

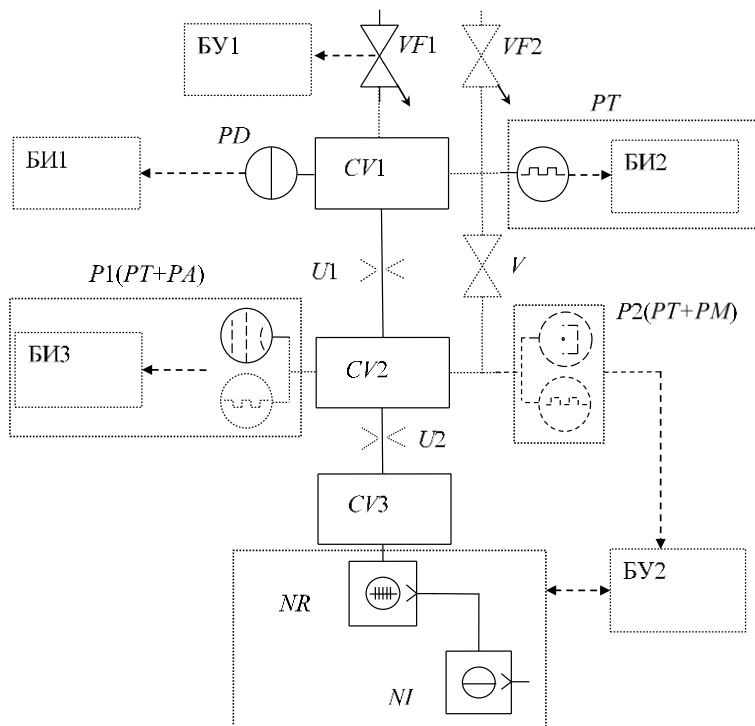


Рис. 2.10. Схема лабораторного экспериментального стенда:

CV – вакуумные камеры; U – разделительные диафрагмы; V – клапан;
 VF – регулируемые натекатели; PD – мембранно-емкостной преобразователь;
 PT – тепловой преобразователь; $P1, P2$ – широкодиапазонные вакуумметры;
 PA – ионизационный преобразователь; PM – магнитный электроразрядный преобразователь;
 $БИ$ – блоки измерения и индикации вакуумных датчиков;
 NR – турбомолекулярный насос; NI – мембранный насос;
 $БУ$ – блоки управления

Откачка установки производится вакуумным постом, состоящим из высоковакуумного ТМН *NR* и механического мембранного насоса *NI*.

Вакуумные камеры лабораторной установки *CV1*, *CV2* оснащены набором измерительных преобразователей разного принципа действия: тепловым преобразователем *PT*, мембранным емкостным преобразователем *PD*, широкодиапазонными вакуумметрами *P1* – с горячим катодом, *P2* – с холодным катодом.

Ограниченная проводимость между вакуумными камерами, создаваемая калиброванными диафрагмами *U1* и *U2* ($U1 \ll U2$), вызывает значительный перепад давлений, что позволяет работать камерам в различных диапазонах вакуума.

Клапан *V* предназначен для высоковакуумной откачки камеры *CV1*, а также выравнивания давления между камерами.

Управляемый натекатель (регулятор расхода газа) *VF1* предназначен для напуска установленного газового потока в вакуумную систему стенда.

Натекатель игольчатый *VF2* нужен для разгерметизации установки и регулировки потока натекания.

Напуск может производиться как из атмосферы, так и из емкости с газом. Для предотвращения ошибочной разгерметизации установки на входе натекателей может быть установлена заглушка.

Откачной пост – модели HiCube 80 Eco [9]. Пост является полностью автоматизированным вакуумным насосным агрегатом. Состоит из ТМН (*NR*), форвакуумного насоса (*NI*), блока питания, блока отображения и управления DCU002 [10] (БУ2).

Турбомолекулярный насос (*NR*) – модели HiPace 80 [11], с воздушным охлаждением. Обеспечивает быстроту откачки 67 л/с, предельное давление $1 \cdot 10^{-5}$ Па. Насос комплектуется контроллером TC110 с интерфейсом RS485.

Мембранный насос (*NI*) – модели MVP015-2 [12], двухкамерный. Имеет быстроту откачки $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ (0,28 л/с), предельное разрежение $3,5 \cdot 10^2$ Па ($6 \cdot 10^2$ Па с газобалластом).

Мембранный емкостной (диафрагменный) датчик (*PD*) – модели КУМ-240 11Т [13]. Датчик измерения абсолютного давления, рабо-

тающий по закону упругой деформации. Диапазон измерения составляет 1330 – 0,133 Па. Датчик с внешним измерительным блоком KGC101 [14].

Тепловой вакуумметр (PT) – модели МТР4D серии MultiTorr [1, 2]. Вакуумметр сопротивления (Пирани) измеряет давление в диапазоне 10^5 – $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

Широкодиапазонный вакуумметр (P1) – модели МТН10D серии MultiTorr [2, 15]. Преобразователь оснащен комбинированным датчиком, состоящим из двух измерительных систем: тепловой (Пирани) *PT* и ионизационной с горячим катодом *PA* (модели Байярда–Альперта). Измеряет давление в диапазоне 10^5 – $5 \cdot 10^{-8}$ Па.

Широкодиапазонный вакуумметр (P2) – модели РКР251 [16]. Преобразователь имеет комбинированный датчик с двумя измерительными системами: тепловой (Пирани) *PT* и электроразрядной с холодным катодом *PM* (инверсно-магнетронного типа). Измеряет давление в диапазоне 10^5 – $5 \cdot 10^{-7}$ Па.

Клапан (V) – модели MAV-HV-KF-25 [8]. Угловой тарельчатый с уплотнением эластомерным кольцом и с ручным приводом.

Регулятор расхода газа (VF1) – модели РРГ-12 [17, 18]. Регулятор предназначен для автоматической регулировки поступающего потока газа, максимальный поток – 0,36 нл/ч (атм·л/ч). Управление и питание РРГ осуществляется от электронного блока БУИП-1 (БУ-1).

Натекатель (VF2) – модели 2701 KF16-0,8 [2]. Ручной механический игольчатого типа.

2.3. Порядок выполнения

2.3.1. Подготовка к выполнению работы

Сопоставить элементы схемы установки (см. рис. 2.10) с соответствующими деталями самой установки.

Изучить технические характеристики вакуумного оборудования лабораторной установки.

Включить общее питание оборудования стенда. Включаются цифровые табло вакуумметров. Включится измерительный блок вакуумметра КУКУ. Время выхода вакуумметров на рабочий режим несколько минут.

Включить лабораторный компьютер.

Включить питание поста откачки тумблером на правой боковой поверхности корпуса поста. После включения производится самостирание узлов поста с отображением хода операции на цифровом дисплее блока управления поста DCU002.

Вакуумный датчик PKR251 подключен к блоку управления DCU002. Для отображения показаний датчика на экране дисплея надо выбрать номер параметра в первой строке – 340 (давление).

Проверить давление в вакуумной системе установки по показаниям вакуумметров.

Установить в системе атмосферное давление при открытом натекателе VF2. Проверить положение натекателя VF2 плавным поворотом регулирующей головки: против часовой стрелки – «Открыто», по часовой стрелке до легкого упора – «Закрыто».

При открытом натекателе VF2 убедиться в равенстве давления по всей системе. При необходимости открыть клапан V вращением рукоятки против часовой стрелки.

При открытом натекателе VF2 проверить калибровку вакуумметров на атмосферное давление. В случае неточных показаний, *по указанию преподавателя*, выполнить дополнительную калибровку.

Перевести **натекатель VF2** в положение «Закрыто».

Закрыть **клапан V** вращением рукоятки по часовой стрелке.

2.3.2. Измерение низкого вакуума, статическая градуировка вакуумметров (задание 1)

В качестве образцового средства измерения в работе используется мембранно-емкостной преобразователь PD модели KYM 240, позволяющий выполнять абсолютные измерения давления с высокой точностью. Он установлен на первой камере CV1 (см. рис. 2.10).

Рядом с PD на той же камере находится тепловой преобразователь PT модели MTP4D. В этом случае процедура градуировки может проводиться статическим методом при сличении показаний вакуумметров.

Подготовиться к регистрации процесса откачки. Запустить программу вакуумных измерений на лабораторном компьютере, проверить подключение и опрос программой вакуумных датчиков. Включить построение временных диаграмм давления.

На первом этапе производится откачка только низковакуумным насосом. Для отключения автоматического запуска ТМН надо на экране дисплея DCU002 выбрать номер параметра в первой строке – 023 (Двигатель ТМН), одновременным нажатием клавиш прокрутки   перейти в режим редактирования и затем задать состояние насоса «Off», подтвердить выбор одновременным нажатием клавиш прокрутки.

Включить работу поста откачки кнопкой «Пуск/Стоп»  на блоке DCU002. Форвакуумный насос начинает работать.

Дождаться выхода давления на квазистационарный уровень, когда давление в камерах практически не меняется в течение нескольких минут. Зафиксировать кривые откачки в камерах *CV1* и *CV2*.

Провести анализ полученных кривых откачки, отметить соотношение достигнутого давления в камерах, определить постоянные времени откачки, сделать оценки быстроты откачки вакуумных камер.

Провести статическую градуировку вакуумметров. Выполнить сравнение показаний теплового преобразователя с образцовым мембранным по нескольким (не менее пяти) точкам в рабочем диапазоне давлений преобразователей.

Изменение давления в вакуумной камере производится очень медленной, плавной регулировкой потока газа через натекаТЕЛЬ *VF2*.

По окончании измерений натекаТЕЛЬ *VF2* закрыть.

Построить сравнительную характеристику показаний вакуумметров.

2.3.3. Измерение высокого вакуума, динамическая градуировка вакуумметров (задание 2)

Камера *CV2* отделена от камеры *CV1* диафрагмой *U1* с малой проводимостью (см. рис. 2.10), чем обеспечивается значительный перепад давления между камерами. Давление в камере *CV2* может находиться в области высокого вакуума, а в камере *CV1* – низкого вакуума.

На камере *CV2* установлены широкодиапазонные вакуумметры двух типов: модели PKR251с магнитным электроразрядным преобразователем *PM* и модели MTH-10D с электронным ионизационным преобразователем *PA*. Оба вакуумметра имеют в составе комбинированные преобразователи, дополненные тепловыми преобразователями *PT*. Градуировка высоковакуумных преобразователей производится динамическим методом, основанным на перепаде давления на диафрагме между камерами при пропускании газового потока через камеры. Коэффициент редукции давления на диафрагме *U1* составляет примерно 10^3 . По показаниям образцового вакуумметра *PD* в камере *CV1* пересчитывается давление в камере *CV2*.

Вакуумный пост включен, работает форвакуумный насос.

Все клапаны закрыты.

Подготовиться к регистрации процесса откачки.

Провести высоковакуумную откачку. Для включения ТМН на экране дисплея DCU002 выбрать номер параметра в первой строке – 023 (ДвигательТМН), одновременным нажатием клавиш прокрутки   перейти в режим редактирования и затем включить состояние насоса «On», подтвердить выбор одновременным нажатием клавиш прокрутки.

После включения ТМН электронный приводной агрегат турбонасоса выполняет самодиагностику для проверки питающего напряжения. Когда самодиагностика успешно завершена, турбонасос начинает работать. На дисплее DCU002 будут отображаться режимы работы системы откачки, показывается скорость вращения турбины ТМН. Время полного разгона насоса и выхода на рабочий режим не должно превышать 2 мин.

При откачке, наблюдая за индикаторами состояния широкодиапазонных вакуумметров, отмечать величину давления, при котором происходят переключения измерений с низковакуумных на высоковакуумные датчики давления.

Дождаться выхода давления на квазистационарный уровень, когда давление в камерах практически не меняется в течение нескольких минут. Зафиксировать кривые откачки в камерах *CV1* и *CV2*.

Провести анализ полученных кривых откачки, отметить соотношение достигнутого давления в камерах, определить постоянные

времени откачки, сделать оценки быстроты откачки вакуумных камер.

Перед началом процедуры градуировки рекомендуется проверить калибровку преобразователя PD по предельному давлению. *Выполняется данная операция по указанию преподавателя.* Для этого открывается клапан V , и производится дополнительная высоковакуумная откачка камеры $CV1$, проверяются показания вакуумметра. Затем клапан V закрывается.

Провести сравнение показаний высоковакуумных преобразователей по нескольким (не менее пяти) точкам в рабочем диапазоне давлений преобразователей.

Регулировка газового потока производится при плавном открытии натекателя $VF2$. Контролировать давление над ТМН, **не допускается превышение верхней границы диапазона 1 Па (10^{-2} мбар).**

По окончании измерений натекатель $VF2$ закрыть.

Рассчитать давление в камере $CV2$ по показаниям датчика PD .

Построить сравнительные характеристики показаний образцового и проверяемых вакуумметров.

2.3.4. Оценка относительного коэффициента чувствительности вакуумметров (задание 3)

Задание выполняется с помощью регулятора массового расхода газа $VF1$ модели РРГ-12 (см. рис. 2.10). Регулятор расхода газа позволяет устанавливать контролируемую заданную величину поступающего газового потока Q . В этом случае вакуумные измерения могут выполняться с большей точностью, например, без учета величины калиброванной проводимости, зависящей от режима течения газа.

Вакуумный пост включен, производится откачка.

Все клапаны закрыты.

Включить клавишей питания блока управления РРГ БУИП-1М, на экране появляется основное окно – окно управления, в нем отображаются «Задание» и «Расход». Некоторое время значения будут меняться. Прогрев блока занимает несколько секунд. Сам РРГ прогревается до полчаса.

Для того чтобы полностью открыть или закрыть РРГ необходимо нажать на кнопки «Вверх» – состояние «Открыт», где в строчке «Расход» будет указано максимальное количество газа, проходящее через регулятор в выбранных единицах, или «Вниз» – тогда РРГ «Закрыт».

Регулировка газового потока, проходящего через РРГ, осуществляется в окне управления БУИП. Величина газового потока отображается в строке «Расход». Изменение потока осуществляется заданием величины управляющего напряжения в строке «Задание». Управляющему напряжению 5 В соответствует максимальный расход 6 мл/мин (0,36 л/ч). Чтобы изменить «Задание», необходимо нажать на центральную кнопку «Меню». На той цифре, которая доступна для изменения, появится моргающий прямоугольник. Нажимая кнопки «Вверх» или «Вниз», установите нужное значение «Задания». Кнопки «Вправо» или «Влево» позволяют перемещаться по разрядам сигнала «Задания». Для подтверждения выбора нажмите еще раз на центральную кнопку «Меню». Выбранное значение запишется в память процессора. Установка заданной величины газового потока через РРГ происходит в течение 20 с.

Провести сравнение показаний вакуумметров в камерах установки при регулировке газового потока через РРГ.

Начинать следует с установки минимального газового потока. Диапазон значений величин «Задания» варьируется от 0 до 5 В.

После установки каждого нового значения величины «Задания» дождаться стабилизации регулируемого газового потока. Контролировать давление над ТМН в камере *CV2*, **не допускается превышение верхней границы диапазона 1 Па (10^{-2} мбар)**.

Зарегистрировать и сравнить показания вакуумметров в камерах *CV1* и *CV2*.

Перевести РРГ в состояние «Закрыт».

Подключить ко входу РРГ объем с пробным газом.

Ввести поправочный коэффициент для пробного газа. Для этого из основного окна клавишами «Вправо» или «Влево» перейти в окно установки коэффициента газа «Красх». Нажмите на центральную кнопку, начнет мигать первая цифра. Используя кнопки «Вверх»

(больше), «Вниз» (меньше) и «Влево», «Вправо» (переход на следующий разряд), установите нужную величину.

Повторить процедуру сравнения показаний вакуумметров при подаче через РРГ потока пробного газа. Рекомендуется устанавливать такие величины потока, чтобы получить те же значения давления по показаниям абсолютного вакуумметра PD .

Сравнить полученные результаты по показаниям вакуумметров для пробного газа с результатами, полученными для воздуха.

Сделать оценку величин относительных коэффициентов чувствительности по пробному газу для разных типов датчиков.

По окончании измерений установить на РРГ нулевой расход газа.

Отсоединить емкость с пробным газом.

2.3.5. Измерение эффективной скорости откачки ТМН (задание 4)

Для экспериментального определения эффективной скорости откачки насосом NR камеры $CV2$ требуется измерить давление в вакуумной камере p_2 , создаваемое известным входящим газовым потоком Q . Тогда можно вычислить эффективную скорость откачки вакуумной камеры: $S = Q/p_2$.

Вакуумные насосы включены, работают.

Все клапаны закрыты.

Входящий газовый поток регулируется с помощью РРГ.

Провести измерения для нескольких значений потока газа (не менее пяти), при которых давление в камере $CV2$ находится в пределах рабочего диапазона ТМН, **не допускается превышение верхней границы диапазона 1 Па (10^{-2} мбар)**.

По окончании измерений установить нулевой расход газа.

Вычислить эффективную скорость откачки.

Рассчитать скорость действия насоса, вычислив проводимость вакуумного тракта перед насосом.

Построить зависимость скорости действия насоса от давления.

Оценить величину производительности насоса.

2.3.6. Выключение установки

Выключение установки выполняется по указанию преподавателя.

Проверить состояние клапанов – закрыты.

Состояние РРГ – нулевой расход газа.

Выключить вакуумный пост откачки кнопкой «Пуск/Стоп» на блоке DCU002. Происходит выключение форвакуумного насоса и начинается процесс остановки ТМН, отображаемый на дисплее DCU.

Дождаться полной остановки ТМН.

Медленным вращением рукоятки натекателя *VF2*, с остановками и контролем давления в камерах, произвести плавный напуск атмосферы.

Питание аппаратуры установки не отключать.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения давления газа являются абсолютными?
2. Какие измерения давления газа являются косвенными?
3. В чем состоит единство вакуумных измерений?
4. Что такое чувствительность вакуумметра?
5. Как регистрируются измерения давления с помощью деформационных вакуумметров?
6. На чем основан принцип действия теплового вакуумметра?
7. Чем определяется рабочий диапазон давлений теплового вакуумметра?
8. В чем заключается принцип действия электронных ионизационных вакуумметров?
9. Чем определяется рабочий диапазон давлений электронных ионизационных вакуумметров?
10. На чем основана работа магнитных электроразрядных вакуумметров?
11. Чем определяется рабочий диапазон давлений магнитных электроразрядных вакуумметров?
12. В чем заключается градуировка вакуумметров?
13. Какие есть методы градуировки вакуумметров?
14. Что такое коэффициент относительной чувствительности?

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО ГАЗА (лабораторная работа 3)

Цель: изучение принципов масс-спектрометрических измерений; освоение методики получения и расшифровки спектра масс остаточного газа; получение навыков работы на вакуумной установке с анализатором парциальных давлений; оценка основных характеристик остаточного газа в вакуумных системах.

3.1. Общие сведения

3.1.1. Состав остаточных газов

Для большинства вакуумных систем необходимо знать не только уровень вакуума, но и его состав, характеризующийся парциальными давлениями, т.е. давлениями определенных компонентов газовой смеси.

Состав остаточных газов определяется как характеристиками вакуумных насосов, так и параметрами вакуумной камеры и происходящих в ней процессов, составом продуктов газовой выделения, герметичностью оболочки и другими факторами (см. прил. 2).

Вакуумные насосы могут обладать селективной способностью откачивать различные газы так, что некоторые из них остаются практически не откачанными. Кроме того, при высоком вакууме выделяющийся из деталей вакуумной системы газ становится основным в составе остаточного газа, заметно отличающегося по составу от атмосферного воздуха. Поэтому диагностика и измерение вакуума являются важными средствами контроля за работой всей вакуумной установки.

Для измерения парциальных давлений в вакуумной технике используются *масс-спектрометрические газоанализаторы (масс-спектрометры)*, предназначенные для разделения ионизированных молекул или атомов газа по их массам. Газоанализаторами остаточных газов служат динамические или статические масс-спектрометры, состоящие из масс-спектрометрического преобразователя и

измерительной системы. Масс-спектрометрический преобразователь устанавливается непосредственно на камере исследуемой вакуумной системы.

Результатом работы масс-спектрометра является спектр пиков ионных токов разных массовых чисел, амплитуда которых будет пропорциональна парциальному давлению данного газа. Обработка таких масс-спектров (расшифровка) позволяет рассчитать парциальные давления остаточных газов, находящихся в вакуумной системе.

3.1.2. Масс-спектрометрия

Основными элементами любого масс-спектрометрического преобразователя являются: ионизатор частиц остаточного газа, сепаратор ионов (анализатор), коллектор ионов и измерительная система (рис. 3.1).

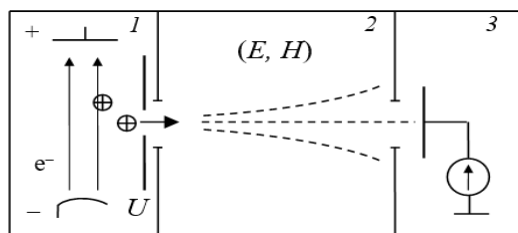


Рис. 3.1. Схема масс-спектрометра: 1 – ионизатор; 2 – анализатор; 3 – коллектор

Образование ионов в масс-спектрометре происходит в источнике ионов 1 путем ионизации газа потоком ускоренных электронов. Далее ионы вытягиваются с помощью соответствующих электростатических полей в анализирующее устройство 2, где они сепарируются под действием электрического и магнитного полей, и затем их потоки поочередно регистрируются в коллекторе ионов 3. Обычно используется одноколлекторная система регистрации ионов, поэтому сканирование масс-спектра по всему диапазону масс осуществляется путем варьирования одного из параметров анализатора, например интенсивности электростатического E или магнитного H поля.

Разделение ионов происходит по характерному для них отношению массы иона m к его заряду q . Отношение m/q называется *массовым числом* M и выражается в атомных единицах массы (а.е.м.).

Здесь заряд иона берется в целых числах элементарного заряда – $q = ne$, а молекулярная масса выражается в атомных единицах массы (1 а.е.м. равняется 1/12 массы атома изотопа углерода ^{12}C). Для однозарядных ионов массовое число совпадает с молекулярной массой иона (в целых числах). Например, для иона H_2^+ – $M = 2$ а.е.м., для иона CO_2^+ – $M = 44$ а.е.м. и т.д.

При разделении по массовым числам масс-спектрометр настраивается так, что на коллектор приходят ионы только одного сорта (массы). Во внешней цепи коллектора при этом возникает ток I_n , пропорциональный парциальному давлению данного рода газа. Изменяя последовательно настройку масс-спектрометра на определенные массовые числа получаем, что на коллектор будут приходить ионы разных газов, образуя во внешней цепи коллектора последовательный ряд пиков ионного тока (рис. 3.2, а), называемый *масс-спектром анализируемого газа*.

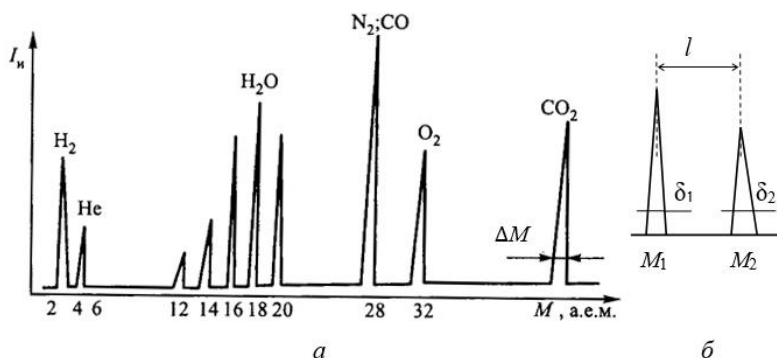


Рис. 3.2. Спектр масс остаточного газа (а) и разрешение пиков (б)

Основными характеристиками масс-спектрометров являются: диапазон анализируемых масс (выраженных в а.е.м.), разрешающая способность, чувствительность.

Под *разрешающей способностью* понимается способность масс-спектрометра раздельно регистрировать близкие по массам ионы, которая определяется отношением массового числа M к наименьшему различаемому прибором изменению массового числа ΔM : $\rho = M / \Delta M$. На этот параметр могут влиять массовое число и отно-

сительные высоты пиков ионов масс-спектра. Существуют аналитические выражения, связывающие разрешающую способность с геометрическими и электрическими параметрами приборов.

Экспериментальную разрешающую способность определяют по участку масс-спектра с близко расположенными массами M_1 и M_2 (рис. 3.2, б). Параметры пиков измеряются на уровне 10 или 50 % высоты, и расчет проводят по формуле

$$\rho = \frac{M}{\Delta M} = \frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2} \cdot \frac{l}{\delta_1 + \delta_2},$$

где $\Delta M = (M_1 - M_2) \cdot (\delta_1 + \delta_2) / 2l$ – ширина пика, а.е.м.; $M = (M_1 + M_2) / 2$ – средняя масса, а.е.м.; δ_1 и δ_2 – ширина пиков на измеряемом уровне высоты; $(\delta_1 + \delta_2) / 2$ – средняя ширина, мм; l – расстояние между пиками, мм.

Максимальная разрешающая способность определяет значение массового числа, при котором могут быть полностью разделены соседние пики. Например, при разрешающей способности прибора 50 могут быть разделены соседние пики масс 50 и 51 или 100 и 102, но массы 100 и 101 уже не могут быть разрешены (пики масс перекрываются).

Чувствительность масс-спектрометра определяется как отношение изменения силы ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциального давления газа и выражается в А/Па. В зависимости от рода газа чувствительность меняется, что важно учитывать для правильной расшифровки масс-спектра. Нижним пределом измеряемых парциальных давлений считается минимальное парциальное давление газа, которое может быть определено при данном отношении «сигнал–шум»; это порог чувствительности прибора. Обычно за начало регистрации принимают сигнал, амплитуда которого вдвое превышает уровень фонового сигнала.

Как правило, при получении сверхвысокого вакуума достаточно измерять парциальные давления, составляющие до 1 % полного давления в системе. Так, если полное давление равно 10^{-6} Па, то порог чувствительности масс-спектрометра должен быть не хуже 10^{-8} Па.

Верхний предел измеряемых давлений связан с отклонением от линейной зависимости между ионным током и соответствующим ему парциальным давлением. С ростом давления происходит падение чувствительности масс-спектрометра вследствие рассеяния ионов в анализаторе, когда средняя длина их свободного пробега λ

становится сравнимой с длиной траектории ионов L в анализаторе. Потери ионного пучка при этом могут быть оценены по формуле $I_{\text{кл}}/I_{\text{ион}} = e^{L/\lambda}$, где $I_{\text{кл}}$ – ток, достигающий коллектора; $I_{\text{ион}}$ – ток, вышедший из ионизатора. Давление, при котором отклонение от линейной зависимости между ионным током и соответствующим ему парциальным давлением превышает 10 %, принимается за максимальное рабочее давление. Обычно масс-спектрометры работают при максимальных давлениях от 10^{-3} до 10^{-2} Па.

3.1.3. Квадрупольный масс-спектрометр

Квадрупольный масс-спектрометр иначе называется электрическим фильтром масс (рис. 3.3). Здесь разделение ионов по массам осуществляется в высокочастотном электрическом поле квадруполя, образуемом четырьмя параллельными стержневыми электродами гиперболического или круглого сечения.

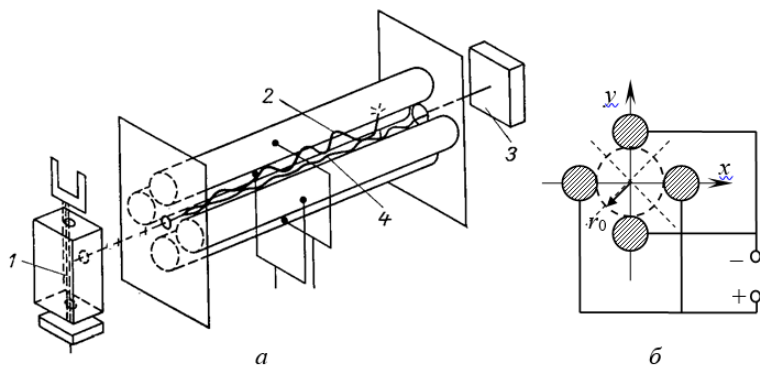


Рис. 3.3. Схема квадрупольного анализатора (а) и подключение электродной системы (б): 1 – ионизатор; 2 – траектория раскачиваемого иона; 3 – коллектор ионов; 4 – траектория устойчивого иона

Газ ионизируется в источнике ионов, далее через диафрагму ионный пучок поступает в анализатор, где ионы перемещаются в пространстве между электродами и под влиянием ВЧ-составляющей электрического поля совершают колебательные движения. Амплитуда колебаний зависит от массового числа иона и напряжения на стержнях квадруполя. При этом до коллектора доходят только ионы

определенной массы – устойчивые ионы. Отфильтрованные в анализаторе ионы дают ток в цепи коллектора ионов, пропорциональный парциальному давлению.

К стержням анализатора, соединенным попарно, прикладываются совместно постоянное U_0 и переменное $U = U_m \cdot \cos(\omega t)$ напряжения. В этих условиях в пространстве между стержнями создается электрическое поле, потенциал которого вблизи от оси системы изменяется по параболическому закону:

$$\varphi(x, y, t) = (U_0 + U_m \cos \omega t) \frac{x^2 - y^2}{2r_0^2},$$

где r_0 – расстояние от оси прибора до стержня.

Уравнения движения ионов в квадрупольном анализаторе имеют вид

$$\begin{aligned} ma_x + 2q(U_0 + U_m \cos \omega t) x/r_0^2 &= 0; \\ ma_x - 2q(U_0 + U_m \cos \omega t) y/r_0^2 &= 0; \\ ma_z &= 0. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения системы следует, что скорость ионов вдоль оси анализатора Z постоянна. Решения уравнений по осям X и Y независимы. В общем случае траектории ионов в соответствии с этими решениями имеют колебательный характер с возрастающей по времени амплитудой. Однако, когда соотношение амплитуд напряжений $U_0/U_m = \gamma$ имеет определенные значения, реализуются условия, при которых ионы одинаковой массы будут совершать устойчивые колебания с ограниченной амплитудой внутри системы электродов и, двигаясь поступательно, достигнут коллектора. Амплитуда колебаний ионов других масс при этом будет нарастать, и рано или поздно они попадут на стержни, не достигнув коллектора.

Расчеты показывают, что при $\gamma > \gamma_{\max}$, где $\gamma_{\max} = 0,168$, ионы всех масс имеют неустойчивые траектории. При $\gamma = \gamma_{\max}$ условиям устойчивости удовлетворяет лишь одно значение массы и $\rho \rightarrow \infty$ (см. ниже), однако в этом случае чувствительность близка к нулю. Поэтому на практике выбираются значения $\gamma \leq \gamma_{\max}$. Когда $\gamma \sim \gamma_{\max}$, массовое число ионов, проходящих через квадруполь-анализатор, определяется формулой

$$M = \frac{m}{q} = \frac{aU_m}{r_0^2 \omega^2},$$

где a – постоянная.

Развертку спектра масс можно осуществлять изменением частоты и амплитуды переменного напряжения U_m на электродах. При этом соотношение γ должно оставаться неизменным.

Разрешающая способность анализатора также зависит от отношения напряжений γ :

$$\rho = \frac{M}{\Delta M} = \frac{b}{1 - \gamma/\gamma_{\max}},$$

где b – постоянная. Следовательно, максимальное значение разрешающей способности достигается при $\gamma \sim \gamma_{\max}$. Кроме того, разрешающая способность еще зависит и от длины стержневых электродов, улучшаясь с увеличением длины стержней.

К достоинствам квадрупольного масс-анализатора следует отнести наличие линейной шкалы масс с равномерным разрешением пиков через $\Delta M = 1$.

Так как амплитуда колебаний ионов в анализаторе не зависит от скорости в направлении оси z , начальная скорость ионов не важна. Единственный критерий, предъявляемый к скорости иона, заключается в том, что ионы должны успевать совершить несколько колебаний до того, как они попадут на коллектор. Иначе при превышении определенного значения начальной скорости ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, не будут успевать уходить на электроды анализатора. Таким образом, в квадрупольном анализаторе могут быть использованы простые ионные источники с холодным катодом, что позволяет повышать верхний уровень рабочих давлений до 10^{-1} Па. Ограничение по верхнему давлению связано только с рассеянием ионов на молекулах газа и нарушением линейности характеристик.

Квадрупольные масс-спектрометры работают в диапазоне массовых чисел от 1 до 500 (1000) а.е.м. при разрешающей способности до 500. Частота переменного напряжения около 3 МГц. Чувствительность находится на уровне 10^{-5} (до 10^{-2}) А/Па, минимальное регистрируемое давление 10^{-9} Па. Эти приборы достаточно компактны, допускают прогрев. Применение на выходе анализатора вторично-электронного умножителя расширяет границу измерений до 10^{-12} Па.

3.1.4. Расшифровка масс-спектров остаточных газов

Цель расшифровки спектра масс состоит в определении состава исследуемой газовой смеси и парциальных давлений каждого газа.

Достоверность информации, получаемой с помощью масс-спектрометра остаточного газа, зависит от правильности его градуировки. Ионизация молекул газа может приводить к образованию одно- и многозарядных, а также осколочных ионов. Например, при электронной ионизации диоксида углерода CO_2 образуются в основном ионы CO_2^+ , CO^+ , CO_2^{++} , O^+ и C^+ с массами, равными 44, 28, 22, 16 и 12 соответственно, и, в небольших количествах, ионы изотопов. При этом для заданной энергии ионизирующих электронов относительное содержание различных ионов для любого газа практически неизменно. Таким образом, на индивидуальном масс-спектре любого газа к основному пику, представляющему главную линию спектра этого газа, добавляется целый ряд сопутствующих пиков – так называемые фрагментарные пики. Вообще говоря, присутствие этих пиков и их интенсивность (амплитуда) зависят от энергии пучка электронов, температуры газа и разрешающей способности прибора, но не зависят от общего давления. Поэтому масс-спектры одних и тех же газов, полученные с помощью приборов разного типа, могут значительно различаться по величине фрагментарных пиков. Приборы же одного типа в одинаковых условиях будут давать практически идентичные масс-спектры.

Фрагментарные пики, присутствующие в индивидуальных масс-спектрах большинства газов, изучались с помощью различных масс-спектрометров. Обычно высота (интенсивность) основного пика принимается за 100 % (или равной 1), а высоты остальных определяются относительно этого пика. Процедуры градуировки аналогичны применяемым для вакуумметров полного давления. При калибровке анализаторов статическим методом по эталонному газу пробу i -го газа вводят в объем, к которому подсоединены анализатор и вакуумметрический преобразователь, по которому определяют давление газа. Настраивают анализатор на основной пик (главную линию) спектра этого компонента и по его величине определяют чувствительность прибора. Также находят отношение интенсивностей всех (фрагментарных) линий спектра данного газа. Результаты калибровки сводят в таблицы, в которых приведены относительные

амплитуды сопутствующих пиков в индивидуальных масс-спектрах: $\beta = U_c/U_o$, где U_o – амплитуды основных пиков; U_c – амплитуды сопутствующих пиков (рис. 3.4).

М (а.м.а)	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	CO	O ₂	Ar	CO ₂
1	3	16,5	2,4					
2	100							
12		3,0			6,3			9,7
13		7,8						
14		16,0		14	0,8			
15		85,0						
16		100	1,8		2,8	18		16,0
17		1,2	26					
18			100					
20							22,6	
22								2,1
28				100	100			13,0
29				0,7	1,2			
32						100		
34						0,4		
36							0,34	
38							0,06	
40							100	
44								100
45								1,2

Рис. 3.4. Пример индивидуальных масс-спектров газов

В реальных условиях градуировку проводят по одному или двум газам, а затем рассчитывают характеристики по остальным газам, определяют коэффициенты относительной чувствительности по разным газам. Зная эти данные, можно анализировать получаемые масс-спектры.

Например, если в системе присутствует смесь газов N₂ и CO₂, то оба этих газа будут вносить свой вклад в пик массы 28 (см. рис. 3.4). Однако, измеряя высоту пика 44, которая соответствует исключительно CO₂, можно оценить вклад иона CO₂⁺ в пик массы 28 и, следовательно, определить относительную высоту пика N₂⁺ массы 28. Таким образом, величины фрагментарных пиков позволяют идентифицировать качественный состав остаточного газа и определить высоты каждого пика.

3.1.5. Определение парциальных давлений

Для нахождения реальных парциальных давлений каждой газовой составляющей требуется знание чувствительности прибора по отношению к этим газам. Калибровка анализатора остаточных газов включает определение относительных величин фрагментарных пиков и чувствительности для всех газов, которые могут присутствовать в системе. Для определения разрешающей способности, чувствительности и других характеристик приборов используется основная пик.

Определение парциальных давлений при расшифровке масс-спектров состоит в решении системы линейных уравнений, составленных в предположении, что масс-спектр смеси получен наложением масс-спектров отдельных компонентов:

$$U_x = \sum_{i=1}^n U_{xi} = \sum_{i=1}^n K_{xi} \cdot p_i,$$

где U_x – амплитуда пика в масс-спектре газовой смеси, соответствующего массовому числу x ; U_{xi} – амплитуда пика, соответствующего массовому числу x , в масс-спектре i -го газа; p_i – парциальное давление i -го газа; n – число компонентов в смеси газов; K_{xi} – коэффициент чувствительности масс-спектрометра по i -му газу для массового числа x : $K_{xi} = \beta_{xi} \cdot K_i$, где K_i – коэффициент чувствительности масс-спектрометра по основному пику i -го газа; β_{xi} – относительная интенсивность пика, соответствующего массовому числу x , в масс-спектре i -го газа.

В расчетах удобно пользоваться коэффициентом относительной чувствительности масс-спектрометра по разным газам $C_i = K_i/K_0$, где K_0 – коэффициент чувствительности по основному пику опорного газа (обычно азота).

Подставив в уравнение U_x выражение для K_{xi} , получим

$$U_x = K_0 \sum_{i=1}^n C_i \cdot p_i \cdot \beta_{xi}.$$

Система уравнений не имеет решений для случая $i > x$, т.е. когда число газов в смеси превышает число пиков в спектре; имеет един-

ственное решение при $i = x$ и несколько решений при $i < x$. Последний случай наиболее часто встречается на практике, что приводит к некоторой неопределенности в получаемых результатах.

Для решения системы уравнений необходимо знать величины коэффициента чувствительности масс-спектрометра по опорному газу K_0 и коэффициентов чувствительности по всем газам смеси K_i . Этот метод определения парциальных давлений наиболее точен. Он позволяет выполнять прямые измерения, не используя вакуумметры для измерения полных давлений, которые в свою очередь вносят неопределенность в измерения.

Иногда выполняют несколько упрощенную процедуру, заключающуюся в одновременном измерении полного давления в азотном эквиваленте и снятии масс-спектра. В этом случае измеряется неабсолютным вакуумметром (ионизационным) полное давление в азотном эквиваленте p_0 . Парциальное давление k -го газа находится из уравнения

$$p_k = p_0 \frac{U_k}{C_k \sum_{i=1}^n U_i \cdot \varphi_i / C_i},$$

где U_i – амплитуда основных пиков i -х газов; φ_i – коэффициент относительной чувствительности вакуумметра по i -му газу.

3.2. Лабораторная установка № 3

Схема лабораторного экспериментального стенда показана на рис. 3.5.

Вакуумная камера стенда CV откачивается высоковакуумным откачным постом, состоящим из высоковакуумного ТМН NR и вспомогательного механического мембранного NI насосов.

На самой камере установлен масс-спектрометрический преобразователь S , предназначенный для анализа состава остаточного газа в камере. Контроль полного давления производится с помощью широкодиапазонного вакуумметра, состоящего из теплового преобразователя Пирани PT и ионизационного инверсно-магнетронного преобразователя PM .

Через клапан V к установке можно подключать внешние вакуумные объекты для проведения анализа состава вакуумной среды.

Натекатель VF предназначен для напуска калибровочных газов или атмосферы.

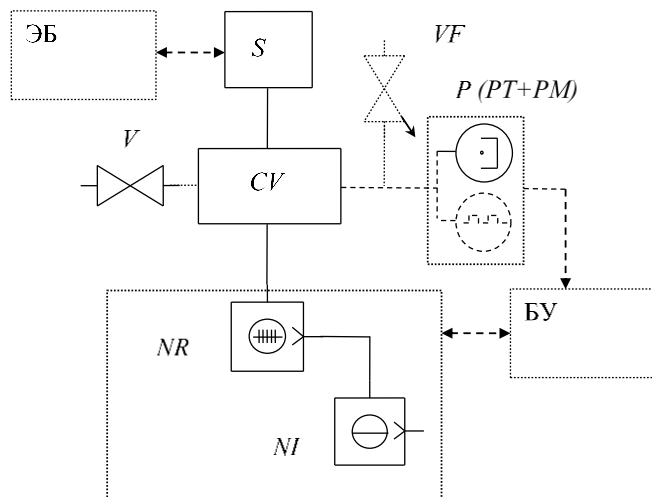


Рис. 3.5. Схема лабораторного экспериментального стенда:

CV – вакуумная камера; V – клапан; VF – натекатель; P – широкодиапазонный вакуумметр; PT – тепловой преобразователь; PM – магниторазрядный преобразователь; S – масс-спектрометрический преобразователь; ЭБ – электронный блок управления масс-спектрометра; NR – турбомолекулярный насос; NI – мембранный насос; БУ – блок управления вакуумного поста

Откачной пост – модели HiCube 80 Eco [9]. Пост является полностью автоматизированным вакуумным насосным агрегатом, состоит из ТМН (NR), форвакуумного насоса (NI), блока питания, блока отображения и управления DCU002 [10] (БУ).

Турбомолекулярный насос (NR) – модели HiPase 80 [11], с воздушным охлаждением. Обеспечивает быстроту откачки 67 л/с по воздуху и 48 л/с по водороду, предельное давление $1 \cdot 10^{-5}$ Па. Насос комплектуется контроллером TC110 с интерфейсом RS485.

Мембранный насос (NI) – модели MVP 015-4 [12], четырехкамерный. Имеет быстроту откачки $0,75 \text{ м}^3/\text{ч}$, создаваемое предельное разрежение 50 Па. Имеется коммуникационный интерфейс RS485.

Широкодиапазонный вакуумметр (P) – модели PKR251 [16]. Имеет комбинированный датчик с двумя измерительными систе-

мами: тепловой (Пирани) *PT* и электроразрядной с холодным катодом *PM* (инверсно-магнетронного типа). Измеряет давление в диапазоне $10^5 - 5 \cdot 10^{-7}$ Па.

Масс-спектрометр квадрупольный (*S*) – модели SRS RGA200 [19]. Состоит из квадрупольного зонда и электронного блока управления (ЭБ). Диапазон анализируемых масс от 1 до 200 а.е.м. Рабочее давление от сверхвысокого вакуума до 10^{-2} Па. Минимальное определяемое парциальное давление $5 \cdot 10^{-9}$ Па (цилиндр Фарадея).

Клапан (*V*) – модели MAV-HV-KF-25 [2, 8]. Угловой тарельчатый с уплотнением эластомерным кольцом и с ручным приводом.

Натекатель (*VF*) – модели 2701 KF16-0,8 [2]. Ручной механический игольчатого типа.

3.3. Порядок выполнения

Меры предосторожности

Запрещено включать нить накала катода RGA, если рабочее давление превышает 10^{-2} Па – это приведет к перегоранию нити катода и выходу прибора из строя.

Запрещено открывать натекатель при включенном накале катода RGA, что может привести к перегоранию нити катода.

Запрещено выключать пост откачки, останавливать ТМН при включенном накале катода RGA, так как рост давления в системе приведет к перегоранию нити накала катода.

3.3.1. Подготовка к выполнению работы

Сопоставить элементы схемы установки (см. рис. 3.5) с соответствующими деталями самой установки.

Изучить технические характеристики вакуумного оборудования лабораторной установки.

Включить общее питание оборудования стенда.

Включить лабораторный компьютер.

Клапан V в закрытом положении, рукоятка вправо до упора.

Включить питание поста откачки тумблером на правой боковой поверхности корпуса поста. После включения производится самотестирование узлов поста с отображением хода операции на цифровом

дисплее блока управления поста DCU002. На дисплее будут отображаться функции узлов поста откачки.

Вакуумный датчик PKR251 подключен к блоку управления DCU002. Для отображения показаний датчика на экране дисплея надо выбрать номер параметра в первой строке – 340 (давление). Проверить показания вакуумметра.

Установить в системе атмосферное давление при открытом натекателе. Проверить состояние натекателя *VF* плавным поворотом регулирующей головки: против часовой стрелки – «Открыто», по часовой стрелке до легкого упора – «Закрыто».

Перевести **натекатель *VF* в положение «Закрыто».**

3.3.2. Откачка установки (задание 1)

Состояние клапанов – закрыты.

Подготовиться к регистрации экспериментального графика откачки, отмечая значения давления в фиксированные моменты времени.

Включить насосную установку кнопкой «Пуск/Стоп»  на блоке DCU002.

После включения электронный приводной агрегат турбонасоса выполняет самодиагностику для проверки питающего напряжения. Когда самодиагностика успешно завершена, турбонасос и форвакуумный насос начинают работать. На дисплее DCU002 отображаются режимы работы системы откачки, показывается скорость вращения турбины ТМН. Время полного разгона насоса и выхода на рабочий режим не должно превышать 2 мин.

Наблюдать за снижением давления в камере установки. Дождаться выхода на квазистационарный уровень, когда давление практически не меняется в течение нескольких минут. Отметить достигнутое давление в камере.

Провести анализ полученной кривой откачки, определить постоянные времени откачки, сделать оценку быстроты откачки вакуумной камеры, уровня газовой нагрузки камеры.

3.3.3. Получение масс-спектра остаточного газа (задание 2)

Подготовка масс-спектрометра к работе

Включите масс-спектрометр путем включения внешнего источника питания 24 В.

При подаче питания на ЭБ программная прошивка автоматически проверяет уровень внешнего напряжения и включает зеленый светодиодный индикатор «Power», если напряжение находится в допустимом диапазоне 24 $\pm$ 2 В постоянного тока. Теперь масс-спектрометр готов к работе с компьютером.

1. Запустите программное обеспечение масс-спектрометра RGA [20]: дважды щелкните по значку RGA  или выберите программу прямо из панели задач.

2. Подключитесь к масс-спектрометру:

- нажмите на кнопку «Настройка RS232»  на панели инструментов или выберите «Настройка списка разъемов» из главного меню;

- найдите порт, к которому подключен RGA в колонке «Разъем», и выберите его;

- нажмите на кнопку «Подключить»;

- соединение будет выполнено, когда в колонке состояния появится надпись «Connected» («Подключено»), а кнопка «Go»  на панели инструментов загорится зеленым цветом.

3. Закройте список разъемов по завершении соединения.

4. Убедитесь, что полученное давление ниже указанного предельного значения: **Максимальное рабочее давление RGA составляет 10^{-2} Па**. Включите нить накала:

- нажмите кнопку «Нить накала» на панели инструментов .

- для разогрева нити накала требуется несколько секунд, в течение которых активируется небольшое информационное диалоговое окно. Кнопка «Нить накала» остается выделенной до тех пор, пока нить накала включена и испускает электроны;

- нагрев нити накала можно включить/выключить в любое время, нажав на кнопку «Нить накала». Зеленый светодиодный индикатор состояния на задней панели блока ЭБ постоянно отображает состояние нити накала (испускает ли нить электроны).

Выполнение аналогового сканирования

Аналоговый режим – это режим спектрального анализа, общий для всех анализаторов остаточных газов. Ось *X* представляет собой диапазон масс, отображаемый в меню «Параметры массы». Ось *Y* представляет амплитуды ионного тока каждого измеренного приращения массы. По умолчанию RGA запускается в аналоговом режиме отображения. Диапазон сканирования по умолчанию составляет от 1 до 50 а.е.м.

- Выберите «Начать» из меню «Сканирование» или просто нажмите на кнопку «Go» на панели инструментов, чтобы запустить аналоговое сканирование.

- После небольшой задержки данные аналогового сканирования начинают отображаться на экране.

Интерпретация масс-спектра остаточного газа

Тщательная и полная интерпретация спектра (т.е. полный спектральный анализ) должна выявить идентичность, а также концентрации различных компонентов, которые составили спектр.

Первым шагом в процессе спектрального анализа является идентификация соотношения массы к заряду пиков в массовом спектре.

После маркировки пиков следующим шагом является идентификация остаточных газов, образовавших спектр. Знакомство со стандартными спектрами обычно ожидаемых газов, как правило, поможет определить основные и второстепенные компоненты в системе. Практически каждая вакуумная система будет иметь обнаруживаемые количества водорода (2 а.е.м.), воды (18 а.е.м.), окиси углерода (28 а.е.м.) и диоксида углерода (44 а.е.м.).

Идентифицировать массовые числа и соответствующие им пики полученного спектра в результате сканирования.

Парциальное давление

Основополагающим допущением при использовании коэффициентов чувствительности в количественных расчетах является наличие линейной зависимости между парциальным давлением и соответствующими RGA-сигналами газов.

ПО RGA использует два вида коэффициентов чувствительности, хранящихся в энергонезависимой памяти RGA. Коэффициенты чувствительности, один для полного давления и один для парциального давления, используются в качестве коэффициентов пересчета между ионными токами, полученными в анализаторе, и единицами давления, выбранными пользователем.

Определить величины коэффициентов для разных газов в меню анализатора.

Сделать приближенную оценку парциальных давлений основных газов.

3.3.4. Анализ масс-спектра (задание 3)

Аналитическая программа RGA использует алгоритм множественной линейной регрессии для автоматического вычисления состава «типичной остаточной газовой среды» в конце любого спектрального сканирования в диапазоне 1–50 а.е.м.

Процедура анализа с помощью ПО RGA:

1. Убедитесь, что RGA находится в аналоговом режиме.
2. Выберите команду «Настройки анализа» в меню «Утилиты», чтобы получить доступ к окну отображения выбора газа, а также выбрать или отменить выбор газов из библиотеки для анализа.
3. Выберите команду «Анализ» в меню «Утилиты» или нажмите кнопку «Анализ» на панели инструментов, чтобы активировать функцию анализа.
4. Чтобы открыть диалоговое окно «Анализ спектра», выберите команду «Окно анализа» в разделе «Утилиты».
5. Нажмите кнопку «Настройка», если нужно изменить выбор газа или единицы анализа.
6. Выберите команду «Пуск» в меню «Сканирование» (если сканирование еще не выполнено), чтобы начать сканирование.
7. Когда сканирование будет завершено (достигнута стоп-масса), результаты анализа отобразятся в диалоговом окне «Спектральный анализ». Анализ будет повторяться каждый раз, когда сканирование достигнет стоп-массы.

Зафиксируйте полученные данные.

Проанализируйте полученный результат анализа масс-спектра, сделайте заключение о составе остаточного газа.

3.3.5. Выключение установки

Выключение установки выполняется по указанию преподавателя.

Выключение анализатора

Остановите сканирование, если оно выполняется, с помощью команды «Остановить сейчас» в меню «Сканирование» или нажмите кнопку быстрого доступа (кнопка со знаком «Стоп»).

Выключите нить накала, сняв флажок с команды «Нить накала» в меню «Устройство» или нажав кнопку быстрого доступа (кнопка с изображением нити).

Завершите работу программы RGA, используя команду «Выход» в меню «Файл».

Выключить питание анализатора на источнике питания.

Выключение вакуумной системы

Проверить состояние клапанов – они должны быть закрыты.

Выключите вакуумный пост откачки кнопкой «Пуск/Стоп» на блоке DCU002. Произойдёт выключение форвакуумного насоса, и начнется процесс остановки ТМН, отображаемый на дисплее DCU.

Дождитесь полной остановки ТМН.

Медленным вращением рукоятки натекателя VF , с остановками и контролем давления в камере, произведите плавный напуск атмосферы.

Питание аппаратуры установки не отключать.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется состав остаточного газа в вакуумной камере?
2. На чем основывается принцип работы вакуумного газоанализатора?
3. Что такое массовое число?
4. Из каких функциональных блоков состоит масс-спектрометр?
5. Что такое разрешающая способность масс-спектрометра?
6. Что такое чувствительность масс-спектрометра?

7. Чем определяются пределы измеряемых давлений масс-спектрометра?
8. Как устроен и работает квадрупольный масс-спектрометр?
9. Какой ионный источник используется в квадрупольном масс-спектрометре?
10. Назовите основные параметры квадрупольного масс-спектрометра.
11. В чем заключается расшифровка масс-спектра остаточного газа?
12. Что такое фрагментарные пики?
13. Назовите наиболее характерные массовые числа для спектра остаточного газа.
14. Как по масс-спектру рассчитываются парциальные давления?

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНИКИ ТЕЧЕИСКАНИЯ

(лабораторная работа 4)

Цель: ознакомление с понятием герметичности вакуумных систем; изучение способов и техники течеискания в вакуумных системах; освоение методики работы с гелиевым течеискателем на базе магнитного масс-спектрометра.

4.1. Общие сведения

4.1.1. Герметичность вакуумной системы и течеискание

Герметичность вакуумной системы – свойство всей системы или ее элементов и их соединений, исключающее проникновение через них газообразных (или жидких) веществ.

Достижение предельного остаточного давления в вакуумных системах в значительной степени зависит от степени их герметичности. Герметичная вакуумная система должна обеспечить настолько малое проникновение газа (натекание), чтобы им можно было пренебречь в рабочих условиях. Очевидно, что при этом должно выполняться следующее соотношение:

$$p_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{гв}} + Q_{\text{т}}}{S_{\text{эф}}} < p_{\text{р}},$$

где $p_{\text{пр}}$ – предельное остаточное давление в системе, Па; $S_{\text{эф}}$ – эффективная быстрота откачки насоса при предельном давлении, м³/с; $Q_{\text{гв}}$ – суммарный поток газовыделения, Па·м³/с; $Q_{\text{т}}$ – суммарный поток натекания через все течи, Па·м³/с; $p_{\text{р}}$ – заданное (требуемое) рабочее давление в системе, Па. Тогда допустимый газовый поток натекания, в случае хорошо обезгаженной системы ($Q_{\text{гв}} \ll Q_{\text{т}}$), будет определяться как $Q_{\text{т}} \leq 0,1 p_{\text{р}} \cdot S_{\text{эф}}$. Для эффективного использования средств откачки должно выполняться $p_{\text{пр}} \geq 0,1 p_{\text{р}}$.

В реальных случаях поток газовыделения ненамного меньше суммарного потока натекания через течи. Вообще говоря, требования по величинам потоков натекания и газовыделения должны быть

единицами, но удовлетворять им можно в определенной последовательности. Наличие течей и величина потока натекания определяют пригодность системы для дальнейшего использования и поэтому должны контролироваться непосредственно при сборке системы или после каждой ее разгерметизации. В то же время уменьшение потока газовыделения можно проводить и позднее, путем вакуумной температурной тренировки системы.

Абсолютно герметичных вакуумных систем не бывает. Таким образом, задача состоит в том, чтобы добиться минимального суммарного потока натекания. Природа течей может быть самой разной: трещины и поры в стенках камер, неплотности во фланцевых соединениях, сварных швах и т.п. В сверхвысоковакуумных системах поиск течей затруднен вследствие малых величин потоков натекания.

Техника течеискания – область техники, направленная на выявление нарушений герметичности, связанных с наличием течей. Применение техники течеискания необходимо при работе с любой вакуумной системой. Течеискание может быть выполнено разными способами. Наиболее распространенным и эффективным является применение вакуумных гелиевых течеискателей, в которых реализован масс-спектрометрический способ течеискания.

Собственно *течеисканием* называется процесс обнаружения течей. Экспериментальное определение величины суммарного потока натекания может быть проведено методом постоянного объема при отключении насосов от вакуумной системы (метод накопления). При этом в системе наблюдается рост давления, вызванный входящими потоками натекания и газовыделения (рис. 4.1).

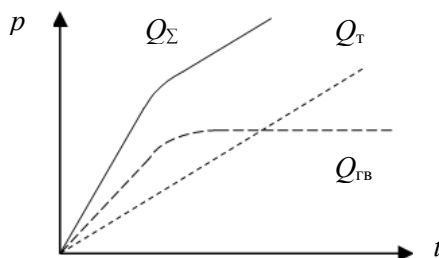


Рис. 4.1. Динамика роста давления в изолированной вакуумной системе, связанного с различными источниками газа: $Q_{ГВ}$ – газовыделение; Q_t – натекание; Q_{Σ} – суммарный поток

Анализ полученной зависимости $p(t)$ позволяет не только установить наличие газовыделения и натекания (нелинейная и линейная части зависимости), но и оценить их величины. Суммарный поток газовой нагрузки определяется углом наклона касательной, проведенной к зависимости давления от времени в момент отключения насосов от вакуумной системы.

Для определения потока натекания необходимо: установить момент времени t , в который начинается близкое к линейному изменение давления в системе (при этом устанавливается равновесный поток газовыделения, и дальнейшее повышение давления в системе происходит только вследствие натекания); измерить давление p_1 , через интервал времени Δt измерить давление p_2 . Поток натекания Q_T в этом случае определяется по выражению $Q_T = V \cdot \Delta p / \Delta t$, где V – объем вакуумной системы (камеры); $\Delta p = p_2 - p_1$.

Для определения места течей разработано несколько методов течеискания. Наиболее широкое распространение получил метод пробного газа. После получения вакуума в испытуемом объеме место, проверяемое на наличие течи, обдувается пробным газом, который вместо воздуха начинает поступать в этот объем. Изменение состава остаточных газов в вакуумной системе можно зарегистрировать с помощью вакуумметра, показания которого зависят от рода газа, или настроенного на пробный газ масс-спектрометра. Для предотвращения избыточного повышения давления проверяемый объект должен находиться под непрерывной откачкой.

В откачиваемой системе с негерметичной оболочкой разность показаний вакуумметра при измерении давлений пробного газа и воздуха

$$\Delta \alpha = \alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{п}}}{K_{\text{п}} S_{\text{п}}} - \frac{Q_{\text{в}}}{K_{\text{в}} S_{\text{в}}} = \frac{Q_{\text{в}}}{K_{\text{в}} S_{\text{в}}} \left(R \frac{Q_{\text{п}} S_{\text{в}}}{Q_{\text{в}} S_{\text{п}}} - 1 \right),$$

где $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{п}}$ – показания вакуумметра по воздуху и пробному газу; $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{п}}$ – потоки воздуха и пробного газа; $S_{\text{в}}$ и $S_{\text{п}}$ – быстрота откачки объема по воздуху и пробному газу; $K_{\text{в}}$ и $K_{\text{п}}$ – чувствительности вакуумметра по воздуху и пробному газу; R – относительная чувствительность к пробному газу. Например, при определении герметичности вакуумной системы, откачиваемой пароструйным насосом,

замещение воздуха на аргон или гелий вызывает 50 %-е увеличение показаний ионизационного манометра.

При использовании масс-спектрометра для регистрации пробного газа учитывается разность показаний от пробного газа и фоновых сигнала, определяемого парциальным давлением пробного газа в воздухе $\Delta\alpha = \alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{ф}}$. Разность показаний будет равна

$$\Delta\alpha = (Q_{\text{п}} - Q_{\text{ф}})/K_{\text{п}}S_{\text{п}},$$

где $Q_{\text{ф}}$ – фоновый поток пробного газа, содержащегося в атмосферном воздухе. Масс-спектрометрический метод обладает самой высокой чувствительностью. Уменьшение быстроты откачки системы $S_{\text{п}}$ позволяет повысить чувствительность метода течеискания. Минимальные течи, которые можно обнаружить масс-спектрометром, равны $10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Однако возможности такого способа течеискания ограничены. В первую очередь это связано с необходимостью получения в системе вакуума, достаточного для нормальной работы масс-спектрометра ($< 10^{-2} \text{ Па}$), что не всегда возможно при начальной сборке системы. Кроме того, данный способ не позволяет осуществлять проверку форвакуумной части системы.

С другой стороны, требования высокой разрешающей способности и высокой чувствительности для всех масс-спектрометров противоречат друг другу. Для измерения малых потоков натекания необходимо иметь высокую чувствительность масс-спектрометра и, следовательно, пониженную разрешающую способность.

4.1.2. Гелиевые течеискатели

Масс-спектрометрический метод успешно применяется в случае подключения к проверяемым вакуумным системам специальных устройств для обнаружения течей – течеискателей. Течеискатели, в систему регистрации пробного газа которых включены масс-спектрометры, называются масс-спектрометрическими. В их составе присутствует собственная автономная система откачки для обеспечения рабочих условий в масс-спектрометрической камере.

Основным пробным газом, применяемым при работе с масс-спектрометрическими течеискателями, является гелий, малая молеку-

лярная масса и низкая сорбционная способность которого обеспечивают хорошее проникновение через малые течи, а инертность делает безопасным в применении. Гелий в весьма малых количествах содержится в атмосферном воздухе и продуктах газовой выделения, так что фоновый сигнал небольшой. Массовое число иона гелия равно 4 а.е.м. и относительно сильно отличается от ближайших к нему соседних массовых чисел (пиков) в спектре (водород H_3^+ , углерод C_{12}^{++}). Это позволяет значительно снизить разрешающую способность масс-спектрометра.

В течеискателях обычно используются масс-спектрометры с магнитным отклонением, в которых ускоренные ионы с разными массовыми числами под действием магнитного поля движутся по различным круговым траекториям. Магнитный масс-спектрометр для регистрации ионов гелия прост, малогабаритен и может быть сделан с большой чувствительностью.

Масс-спектрометрическая камера содержит ионный источник и приемник ионов (рис. 4.2, а). Камера помещается между полюсами постоянного магнита.

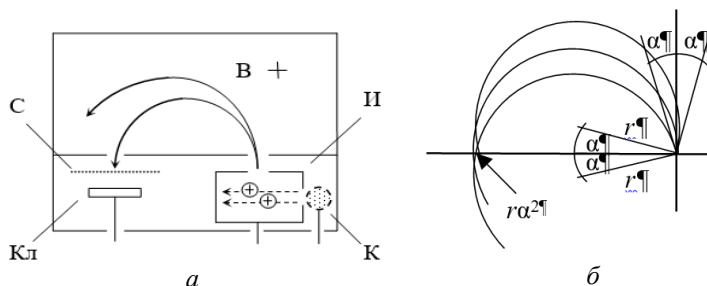


Рис. 4.2. Схемы: а) масс-спектрометрической камеры течеискателя (К – термокатод; И – ионизатор; Кл – коллектор ионов; С – супрессорная сетка); б) фокусировки ионов магнитным полем

Накаленный вольфрамовый катод ионного источника эмитирует электроны, которые ускоряются в электрическом поле между катодом и корпусом ионизатора. В камере ионизатора электроны сталкиваются с молекулами газа, поступающего в течеискатель из проверяемого объема, и вызывают их ионизацию.

Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры ионизации ускоряющим электрическим полем, действующим в направлении, перпендикулярном электронному пучку. Величина ускоряющего напряжения U , приложенного между камерой ионизатора И (см. рис. 4.2, a) и выходной диафрагмой анализатора, определяет энергию и соответственно скорость ионов: $(mv^2/2) = qU$, где q – заряд; m – масса и v – скорость иона. Поток ионов через выходную диафрагму поступает в анализатор.

В анализаторе (область масс-спектрометрической камеры, в которой ионы движутся от источника к коллектору ионов) ионы пересекают область однородного магнитного поля индукции B перпендикулярно направлению поля. На них начинает действовать сила Лоренца $F = qvB$, вынуждающая ионы двигаться по круговой орбите, радиус которой r может быть определен из уравнения $(mv^2/r) = qvB$. С учетом выражения для энергии иона получаем

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}.$$

При постоянных значениях B и U радиус траектории зависит от массового числа иона $M = m/q$. Таким образом, в магнитном поле происходит разделение ионного пучка по массовым числам на ряд отдельных лучей.

Варьируя радиус траектории иона за счет изменения ускоряющего напряжения U , можно создавать условия для поочередного попадания на коллектор потоков ионов с различными массовыми числами. Так осуществляется сканирование спектра. Величина U , необходимая для фокусировки ионов в выходную щель, уменьшается с увеличением массы иона, при этом тепловые скорости ионов должны быть малы по сравнению с приобретенной скоростью. Средняя величина ускоряющего потенциала составляет 1 кВ.

Анализатор масс-спектрометрической камеры течеискателя – 180°-го типа. Траектории ионов в нем от ионного источника к приемнику ионов имеют вид полуокружностей. Анализатор такого типа обладает фокусирующим действием; ионы определенной массы, выходящие из источника расходящимся пучком, вновь собираются в сходящийся пучок в плоскости входной диафрагмы коллектора

(рис. 4.2, б). Неидеальность такой фокусировки приводит к появлению aberrации пучка ионов на выходе анализатора, равной ra^2 , где α – угол рассеивания.

К увеличению ширины выходящего ионного пучка приводят также и разброс энергии ионов, и неоднородности поля.

Разрешающая способность масс-спектрометра зависит от размеров прибора (радиуса траектории) и расширения ионного пучка, происходящего в результате разброса ионов по энергиям и неоднородностей поля. Если d_1 и d_2 – ширина щелей на выходе из источника ионов и перед коллектором ионов, а δd – расширение ионного пучка в плоскости щели коллектора, то должно выполняться условие $d_2 \geq d_1 + \delta d$, при котором все ионы одного массового числа попадут во входную щель перед коллектором ионов. Увеличение ширины щели d_1 приводит к повышению чувствительности прибора, однако это увеличение требует эквивалентного увеличения d_2 , что вызывает ухудшение разрешающей способности. Разрешающая способность выражается формулой

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{r}{d_1 + d_2 + \delta d},$$

где ΔM – наименьшее различаемое массовое число. В промышленных приборах ширины щелей обычно составляют от 0,1 до 1 мм. Поскольку для течеискателя необходимая разрешающая способность не превышает 4 а.е.м., ширина щелей и, следовательно, ионный ток и чувствительность течеискателя могут выбираться гораздо больше, чем у обычных анализаторов.

Чтобы на коллектор попадали только ионы гелия, обладающие полным запасом энергии, и отсеивались и задерживались рассеянные ионы, потерявшие часть своей энергии в результате соударения со стенками камеры или с нейтральными молекулами газа и случайно попавшие на рабочую траекторию, перед коллектором помещают супрессорную систему (сетку). Супрессорной системой создается тормозящее ионы электрическое поле, пропускающее только основные ионы гелия. Коллектор ионов соединен со входом электрометрического усилителя постоянного тока.

4.1.3. Чувствительность течеискания

Важнейшей характеристикой любого течеискателя является *чувствительность*, определяемая как отношение изменения сигнала течеискателя к вызывающему его изменению потока пробного газа через течи. Минимальное регистрируемое течеискателем количество или поток пробного газа называется *порогом чувствительности*. Однако при измерении потоков натекания в реальных системах, когда оно проводится в условиях газовыделения, наличия многих течей и динамической откачки, величина минимально регистрируемого потока течи $Q_{\text{тмин}}$ не определяется только параметрами течеискателя, а зависит от методики проведения испытаний. Таким образом, следует говорить о чувствительности течеискания в целом.

Рассмотрим некую вакуумную систему, к которой подключен течеискатель. Система имеет газовыделение – поток $Q_{\text{гв}}$, течь – поток натекания $Q_{\text{т}}$ и минимальную течь – поток $Q_{\text{тмин}}$. Для эффективного течеискания необходимо обнаруживать малые течи на фоне больших.

При реальном поиске и обдуве подозрительного места на внешней стороне вакуумной камеры струей гелия в какой-то момент времени поток воздуха $Q_{\text{т}}$ заменяется на поток гелия, попадающий в течеискатель. Однако гелий не может полностью вытеснить в течи воздух, следовательно, в течеискатель попадает воздушно-гелиевая смесь. И, по существу, течеискатель должен регистрировать изменение концентрации гелия. Способность течеискателя реагировать на изменение концентрации гелия в системе определяется газоаналитической чувствительностью

$$\beta = \frac{1}{C_{\text{к}}} \left(\frac{Q_{\text{тмин}}}{Q_{\text{гв}} + Q_{\text{т}}} \right) = \frac{1}{C_{\text{к}}} \cdot \frac{Q_{\text{тмин}}}{p_{\text{пр}} \cdot S},$$

где $C_{\text{к}}$ – поправочный коэффициент, отражающий неполное замещение воздуха в течи гелием. Газоаналитическая чувствительность определяется стабильностью течеискателя, его избирательной способностью (чувствительностью) по гелию и конкретными условиями в данной вакуумной системе.

Современные течеискатели способны показывать наличие гелия в атмосферном воздухе; значение β может достигать величины 10^{-7} .

Исходя из уравнения выше, можно записать, что минимальный поток натекания, измеряемый течеискателем в рассмотренном случае, составляет

$$Q_{\text{т мин}} = C_{\text{к}} \cdot \beta \cdot p_{\text{пр}} \cdot S.$$

Помимо этого, на чувствительность течеискания существенным образом влияют динамические процессы установления парциального давления в системе, временные характеристики течеискания. Пусть в момент времени $t = 0$ в систему объемом V , не содержащую гелия, начинает поступать через течь поток гелия Q_{He} . Рост парциального давления гелия в системе описывается уравнениями:

$$V \frac{dp_{\text{He}}}{dt} = Q_{\text{He}} - p_{\text{He}} \cdot S_{\text{He}}, \quad p_{\text{He}}(t) = \frac{Q_{\text{He}}}{S_{\text{He}}} (1 - e^{-t/\tau}),$$

где S_{He} – быстрота откачки системы по гелию; $\tau = V/S_{\text{He}}$ – постоянная времени течеискания, характеризующая инерционность процесса течеискания.

Отсюда видно, что, чем меньше S_{He} , тем больше предельное равновесное давления гелия в системе, равное $Q_{\text{He}}/S_{\text{He}}$, и тем быстрее реакция прибора на пробный газ. Таким образом, для увеличения чувствительности течеискания выгодно снижать быстроту откачки гелия. Однако при этом, после удаления источника гелия от места течи, снизится скорость падения парциального давления пробного газа в объеме, следовательно, увеличатся инерционность системы и время измерения. Видно, что факторы полного времени измерения и чувствительности противоречат друг другу.

Эти уравнения записаны для случая, когда гелий подается на течь неограниченно долго, например, при калибровке. На практике при обдуве подозрительных мест это условие обеспечить нельзя (без применения метода «колпака»), и тогда, считая, что в момент t_1 прекращается подача гелия ($Q_{\text{He}} = 0$), можно записать зависимость давления гелия в системе от времени:

$$p_{\text{He}}(t) = \frac{Q_{\text{He}}}{S_{\text{He}}} (1 - e^{-t_1/\tau}) \cdot e^{-(t-t_1)/\tau},$$

где t_1 – время обдувания течи гелием.

Обычно на практике время обдувания выбирается из условия $\tau \leq t_1 \leq 3\tau$, что обеспечивает достижение в объеме от 63 до 95 % максимально возможного значения давления гелия.

Учет динамического процесса установления или изменения давления гелия в системе позволяет записать

$$Q_{\text{т мин}} = C_{\text{т}} \cdot C_{\text{к}} \cdot \beta \cdot p_{\text{пр}} \cdot S,$$

где $C_{\text{т}}$ – уменьшение концентрации гелия в системе вследствие действительных временных соотношений. Уравнение определяет чувствительность течеискания в случае реального поиска течей в вакуумных системах.

Поскольку течеискатель снабжен собственной системой откачки, его можно отградуировать и использовать для прямых измерений скорости натекания.

Если минимальное регистрируемое давление гелия известно, то минимальный регистрируемый поток натекания в первую очередь определяется эффективной быстротой откачки гелия. Чувствительность течеискания зависит от того, какая доля молекул натекающего гелия попадет в камеру анализатора.

Для контроля чувствительности течеискателя служит калиброванная гелиевая течь, обеспечивающая поступление фиксированного потока гелия через кварцевую диафрагму. Калибровкой определяется цена деления шкалы выходного прибора течеискателя

$$A = Q_{\text{He}} / (\alpha_{\text{He}} - \alpha_{\text{ф}})$$

где Q_{He} – поток гелия от калиброванной течи, Па·м³/с; α_{He} – установившийся сигнал при измерении потока калиброванной течи, мВ; $\alpha_{\text{ф}}$ – фоновый сигнал, мВ. Предельные возможности течеискателя, характеризующиеся минимальным регистрируемым потоком пробного газа:

$$Q_{\text{He мин}} = 2 \cdot A \cdot \Delta \alpha_{\text{ф}}.$$

Здесь $\Delta \alpha_{\text{ф}}$ – амплитуда флуктуаций фонового сигнала, мВ. Минимальный обнаруживаемый поток через течь определяется значением и стабильностью фоновых гелиевых потоков в системе.

4.1.4. Способы течеискания

Существует несколько способов реализации масс-спектрометрического метода течеискания (ГОСТ 28517-90). Некоторые из них схематически представлены на рис. 4.3.

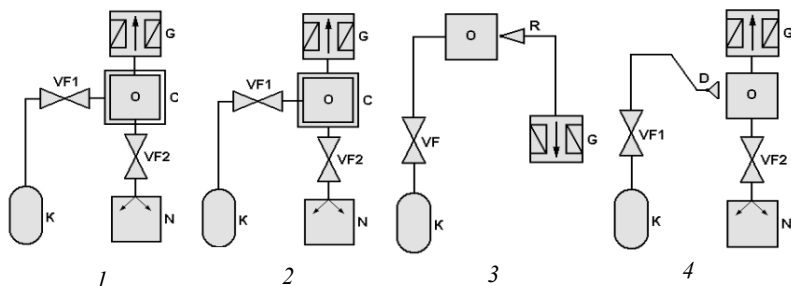


Рис. 4.3. Способы контроля герметичности: *O* – испытуемый объект; *G* – течеискатель; *R* – шуп; *VF* – клапан регулировочный; *N* – насос; *K* – баллон с пробным газом; *D* – обдуватель; *C* – камера, наполненная пробным газом; *CV* – вакуумная камера

1. *Способ камеры (чехла)*. Определение степени негерметичности. Контролируемый объект помещают в камеру (чехол), откачивают и присоединяют к течеискателю (рис. 4.3, 1). При непрерывной откачке объекта течеискателем в камеру (чехол) подают пробный газ с одновременной регистрацией сигнала течеискателя. Локализовать место течи способом камеры (чехла) нельзя.

2. *Способ вакуумной камеры*. Определение степени негерметичности. Контролируемый объект помещают в вакуумную камеру, соединенную с течеискателем (рис. 4.3, 2), заполняют пробным газом (контрольной средой) с одновременной регистрацией сигнала течеискателя. Локализовать место течи способом вакуумной камеры нельзя.

3. *Способ шупа*. Локализация течей. Контролируемый объект заполняют пробным газом (контрольной средой) под избыточным давлением. Течи обнаруживают сканированием поверхности объекта шупом течеискателя (рис. 4.3, 3). Скорость перемещения шупа не должна превышать 1 см в секунду. При наличии негерметичности в объекте гелий через дефект корпуса объекта попадает в шуп, а по шупу – в течеискатель. С большой долей вероятности можно утверждать только об отсутствии течи в месте прохождения шупа.

4. *Способ обдува*. Локализация течей. Откачанный объект подсоединяют к течеискателю. При непрерывной откачке объекта течеискателем контролируемые участки поверхности обдувают пробным газом с одновременной регистрацией сигнала течеискателем

(рис. 4.3, 4). Объекты небольшого объема можно откачать течеискателем, для откачки больших объектов используют откачные (вакуумные) посты. С большой долей вероятности можно утверждать только об отсутствии течи в месте обдува.

Течеискатель может непосредственно подключаться к испытываемому объекту (рис. 4.4, а) вакуумной системы, когда объем отбираемого в течеискатель газа достаточен для создания в анализаторе рабочего давления. При подключении по второй схеме (рис. 4.4, б) обеспечивается максимальный отбор газа в течеискатель и наиболее высокая чувствительность с учетом повышения давления отбираемого газа, в том числе и пробного, на выходе насоса.

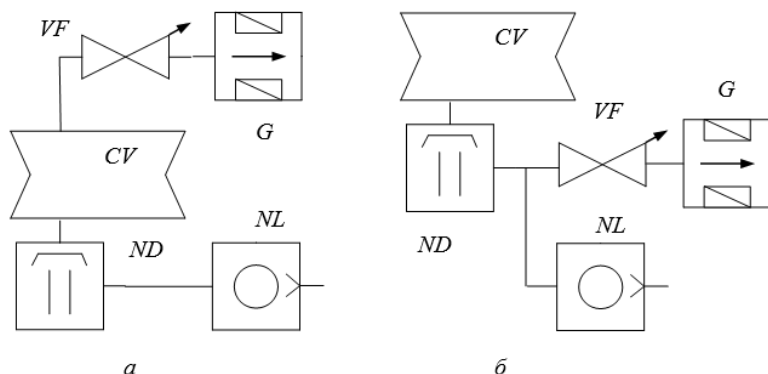


Рис. 4.4. Схемы испытаний на герметичность с помощью течеискателя:
G – течеискатель; *CV* – вакуумная камера; *ND* – насос диффузионный;
NL – насос механический; *VF* – клапан-напекатель

Наибольшая чувствительность достигается в условиях, когда весь газовый поток линии, к которой подсоединен течеискатель, прокачивается через течеискатель. Поэтому испытание объектов, поток газоотделения и натекания которых не превышает максимальный рабочий поток течеискателя, производится при отключенных средствах вспомогательной откачки и прокачке всего газового потока проверяемого объекта через течеискатель.

4.2. Лабораторная установка № 4

Схема лабораторного экспериментального стенда показана на рис. 4.5. Лабораторный экспериментальный стенд построен на базе промышленного гелиевого течеискателя G . На входном фланце течеискателя оснащен переходным вакуумным объемом $CV1$. Вакуумметр P на входе течеискателя позволяет контролировать уровень вакуума в откачиваемом объекте при работе вакуумной системы течеискателя. Клапан V предназначен для подключения к течеискателю внешних объектов для проведения течеискания – объем $CV2$. Подключение выполняется через гибкий металлический шланг.

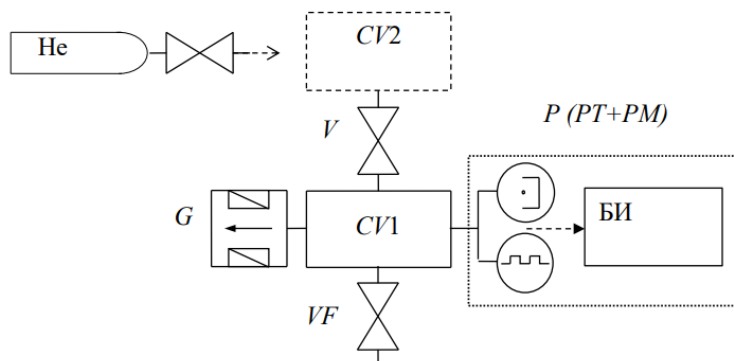


Рис. 4.5. Схема лабораторного экспериментального стенда:
 $CV1$ – переходник; $CV2$ – тестируемый объем; V – входной клапан;
 VF – клапан-напекатель; G – гелиевый течеискатель; P – комбинированный широкодиапазонный вакуумметр; PT – тепловой преобразователь;
 PM – магниторазрядный преобразователь; БИ – блоки индикации вакуумных датчиков; He – баллон с гелием в комплекте для обдува

Установка комплектуется также набором для обдува гелием, состоящим из переносного баллона с редуктором и выпускного клапана – обдувателя.

Течеискатель (G) – модели ТИ1-50М «ГелиТест» [21, 22]. Диапазон измерений по входу течеискателя: $5 \cdot 10^{-13}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Па·м³/с. Время выхода в режим готовности – не более 5 мин. Минимальное время реакции на поток пробного газа по входу – 1 с. Максимальное рабочее давление на входе: в режиме «прямоток» – 20 Па; в режиме

«противоток» без установки дроссельной диафрагмы – 1000 Па, с установкой дроссельной диафрагмы – 100000 Па.

Вакуумметр (P) – модели МТМ9D серии MultiTorr [2, 6]. Широкодиапазонный вакуумметр имеет комбинированный датчик: тепловой (Пирани) PT и электроразрядный с холодным катодом PM (инверсно-магнетронного типа). Измеряет давление в диапазоне $10^5 - 5 \cdot 10^{-7}$ Па.

Входной клапан (V) – модели MAV-HV-KF-25 [2,8]. Угловой тарельчатый с уплотнением эластомерным кольцом и с ручным приводом.

Натекатель (VF) – модели 2701 KF16-0,8 [2]. Ручной механический игольчатого типа.

4.3. Порядок выполнения

Меры предосторожности

Запрещено перемещать течеискатель при работающем ТМН, что может привести к повреждению опорных подшипников турбомолекулярного насоса из-за возникающего гироскопического момента сил на быстро вращающемся роторе турбомолекулярного насоса.

Запрещено переключать выключатель на форвакуумном насосе (выключатель постоянно находится в положении «Вкл»).

Запрещено переходить в сервисный режим работы течеискателя. Сервисный режим предназначен преимущественно для выполнения нестандартных работ, а также ремонта и наладки.

При смене тестируемого объекта необходимо предварительно перевести течеискатель в режим ожидания клавишей «Старт/Стоп»



на панели управления, затем выполнить команду «Смена объекта» клавишей  для напуска атмосферы на входе течеискателя.

4.3.1. Подготовка к выполнению работы

Сопоставить элементы схемы установки (см. рис. 4.5) с соответствующими деталями самой установки.

Изучить технические характеристики вакуумного оборудования лабораторной установки.

Включить общее питание оборудования стенда.

Включается цифровое табло вакуумметра.

Включить лабораторный компьютер.

Проверить состояние клапанов, **V закрыт**.

Установить в системе атмосферное давление при открытом натекателе *VF*. Плавным поворотом регулирующей головки: против часовой стрелки – «Открыто», по часовой стрелке до легкого упора – «Закрыто».

При открытом натекателе *VF* проверить калибровку вакуумметра на атмосферное давление. В случае неточных показаний, по указанию преподавателя, выполнить дополнительную калибровку вакуумметра.

Перевести **натекатель VF** в положение «Закрыто».

4.3.2. Включение течеискателя, проверка работоспособности (задание 1)

Включить питание течеискателя. Установить выключатель «Сеть» на задней стенке течеискателя в положение «I». При подаче питания должен включиться экран панели управления, отображающий заставку с названием прибора. В ходе запуска течеискателя производится тестирование всех элементов вакуумной системы. Последовательность производимых переключений отображается на блок-схеме панели управления (рис. 4.6).

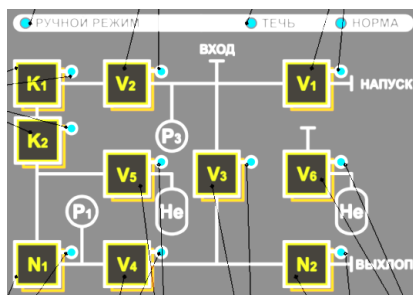


Рис. 4.6. Блок-схема течеискателя ТИ1-50М на панели управления

Происходит включение форвакуумного насоса (ФВН) *N2*, открытие клапана *V4* «Откачка ТМН», и, в случае достижения давления откачки ниже 1000 Па (по датчику *P1* на выходе ТМН), происходит

запуск ТМН №1. О переключениях элементов схемы течеискателя свидетельствуют индикаторные светодиоды панели управления.

По окончании процедуры запуска течеискатель переходит в режим готовности, о чем свидетельствует появление на экране прибора сообщения «Нажмите кнопку Старт».

В процессе запуска и тестирования течеискателя возможен выход в экран настроек течеискателя, если прибор не может быть выведен автоматической системой управления в режим готовности в силу неисправности. Таким образом, течеискатель может быть переведен в сервисный режим управления, который используется для устранения неполадок. **О неисправности необходимо сообщить преподавателю.**

Программа вакуумных испытаний

Запустить программу регистрации давления на лабораторном компьютере, проверить подключение и опрос программой вакуумного датчика.

Включить построение временных диаграмм давления.

Течеискатель находится в режиме готовности, оба насоса включены, клапан *V*4 открыт, камера масс-спектрометра откачивается и накал катода включен .

Для запуска программы вакуумных испытаний объекта нажать клавишу «Старт/Стоп»  на панели управления.

Начнется низковакуумная откачка объекта насосом №2 через клапан *V*3, при этом клапан *V*4 временно закрывается. При достижении давления 5 Па по вакуумметру *P*2 система переходит на высоковакуумную откачку №1, клапан *V*3 закрывается, клапаны *V*4 и *V*2 открываются.

На табло панели управления появится графическая зависимость выходного сигнала масс-спектрометра, отображающая изменение уровня фонового сигнала по мере откачки вакуумной системы течеискателя.

Наблюдать за показаниями внутренних вакуумметров течеискателя и внешним на входе течеискателя. Провести сравнение показаний во время запуска программы испытаний. Внутренние вакуумметры течеискателя низковакуумные, тепловые (Пирани). Внешний

вакуумметр широкодиапазонный, показывает полное предельное давление на входе течеискателя.

Дождаться выхода на квазистационарный уровень, когда давление практически не меняется в течение нескольких минут.

Записать полученный уровень фоновый сигнал течеискателя.

Отметить достигнутое давление на входе течеискателя.

По окончании измерений остановить цикл вакуумных испытаний и перевести течеискатель в режим готовности повторным нажатием на клавишу «Старт/Стоп». Клапан V_2 закроется.

4.3.3. Определение эффективности системы откачки течеискателя (задание 2)

Течеискатель находится в режиме готовности, оба насоса включены, клапан V_4 открыт, камера масс-спектрометра откачивается, и накал катода включен.

Выполнить команду «Смена объекта» клавишей  для напуска атмосферы на входе течеискателя. Проверить давление по вакуумметру P .

Открыть клапан V .

Подключить тестируемый вакуумный объем через гибкий шланг. При работе с вакуумными соединениями соблюдать требования вакуумной гигиены (прил. 3).

Включить построение временных диаграмм давления.

Для запуска программы вакуумных испытаний объекта нажать клавишу «Старт/Стоп»  на панели управления.

Наблюдать за снижением давления в камере и на входе течеискателя. Начнется низковакуумная откачка объекта насосом N_2 через клапан V_3 , при этом клапан V_4 временно закрывается. При достижении давления 5 Па по вакуумметру P_2 система переходит на высоковакуумную откачку N_1 , клапан V_3 закрывается, клапаны V_4 и V_2 открываются.

Дождаться выхода на квазистационарный уровень, когда давление практически не меняется в течение нескольких минут.

Зафиксировать полученные кривые откачки. Отметить достигнутое давление в камере.

Провести анализ полученных кривых откачки, определить постоянные времени откачки, сделать оценки эффективной быстроты откачки тестируемой камеры.

По окончании измерений остановить цикл вакуумных испытаний и перевести течеискатель в режим готовности повторным нажатием на клавишу «Старт/Стоп». Клапан $I/2$ закроется.

4.3.4. Калибровка течеискателя (задание 3)

Калибровка является одним из фундаментальных процессов, обеспечивающих достоверность данных. Она включает в себя сравнение показаний средств измерений со значениями эталонов, что позволяет определить отклонения и корректировать показания прибора.

Калибровка течеискателя выполняется с использованием эталонов единиц потока. В данном случае используется метод сравнения с мерой потока, такой как контрольная течь типа Гелит.

Исходное состояние течеискателя: в режиме готовности, насосы работают, клапан $I/4$ открыт, накал катода включен.

Произвести автоматическую калибровку течеискателя.

Для этого войти в меню оператора. Кнопка меню оператора  располагается непосредственно на поле сенсорного экрана течеискателя в правом нижнем углу.

Выбрать режим «Калибровка». Режим предназначен для автоматической подстройки масс-спектрометра течеискателя на регистрацию пробного газа (гелия) путем изменения ускоряющего напряжения в небольших пределах. В результате в память течеискателя заносится новое значение ускоряющего напряжения, обеспечивающее наибольшее значение сигнала от встроенной гелиевой течи (настройка на пик гелия).

Одновременно производится калибровка шкалы измерений, позволяющая сопоставить значение указанного сигнала с установленными в настройках единицами измерения величины потока.

По окончании автоматической подстройки/калибровки выводится значение $Q_{\text{мин}}$ минимально регистрируемого потока гелия. Для принятия данного значения нажать кнопку «Ок» на сенсорном

экране. В память течеискателя заносится достигнутое значение минимально регистрируемого потока по встроенной течи, и прибор переводится в режим готовности.

Описать процесс автокалибровки течеискателя, отметить полученные результаты настройки на пик гелия и минимально регистрируемой течи.

4.3.5. Выполнение процедуры течеискания (задание 4)

Поскольку газообразный гелий легче воздуха, обдув объекта следует начинать с верхних точек конструкций. Также следует учитывать инертность метода гелиевого течеискания, и для этого обдув системы следует начинать с наиболее дальних точек системы, постепенно приближаясь к течеискателю. Особое внимание при обдуве следует уделять «критичным» деталям, таким как фланцы, соединения, пайки, вентили.

Небольшие объекты могут откачиваться самим течеискателем.

С помощью набора для обдува гелием выполнить поиск места натекания в тестовом объекте и измерить величину течи.

Течеискатель находится в режиме готовности, входной клапан V открыт, натекатель VF закрыт.

Для запуска программы вакуумных испытаний объекта нажать клавишу «Старт/Стоп»  на панели управления.

Дождаться выполнения всех этапов откачки объекта испытаний и выхода сигнала течеискателя на стабильный уровень.

Обдув следует производить короткими равными порциями (3 – 5 с) с задержкой до следующего элемента системы на 20 – 30 с.

При обнаружении всплеска сигнала на дисплее течеискателя следует описать место обнаружения течи и оценочную величину натекания. Зафиксируйте график зависимости значения сигнала течеискателя от времени.

По окончании поиска течей следует закрыть вентили набора для обдува.

Для окончания измерения нажмите кнопку «Старт/Стоп». Течеискатель возвращается в режим ожидания.

4.3.6. Выключение установки

Выключение течеискателя производится только с разрешения преподавателя.

Течеискатель находится в режиме ожидания.

Установить выключатель «Сеть» на задней стенке течеискателя в положение «0». Питание течеискателя отключается, форвакуумный насос останавливается, и производится автоматический напуск атмосферы на вход форвакуумного насоса. Происходит свободный выбег и остановка вращения турбины ТМН (не менее 2 мин).

Контрольные вопросы

1. Что понимается под герметичностью вакуумной системы?
2. Как определяется допустимый поток натекания через течи?
3. Что такое техника течеискания?
4. В чем состоит метод накопления для контроля герметичности?
5. В чем заключается метод пробного газа и его применение?
6. Какой газ используется для течеискания и почему?
7. Что представляет собой масс-спектрометрический течеискатель?
8. Приведите общий вид вакуумной схемы течеискателя.
9. Дайте описание конструкции и принципа действия масс-спектрометра течеискателя.
10. От чего зависит разрешающая способность анализатора в магнитном поле?
11. Что называется порогом чувствительности течеискателя?
12. Как учитывается динамический процесс установления или изменения давления гелия в системе?
13. Как изменяется режим работы течеискателя в зависимости от входного давления?
14. Для чего предназначена калиброванная гелиевая течь?
15. Какие существуют способы течеискания?

ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ

5.1. Вакуумные насосы

5.1.1. Турбомолекулярный насос FF63/80 с блоком управления TSP100

Турбомолекулярный вакуумный насос КУКУ FF63/80Е [1] с механическим подвесом ротора на керамических подшипниках (с консистентной смазкой, необслуживаемые) и встроенным контроллером (модулем привода) управления насосом с интерфейсом RS485 представлен на рис. 5.1. Конструкция насосов FF включает несколько ступеней, в том числе выходную молекулярную ступень откачки. Одной из характеристик такого гибридного молекулярного насоса является повышение скорости откачки на этапе высокого давления, другой – увеличение давления на выходе.



Рис. 5.1. Турбомолекулярный насос FF63/80 с контроллером TD80
и схема молекулярной ступени откачки Хольвека

Насос может работать с форвакуумными насосами, обеспечивающими давление на выхлопном фланце не более 10–500 Па. Давление на входном фланце – не более 1–5 Па.

В случае длительного отключения в состоянии вакуума пары масла возле подшипников могут диффузно перемещаться в сторону впускного отверстия и загрязнять вакуумную камеру. После выключения и остановки рекомендуется наполнять насос осушенным газом, азотом или воздухом.

Основные рабочие характеристики насоса приведены в табл. 5.1 и на рис. 5.2.

Таблица 5.1

Технические характеристики насоса FF63/80

Параметр	Значение
Входной фланец	DN63 CF; DN63 ISO-K
Выпускной фланец	DN16 ISO-KF
Быстрота действия, л/с	N ₂ – (63-80); He – 55; H ₂ – 34; Ar – 65
Степень сжатия	N ₂ – 10 ⁹ ; He – 10 ⁵ ; H ₂ – 10 ⁴ ; Ar – 10 ⁹
Предельное давление, Па	CF – 5·10 ⁻⁶ ; ISO-K – 3·10 ⁻⁵
Максимальное выпускное давление, Па	500 (1500 кратковременно)
Производительность, Па·м ³ /с	N ₂ – 0,058; He – 0,05; H ₂ – 0,03; Ar – 0,063
Частота вращения, об/мин	72000
Время запуска, мин	До 2
Охлаждение	Воздушное
Максимальная потребляемая мощность, Вт	90
Модель управляющего контроллера	TCP100
Вес, кг	2,6 (ISO-K); 3,5 (CF)

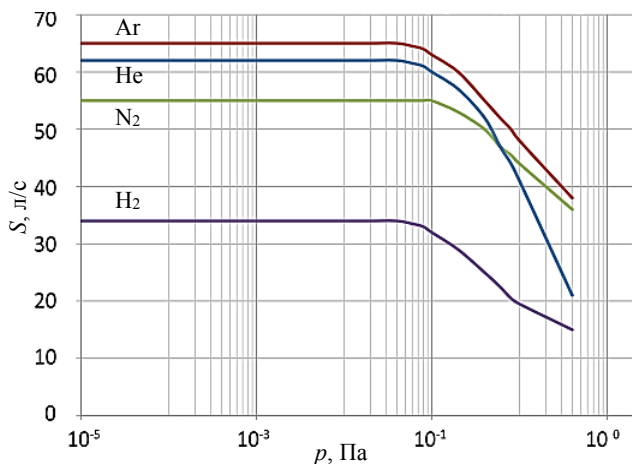


Рис. 5.2. Графики зависимости быстроты действия FF63/80 по разным газам от давления на входе насоса

Модуль привода TD80 используется для управления приводом молекулярных насосов через RS232/RS485 (совместимый с протоколом Modbus) или через интерфейс внешнего управления. Состояние индикаторов на корпусе контроллера показывает режимы работы: зеленый – питание; желтый – ускорение (быстрое мигание), замедление (медленное мигание), работа (горит); красный – ошибка.

Управление FF63/80 может производиться с помощью блока управления TCP100 [3] (рис. 5.3).

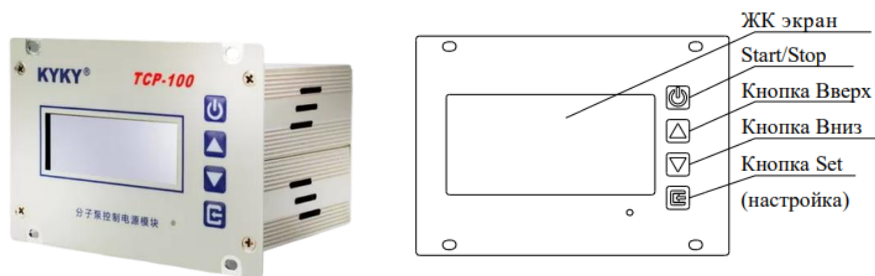


Рис. 5.3. Блок управления TCP100

Порядок работы с насосом

Молекулярному насосу требуется *плавный разгон* при первом использовании или повторном использовании после длительного (обычно более 3 мес.) хранения.

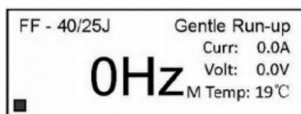
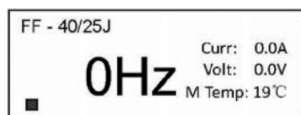
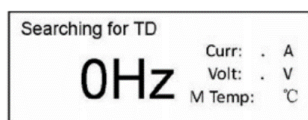
1. Включить питание блока управления.

Зеленые индикаторы на модулях TCP и TD загораются. В это время ЖК-экран блока TCP начинает светиться, блок TCP определяет целевой привод.

Затем блок TCP переходит в режим ожидания.

2. Запуск после длительного простоя:

в режиме ожидания нажать кнопку «Вверх» и на экране отобразится режим «плавного разгона» (Gentle Run-up);



нажать кнопку «Start/Stop», и система начнет процесс плавного разгона;

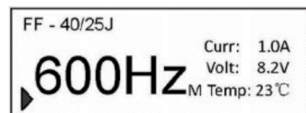
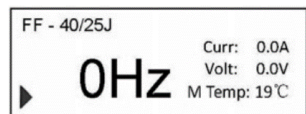
по окончании процесса плавного разгона система автоматически вернется в режим ожидания.

3. Включение насоса.

В режиме ожидания нажать кнопку «Start/Stop», и указатель ► появляется в левом нижнем углу ЖК-дисплея, показывая, что молекулярный насос запущен.

Частота «0 Гц» на ЖК-дисплее мигает, когда молекулярный насос каждый раз запускается из состояния остановки.

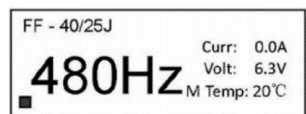
На ЖК-дисплее отображаются частота, напряжение, ток и температура двигателя молекулярного насоса в реальном времени, пока ускорение не завершится.



3. Остановка насоса.

В рабочем состоянии нажать кнопку «Start/Stop», в левом нижнем углу ЖК-дисплея видна иконка ■, означающая, что молекулярный насос замедляется до полной остановки.

Произвести продувку насоса плавным напуском атмосферы.



5.1.2. Турбомолекулярный насос HiPace 80

Высоковакуумный турбомолекулярный насос Pfeiffer Vacuum HiPace 80 [11] (рис. 5.4) оснащен ступенью Хольвека, интегрированным контроллером, воздушным охлаждением. Особенностью конструкции насосов серии HiPace является технология комбинированного подвеса ротора. Это сочетание керамического шарикового подшипника, установленного в форвакуумной зоне и магнитного радиального подшипника на стороне высокого вакуума. Магнитный подшипник практически не изнашивается и не требует обслуживания. Керамический подшипник с консистентной смазкой обслуживается с интервалом около 4 лет.

Насос комплектуется электронным приводным блоком (контроллером) TC110 с интерфейсом RS485. Контроллеры имеют широкие функциональные возможности по настройке насоса под конкретный процесс и управления внешними устройствами, такими как форвакуумные насосы, клапаны продувки, клапаны вентиляции.



Рис. 5.4. Турбомолекулярный насос HiPace 80 с интегрированным контроллером TC110, ротор насоса со ступенью Хольвека

Управление работой насоса осуществляется через контроллер. Индикаторы на панели электронного блока контроллера показывают основные состояния работы турбонасоса:

- зеленый индикатор – мигающий режим сигнализирует о разгоне турбины (длительное мигание) или об остановке (короткое моргание), постоянное свечение означает рабочий режим;

- ▲ желтый индикатор – предупреждение;

- красный индикатор – сигнализирует о неполадках.

Все насосы серии оснащены датчиками температуры и датчиками Холла, которые позволяют контролировать состояние насоса во время работы и проводить оптимизацию. Эти же датчики включены в автоматическую интеллектуальную систему защиты насоса от перегрузок. Мощность привода снижается в случае недопустимой температуры двигателя или недопустимо высокой температуры корпуса. Это может вызвать падение ниже точки переключения скорости вращения и привести к выключению турбонасоса.

После выключения турбонасос должен быть подвергнут продувке во избежание загрязнения частицами, стремящимися обратно из зоны предварительного вакуума. Продувка может выполняться автоматически или в ручном режиме.

Основные технические характеристики и параметры насоса приведены в табл. 5.2 и на рис. 5.5.

Таблица 5.2

Технические характеристики насоса HiPace 80

Параметр	Значение
Входной фланец	DN63 CF; DN63 ISO-K
Выпускной фланец	DN16 ISO-KF / G1/4
Быстрота действия, л/с	N ₂ – 67; He – 58; H ₂ – 48; Ar – 66
Степень сжатия	N ₂ – 10 ¹¹ ; He – 10 ⁷ ; H ₂ – 10 ⁵ ; Ar – 10 ¹¹
Предельное давление, Па	CF – 5·10 ⁻⁸ ; ISO-K – 1·10 ⁻⁵
Максимальное выпускное давление, Па	N ₂ – 2200; He – 2200; H ₂ – 1400; Ar – 2300
Производительность, Па·м ³ /с	N ₂ – 0,13; He – 0,27; H ₂ – 1,5; Ar – 0,054
Частота вращения, об/мин	90000
Время запуска, мин	1,7
Охлаждение	Воздушное
Максимальная потребляемая мощность, Вт	110
Модель управляющего контроллера	TC-110
Вес, кг	2,4 (ISO-K); 3,8 (CF)

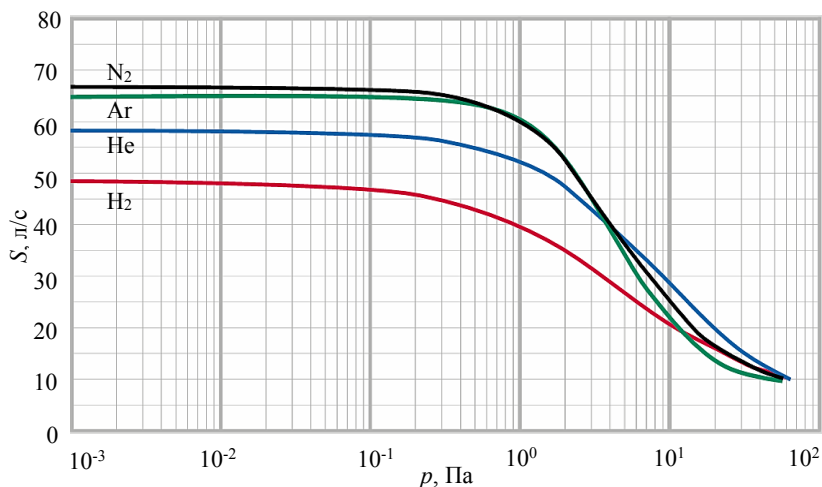


Рис. 5.5. Графики зависимости быстроты действия HiPace 80 по разным газам от давления на входе насоса

5.1.3. Мембранные насосы MVP 015-2 DC и MVP 015-4 DC

Мембранные насосы Pfeiffer Vacuum MVP 015-2 DC и MVP 015-4 DC [12] (рис. 5.6), с двигателями постоянного тока рабочим напряжением 24 В, имеют в конструкциях две и четыре камеры (ступени откачки) соответственно. Идеальны для условий, где необходим сухой и безмасляный вакуум. Скорость вращения двигателя регулируется от 500 до 2600 об/мин. Есть коммуникационный интерфейс RS485. Используются для откачки сравнительно небольших вакуумных систем, а также в качестве вспомогательных для турбомолекулярных насосов со ступенью Хольвека.



Рис. 5.6. Мембранные насосы MVP 015-4 DC и MVP 015-2 DC

Электронный двигатель постоянного тока позволяет регулировать скорость вращения в соответствии с конкретными условиями применения. С помощью режима автоматического увеличения скорости насос начнет работать с максимальной скоростью и будет ее уменьшать, как только будет достигнут определенный уровень вакуума, чтобы обеспечить высокую производительность, а также низкий уровень шума и вибрации.

MVP 015-4 DC – 4-ступенчатый мембранный насос, предназначен для получения лучшего предельного давления.

MVP 015-2 DC – 2-ступенчатый мембранный насос, снабжен газобалластным устройством и может применяться для откачки влажных газов.

Основные технические характеристики и параметры насосов приведены в табл. 5.3 и на рис. 5.7 и 5.8.

Таблица 5.3

Технические характеристики насосов MVP 015-2 DC, MVP 015-4 DC

Параметр	MVP 015-2 DC	MVP 015-4 DC
Входной фланец	G 1/8	G 1/8
Выпускной фланец	G 1/8" + глушитель	G 1/8" + глушитель
Быстрота действия, м ³ /ч	1	0,75
Предельное давление, Па	350, с газобалластом 600	50
Скорость утечки, Па·м ³ /с	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Частота вращения, об/мин	1800 (2600 макс.)	1800 (2200 макс.)
Вес, кг	2,7	4,4

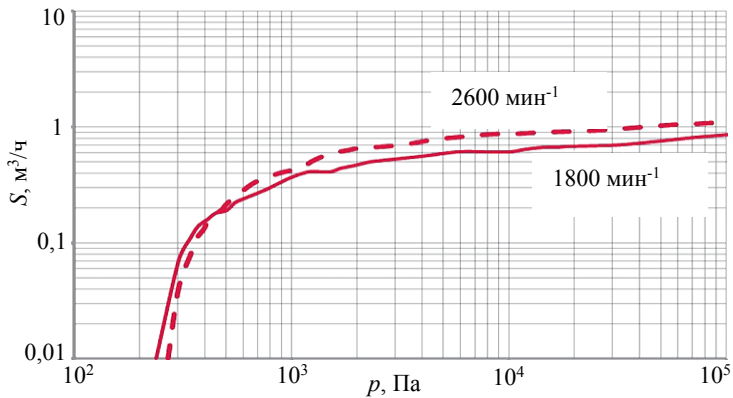


Рис. 5.7. Графики зависимости быстроты действия MVP 015-2 DC для разных частот вращения от давления на входе насоса

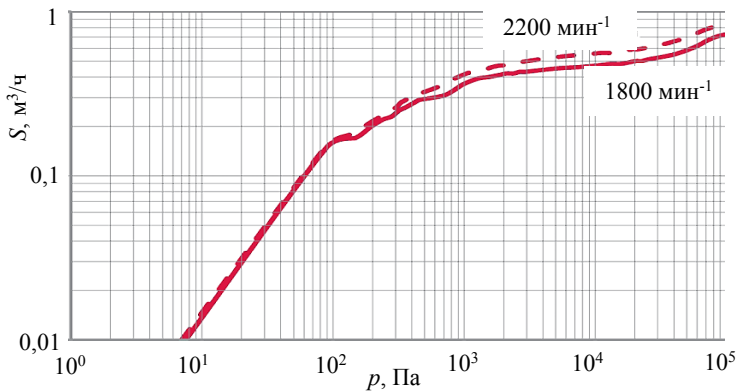


Рис. 5.8. Графики зависимости быстроты действия MVP 015-4 DC для разных частот вращения от давления на входе насоса

5.1.4. Пластинчато-роторный насос VRD-4

Пластинчато-роторный насос VALUE VRD-4 [4] (рис. 5.9) относится к насосам объемного принципа действия, является масляным двухступенчатым роторным насосом. Он может применяться для перекачки инертных газов, а также для газов, которые образуют конденсат. Для этого в насосе также установлено регулируемое газобалластное устройство, позволяющее откачивать газы с водяными парами.



Рис. 5.9. Пластинчато-роторный насос серии VRD

Перед запуском требуется проверить уровень масла (рис. 5.10). Если масло отсутствует или его уровень слишком мал, необходимо его долить и только затем запустить насос в работу. Работа насоса без масла может привести к его поломке.

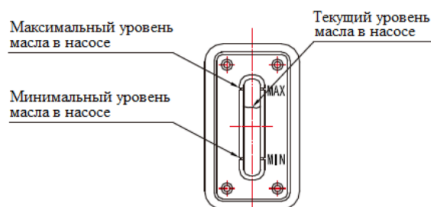


Рис. 5.10. Индикатор уровня масла в насосе

Во время работы насоса прикасаться к корпусу опасно, потому что есть риск получения ожогов.

При откачивании воздуха с содержанием некоторого количества конденсируемых паров используется *газобалластное устройство*. Также рекомендуется всегда прогревать насос на холостом ходу в течение нескольких минут перед началом откачивания воздуха. Если технологически не требуется создавать максимально глубокий вакуум, то можно держать газобалластный клапан открытым. Если

же вакуум должен быть более глубоким, то рекомендуемые действия следующие: перед началом работы открыть клапан газового балласта в положение I или II. Насос должен проработать с открытым газобалластом по меньшей мере полчаса, после чего газобалластный клапан можно закрыть.

Конструкцией предусмотрен встроенный обратный клапан на всасывающем патрубке, который предотвращает высасывание масла из насоса обратно в вакуумируемый резервуар при выключении насоса. Основные технические характеристики и параметры насоса приведены в табл. 5.4 и на рис. 5.11.

Таблица 5.4

Технические характеристики насоса VRD-4	
Параметр	Значение
Входной фланец	KF16
Выпускной фланец	KF16
Быстрота действия, м ³ /ч	4
Предельное остаточное давление, Па	0,5 (с газобалластом 3)
Частота вращения, об/мин	1440
Охлаждение	Воздушное
Потребляемая мощность, кВт	0,4
Емкость масла, л	0,6–1
Вес, кг	19

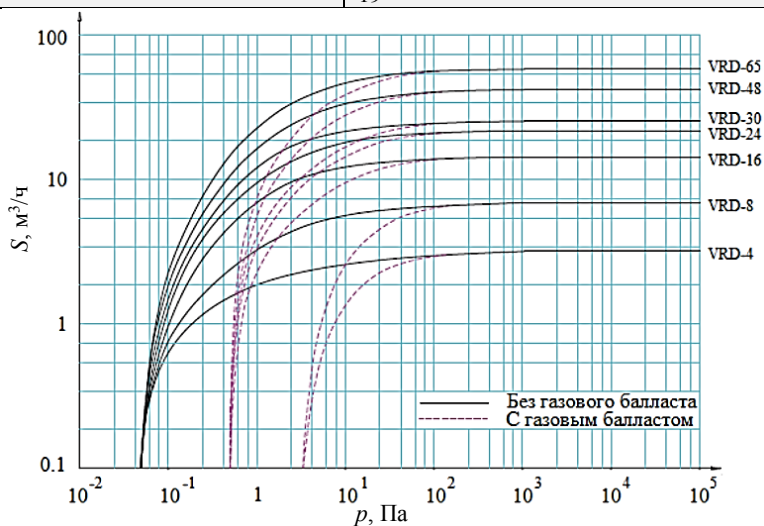


Рис. 5.11. Зависимость быстроты действия насосов VRD от входного давления и состояния газобалласта

5.1.5. Вакуумный откачной пост HiCube 80 Eco

Вакуумный откачной пост Pfeiffer Vacuum HiCube 80 Eco [9] (рис. 5.12) является полностью автоматизированным вакуумным насосным агрегатом. Пост состоит из ТМН с воздушным охлаждением HiPace 80, с входным фланцем DN 63 (ISO-K, CF), форвакуумного мембранного насоса MVP 015-2(4), блока питания и блока отображения и управления DCU002.



Рис. 5.12. Вакуумный откачной пост HiCube 80 Eco

Контроль и управление работой насосов в составе вакуумного откачного поста HiCube 80 Eco осуществляется блоком управления DCU002 [10] (рис. 5.13).

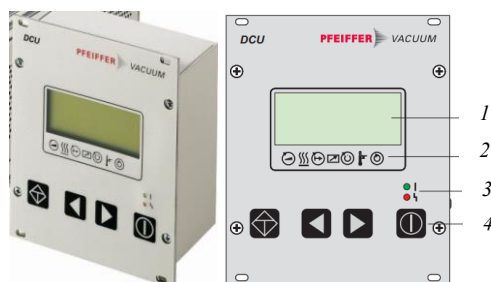


Рис. 5.13. Блок управления DCU002: 1 – ЖК-дисплей; 2 – символы состояния; 3 – светодиодный дисплей рабочего режима; 4 – органы управления

Блок DCU002 является блоком управления и индикации для вакуумных насосов со встроенным электронным приводным блоком

Pfeiffer Vacuum. Устройство обеспечивает обзор всех параметров управления электронного приводного блока (контроллера). Также возможно подключение к блоку вакуумного датчика. Описание функций органов управления представлено на рис. 5.14.

Клавиша	Параметр Приме- ние	Пояснение
	Эквивалентно [010] = 0 или 1	Насосная станция вкл/выкл: Пуск/останов всех компонентов согласно их конфигурации
		Квитирование неисправности (сброс): Выполняет сброс активных сообщений об ошибке при условии, что была устранена причина неполадки.
	[308] --> [309]	Прокрутка вперед в наборе параметров
	[309] --> [308]	Прокрутка назад в наборе параметров
 	Нажать одновременно	Режим редактирования: Позволяет осуществлять настройку вариантов параметра Стрелка ---> на дисплее указывает выбранный вариант
	Снова нажмите одновременно	Режим выбора: Подтверждение выбора («изменение подтверждено»)

Рис. 5.14. Функции органов управления DCU002

Светодиодные индикаторы на передней панели блока DCU отображают текущее состояние вакуумного поста и ТМН:

красный индикатор – сообщение об ошибках;

зеленый индикатор – светится постоянно при нормальной работе, мигает при выключенном двигателе и торможении ротора насоса.

На дисплее (рис. 5.15) будут отображаться все функции узлов поста откачки.

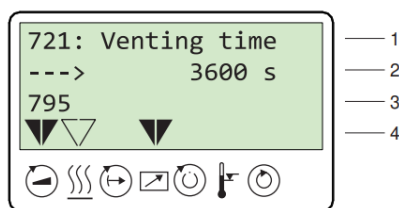


Рис. 5.15 Дисплей блока управления DCU002

Строка 1: Номер и наименование выбранного параметра (например, 721: Время вентилирования).

Строка 2: Соответствующее значение для выбранного параметра. Стрелка —> указывает на режим редактирования.

Строка 3: Отображение текущих сообщений, а также сообщений, относящихся к работе и управлению.

Строка 4: Представление текущего состояния оборудования стрелками, которые указывают связанные символы.

Представления стрелок в нижней строке дисплея обеспечивают визуальную информацию относительно состояния устройства (рис. 5.16).

Символ	Параметр	Представление стрелки	Пояснение
	Вакуумный насос ускоряется = [P:307]	—	НЕТ
		▼	ДА
	Предварительный выбор нагрева = [P:001]	—	Нет предварительного выбора
		▽	Предварительный выбор нагрева, точка переключения не достигнута
		▼	Нагрев включен, точка переключения достигнута
	Режим ожидания = [P:002]	—	ВЫКЛ
		▼	ВКЛ
	Оборудование в режиме дистанционного управления = [P:300]	—	НЕТ
		▼	ДА
	Точка переключения достигнута = [P:302]	—	НЕТ
		▼	ДА
	Перегрев	—	Нет перегрева
		▽	Перегрев, вакуумный насос = [P:305]
		▽	Перегрев, электронный блок привода = [P:304]
		▼	Перегрев, вакуумный насос и электронный блок привода
	Окончательная скорость достигнута = [P:306]	—	НЕТ
		▼	ДА

Рис. 5.16. Значения символов на экране DCU002

Включение вакуумного поста

После включения питания поста откачки HiCube 80 Eso тумблером на правой боковой поверхности производится самотестирование узлов поста с отображением хода операции на цифровом дисплее блока управления поста DCU002.

Включить вакуумную систему установки кнопкой «On/Off» на блоке DCU002. Символы состояния под дисплеем (см. рис. 5.16) визуализируют текущее рабочее состояние подключенных устройств в основных параметрах.

Порядок выключения

Выключить систему откачки кнопкой «On/Off» на DCU002. Дождаться остановки ТМН.

Выключить питание вакуумного поста главным выключателем.

Продувка ТМН и вакуумной системы плавным напуском атмосферы.

5.2. Вакуумметрия

5.2.1. Мембранный емкостной датчик КУМ-240 с контроллером KGC101

Мембранный емкостной (диафрагменный) датчик модели КУКУ КУМ-240 11Т [13] представляет собой измерительный вакуумный преобразователь абсолютного давления, работающий по закону упругой деформации Гука. Датчик активного типа со встроенной электроникой и внешним измерительным блоком (контроллером) KGC101 [14] (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Мембранный емкостной датчик КУМ-240
и измерительный блок KGC101

В этом датчике используется пластичная керамическая диафрагма, покрытая металлической емкостной пленкой, которая имеет

высокую точность измерения и хорошую стабильность. В пределах постоянного коэффициента упругости деформация эластичной диафрагмы пропорциональна давлению, вызывающему ее деформацию. Герметичная вакуумная камера датчика с измерительным емкостным электродом снабжена встроенным газопоглотителем для поддержания высокого вакуума.

Схема измерения выполняет преобразование величины емкости датчика в давление с учетом значений диапазона измерения, нулевого сигнала и температурной компенсации. Электронная система датчика обеспечивает цифровой сигнал (RS485), аналоговое напряжение и аналоговый ток для вывода значения измеряемого давления.

Цифровой сигнал напрямую соответствует значению измеряемого вакуума, которое может быть использовано без преобразования.

Аналоговое напряжение и аналоговый ток требуют определенного преобразования с учетом диапазона измерения датчика, величины нулевого значения сигнала и температурной компенсации измерительной схемы. Соотношение между выходным аналоговым сигналом $U_{\text{вых}}$ и величиной давления имеет линейную зависимость: $p = (U_{\text{вых}}/10) \cdot D$, где D – величина диапазона шкалы измерения конкретной модели датчика. Для используемой модели КУМ – 240 11Т это значение равно 10 торр. Например, когда выходное напряжение составляет 8,25 В, соответствующее регистрируемое давление $p = (8,25/10) \cdot 10 = 8,25$ (торр).

Устанавливать датчик можно в любом положении, однако в случае опасности попадания внутрь частиц или конденсата рекомендуется устанавливать вертикально. Заводская калибровка датчика выполняется для вертикальной установки, в других случаях может потребоваться повторная калибровка нуля.

На корпусе датчика находится светодиод («led») для отображения следующих состояний (мигающий сигнал): превышения диапазона измеряемого давления 105 %; регулировки диапазона/нуля измеряемого давления.

Операции калибровки показаний датчика проводятся соответствующими кнопками диапазона («span») или нуля («zero») на корпусе датчика. После включения датчика первое нажатие кнопки диапазона или нуля по умолчанию изменит выходной сигнал в сторону уменьшения. Если кнопку шкалы или нуля не отпускать более 4 с, а

затем отпустить и нажать еще раз – выходное значение изменится в противоположном направлении. Для операции регулировки диапазона рекомендуемое значение установленного давления составляет 102–95 % полной шкалы. Для операции регулировки нуля рекомендуемое значение давления обнаружения составляет менее 0,02 % полной шкалы (10^{-4} торр). Длительность прогрева – до 30 мин.

Основные технические характеристики датчика приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Технические характеристики вакуумного датчика КУМ-240 11Т

Параметр	Значение
Тип преобразователя	Мембранно-емкостной
Диапазон измерений	1330–0,133 Па
Класс точности	0,5
Погрешность считывания	0,5 %
Дрейф нуля	0,005 % диапазона/°C
Быстродействие	130 мс задержка вых. сигнала
Напряжение питания	+(14 – 30) В, постоянное
Выходной сигнал	0–10 В; 4–20 мА
Последовательный интерфейс	RS485
Вакуумное соединение	KF16
Масса, г	200

Измерительный блок KGC101 является одноканальным устройством, предназначенным для работы с большим набором разных типов вакуумных преобразователей давления. Имеет аналоговый выходной порт, порт USB для ПК, цифровой дисплей, кнопки управления. На передней панели имеется порт USB для внешнего накопителя.

В начале работы необходимо определить тип подключаемого преобразователя и задать требуемые параметры. В режиме измерения одновременно нажать кнопки «Вниз»  и «Вверх»  и удерживать их в течение 2 с; идентификационная информация измерительного преобразователя будет отображаться в окне. Для датчика КУМ-240 11Т требуется выставить диапазон шкалы измерений, равный 10 торр.

В системе измерительного блока можно управлять настройками реле управления, настраивать параметры измерительного преобразователя, задавать общие параметры измерительного блока. Для ем-

костного преобразователя задаются диапазон, фильтрация, компенсация нуля и др. Из общих параметров выбираются единицы измерения, язык дисплея, формат дисплея, обмен данными. В режиме измерения нажать кнопку меню , чтобы войти в меню выбора групп параметров системных функций. После выбора нужной группы параметров кнопками  и  нажать , чтобы подтвердить выбранную группу параметров функции, а затем войти в режим просмотра и изменения параметров.

5.2.2. Широкодиапазонный вакуумметр PKR251

Широкодиапазонный вакуумметр модели Pfeiffer Vacuum PKR251 [16] активного типа со встроенной управляющей электроникой содержит комбинированный датчик с двумя измерительными системами: преобразователь сопротивления (Пирани) и ионизационный с холодным катодом (инверсно-магнетронного типа) (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Широкодиапазонный вакуумный датчик с холодным катодом PKR251

Комбинированный вакуумметр обеспечивает измерение давления в широком диапазоне 10^5 – 10^{-7} Па. Измерительная цепь датчика Пирани включена постоянно. Ионизационный магнетронный датчик управляется датчиком Пирани и включается при снижении давления до 1 – 10^{-2} Па. При работе ионизационного датчика включается индикатор состояния.

В качестве измерительного блока к датчику используется отдельный блок измерения и контроля полного давления, также может подключаться к блоку управления DCU002.

Аналоговый выходной сигнал 1,8–8,6 В находится в логарифмической зависимости от давления в пределах всего диапазона. Преобразование сигнала напряжения и давления осуществляется по формуле $p = 10^{1,667 \cdot U - 11,33}$; $U = 6,8 + 0,6 \cdot \log_{10} p$, где p (мбар) и U (В).

Выходной сигнал зависит от типа измеряемого газа. Преобразователь отградуирован по азоту. Для регистрации давления по другим газам требуется учитывать поправочные коэффициенты, их можно ввести в блоке измерения. Поправочные коэффициенты датчика с холодным катодом: N₂, O₂, Co –1,0; H₂ –2,4; He –5,9; Ne –4,1; CO₂ –0,74; Ar –0,8; Kr –0,5; Xe –0,4.

При включении ионизационного датчика зажигание разряда, являющееся статистическим процессом, происходит с задержкой, растущей со снижением давления: 10⁻³ Па – примерно 1 с; 10⁻⁵ Па – примерно 20 с; 5·10⁻⁷ Па – примерно 2 мин.

Повторная регулировка манометра может стать необходимой из-за использования в различных климатических условиях, старения или загрязнения. Контур измерения с холодным катодом для низких давлений откалиброван на заводе и не регулируется. Измерительная схема Пирани может быть отрегулирована. Предусмотрена возможность повторной калибровки показаний датчика по атмосферному давлению и для нижнего диапазона давления 10⁻² Па.

В табл. 5.6 и на рис. 5.18, 5.19 приведены технические характеристики и параметры вакуумного датчика PKR251.

Таблица 5.6

Технические характеристики вакуумного датчика PKR251

Параметр	Значение
Тип преобразователя	Датчики Пирани и инверсно-магнетронный
Диапазон измерений	10 ⁵ – 5·10 ⁻⁷ Па
Точность измерений	10 ⁴ – 1·10 ⁻⁶ Па: приблизительно 30 %
Быстродействие	10 мс выше 1·10 ⁻⁴ Па; 1 с при 1·10 ⁻⁶ Па
Напряжение на катоде	3,3 кВ
Напряжение питания	15–30 В, постоянное
Выходной сигнал	0,5–10,5 В, Диапазон изм. 1,8–8,6 В, логарифмический 0,6 В/дек.
Последовательный интерфейс	RS485
Вакуумное соединение	KF25
Масса	700 г

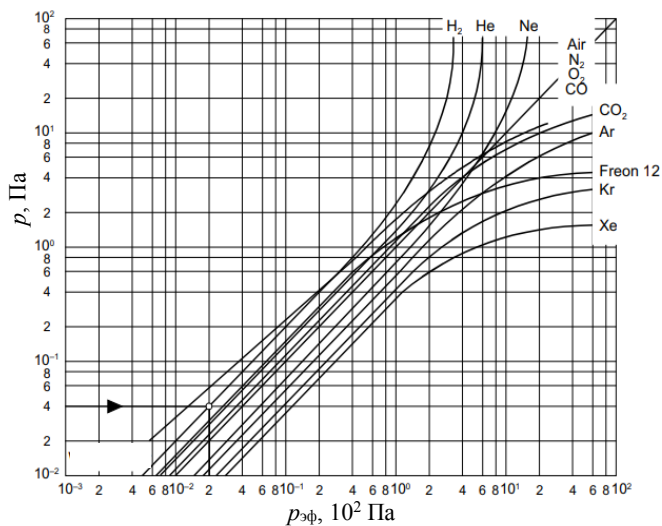


Рис. 5.18. Соотношение отображаемого и эффективного давления для датчика Пирани

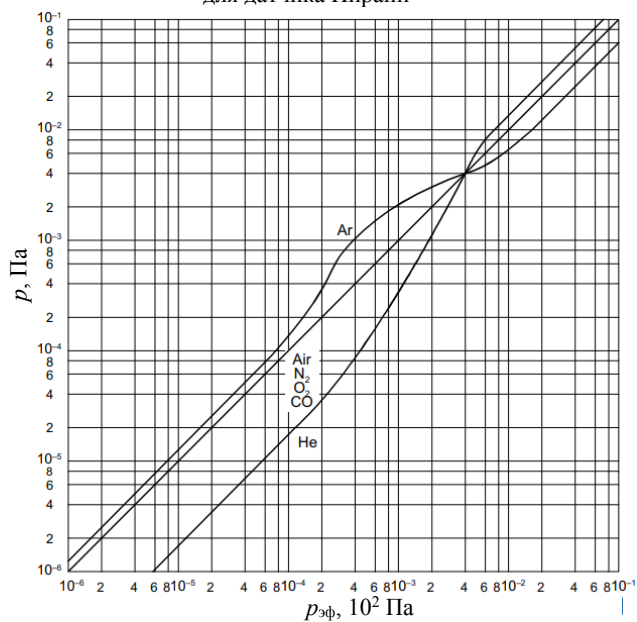


Рис. 5.19. Соотношение отображаемого и эффективного давления для датчика с холодным катодом

5.2.3. Вакуумметры *MultiTorr MTP4D, MTM9D, MTH10D*

Вакуумметры серии ERSTEVAK MultiTorr [2] представляют собой измерительные вакуумные преобразователи, содержащие разного типа активные вакуумные датчики со встроенной электроникой, имеющие также измерительный электронный блок с цифровым табло (рис. 5.20).



Рис. 5.20. Вакуумметры: 1 – MTP4D; 2 – MTM9D; 3 – MTH10D

Тепловой вакуумметр MTP4D [5] оснащен датчиком сопротивления (Пирани) с температурной компенсацией, измеряет давление в диапазоне 10^5 – $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Аналоговый выходной сигнал датчика 1,5–8,5 В находится в логарифмической зависимости от давления в пределах диапазона измерений:

$$U = \log p + 5,5; p = 10^{(U-5,5)}, \text{ где } U(\text{В}) \text{ и } p(\text{мбар}).$$

Широкодиапазонный вакуумметр MTM9D [6] имеет комбинированный датчик с двумя измерительными системами: тепловой (Пирани) и ионизационный с холодным катодом (инверсно-магнетронного типа). Измеряет давление в диапазоне 10^5 – $5,0 \cdot 10^{-7}$ Па. Датчик с холодным катодом автоматически управляется датчиком Пирани. Аналоговый выходной сигнал 1,8–8,6 В находится в логарифмической зависимости от давления в пределах всего диапазона измерений:

$$U = 0,6 \cdot \log p + 6,8; p = 10^{((U-6,8)/0,6)}, \text{ где } U(\text{В}) \text{ и } p(\text{мбар}).$$

Широкодиапазонный вакуумметр MTH10D [15] оснащен комбинированным датчиком, состоящим из двух измерительных систем:

тепловой (Пирани) и ионизационный с горячим катодом (типа Байарда–Альперта). Измеряет давление в диапазоне 10^5 – $5,0 \cdot 10^{-8}$ Па. Аналоговый выходной сигнал 1,219–8,6 В находится в логарифмической зависимости от давления в пределах всего диапазона:

$$U = 0,6 \cdot \log p + 6,8; p = 10^{((U-6,8)/0,6)}, \text{ где } U(\text{В}) \text{ и } p(\text{мбар}).$$

Отложение или адсорбция молекул газа на поверхности электродов горячего катода может привести к повышенному газовыделению в сверхвысоком вакууме или вызвать неустойчивость сигнала измерения. В таких случаях предусмотрена процедура очистки анода датчика от таких загрязнений с помощью обезгаживания. Данная процедура выполняется под давлением ниже $2,0 \cdot 10^{-4}$ Па путем омического нагрева анода до температуры 800 °С.

Вакуумметры МТР4D, МТМ9D, МТН10D предназначены для измерения полного давления. Ниже 1500 Па выходной сигнал датчиков зависит от типа и состава измеряемого газа. Вакуумметры отрегулированы для N₂ и сухого воздуха. В случае работы с другими газами можно настроить поправочные коэффициенты для датчиков разных типов с помощью интерфейса RS485. Далее микроконтроллер умножает результаты измерения датчика на соответствующий поправочный коэффициент. Это позволяет получить скорректированный сигнал давления ниже 10 Па.

Поправочный коэффициент датчика Пирани: Ar – 1,6; CO – 1,0; CO₂ – 0,89; H₂ – 0,57; He – 1,0; N₂ – 1,0; Ne – 1,4; Kr – 2,4.

Поправочный коэффициент ионизационных датчиков: Ar – 0,80; CO₂ – 0,74; H₂ – 2,4; He – 5,9; N₂ – 1,0; Ne – 3,5; Kr – 0,6; Xe – 0,41.

Вакуумные преобразователи обеспечивают аналоговый выходной сигнал датчиков и имеют последовательный интерфейс RS485 для передачи цифровых данных. На верхней панели вакуумметров находятся светодиодные индикаторы рабочих режимов и функциональная кнопка настройки (рис. 5.21).

Светодиодный индикатор состояния «Stat» сигнализирует о следующих рабочих состояниях (в зависимости от типа преобразователя):

зеленый светодиодный индикатор горит непрерывно – нормальная работа / горячий катод включен;

зеленый светодиодный индикатор медленно мигает – нормальная работа / горячий катод выключен;

зеленый светодиодный индикатор быстро мигает – подготовка ввода;

красный светодиодный индикатор горит непрерывно – ошибка;

красный светодиодный индикатор медленно мигает – дегазация включена (для горячего катода);

красный светодиодный индикатор быстро мигает – подготовка дегазации (для горячего катода);

оранжевый светодиодный индикатор горит непрерывно – предупреждение (нить горячего катода неисправна);

оранжевый светодиодный индикатор медленно мигает – готовность к регулировке;

оранжевый светодиодный индикатор быстро мигает – подготовка к регулировке.

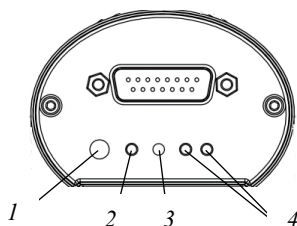


Рис. 5.21. Верхняя панель датчика: 1 – переключатель адреса;
2 – индикатор состояния «Stat»; 3 – кнопка «Adj»;
4 – индикаторы точки переключения «SP1», «SP2»

Кнопка «Adj» на вакуумметре позволяет включить функции «Регулировка» и «Дегазация».

Также вакуумметры содержат два независимых настраиваемых реле блокировки, срабатывание которых отображается индикаторами «SP1» и «SP2».

Вакуумметры имеют светодиодный цифровой дисплей с желтой подсветкой, на котором отображается измеренное фактическое давление. В случае ошибки в работе или неисправности цвет фона дисплея меняется на красный.

Рекомендуется вертикальная установка вакуумметров фланцем вниз, поскольку она предотвращает попадание частиц и конденсатов в измерительный элемент. Кроме того, измерительный преобразова-

тель отрегулирован в таком положении на заводе. Установка в другом положении без повторной регулировки снизит точность при измерении давления свыше 10^3 Па.

Повторную регулировку датчика Пирани во всех вакуумметрах для атмосферного или нулевого давления можно выполнить с помощью кнопки «Adj» (см. рис. 5.21). Преобразователь автоматически определит соответствующую регулировочную метку. При регулировке нуля фактическое давление должно быть менее $5,0 \cdot 10^{-3}$ Па.

Основные технические характеристики вакуумметров приведены в соответствующих табл. 5.6, 5.7 и 5.8.

Таблица 5.6

Технические характеристики МТР4D

Параметр	Значение
Тип преобразователя	Тепловой, датчик Пирани
Диапазон измерений	10^5 – $1 \cdot 10^{-2}$ Па
Точность измерений	10^5 – 2000 Па: прибл. 30 % от показания 2000 – $0,2$ Па: 10 % от показания ниже $0,2$ Па: около 30 %
Быстродействие	100 мс
Напряжение питания	20–30 В, постоянное
Выходной сигнал	0–10 В, мин. 10 кОм. Диапазон изм. 1,5–8,5 В, логарифмический
Последовательный интерфейс	RS485
Вакуумное соединение	KF16
Масса	190 г

Таблица 5.7

Технические характеристики МТМ9D

Параметр	Значение
Тип преобразователя	Датчики Пирани и инверсно-магнетронный
Диапазон измерений	10^5 – $5 \cdot 10^{-7}$ Па
Точность измерений	10^5 – 1000 Па: прибл. 30 % от показания 1000 – $0,2$ Па: 10 % от показания $2 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Па: около 25 %
Быстродействие	200 мс
Напряжение на катоде	2,5 кВ
Напряжение питания	20–30 В, постоянное
Выходной сигнал	0–10 В, мин. 10 кОм. Диапазон изм. 1,8–8,6 В, логарифмический
Последовательный интерфейс	RS485
Вакуумное соединение	KF25
Масса	555 г

Таблица 5.8

Технические характеристики МТН10D

Параметр	Значение
Тип преобразователя	Датчики Пирани и ионизационный Байярда–Альперта
Диапазон измерений	10^5 – $5 \cdot 10^{-8}$ Па
Точность измерений	10^5 – 1000 Па: прикл. 30 % от показания 1000 – $1 \cdot 10^{-6}$ Па: около 10 % от показания
Быстродействие	200 мс
Нити Байярда–Альперта	Иридий с иттриевым покрытием
Напряжение питания	20-30 В, постоянное
Выходной сигнал	0–10 В, мин. 10 кОм. Диапазон изм. 1,219–8,6 В, логарифмический
Последовательный интерфейс	RS485
Вакуумное соединение	KF25
Масса	475 г

5.2.4. Программное обеспечение MultiTorrGraph

Вакуумметры серии ERSTEVAK MultiTorr через последовательный интерфейс могут подключаться к компьютеру, тогда результаты измерений можно записывать и обрабатывать с помощью специального программного обеспечения ERSTEVAK MultiTorrGraph [2] (рис. 5.22).

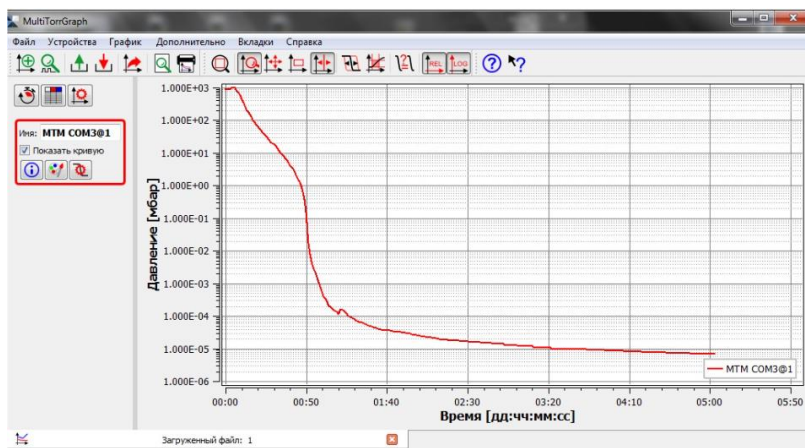


Рис. 5.22. Окно программы MultiTorrGraph

Программа обеспечивает построение графиков и сохранение данных измерений, обработку результатов измерений, а также удобную настройку таблицы всех параметров устройства.

Панель инструментов включает три элемента: панель инструментов «Файл», панель инструментов «График» и панель инструментов «Помощь». Они обеспечивают возможность быстрого доступа к определенным функциям.

Панель инструментов «Файл»



Значки (слева направо):

- новый график измерений;
- поиск устройств;
- открыть график;
- сохранить график;
- экспорт графика;
- просмотр графика перед печатью;
- печать графика.

Панель инструментов «График»



Значки (слева направо):

- изменение масштаба изображения;
- увеличение графика;
- перемещение графика;
- увеличение масштаба графика;
- отслеживание изменения значений кривой;
- перемещение кривой;
- счетчик скорости утечки/откачки;
- сравнительный анализ кривых;
- отображение оси времени в абсолютном/относительном выражении;
- отображение оси давления в линейном/логарифмическом стиле.

Перед началом процесса измерений необходимо подключить измерительный прибор и нажать кнопку поиска.



MultiTorrGraph выполняет поиск подключенных устройств.

Результат поиска отображается во всплывающем окне.

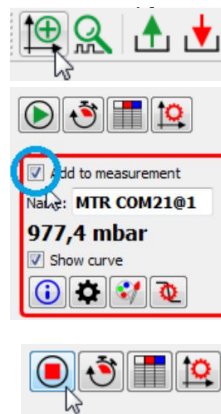
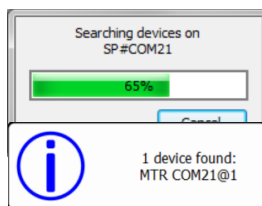
После обнаружения устройства можно открыть новый график измерений.

В левой части отображается список подключенных измерительных устройств. Выбрать устройство для запуска процесса измерений

и нажать кнопку



Для остановки процесса измерений нажать



5.3. Масс-спектрометрия

5.3.1. Масс-спектрометр квадрупольный SRS RGA200

Масс-спектрометр модели SRS RGA200 [19] состоит из квадрупольного зонда и электронного блока управления, который устанавливается непосредственно на фланец зонда и содержит всю электронику, необходимую для работы прибора (рис. 5.23).

Зонд представляет собой специально разработанную форму квадрупольного масс-спектрометра, состоит из трех частей: ионизатора, квадрупольного масс-фильтра и ионного детектора.

Принцип работы ионизатора аналогичен вакуумметру Баярда–Альперта, за исключением того, что в нем отсутствует центральный проволочный коллектор, а также добавлен экран для отражения электронов (рис. 5.24).

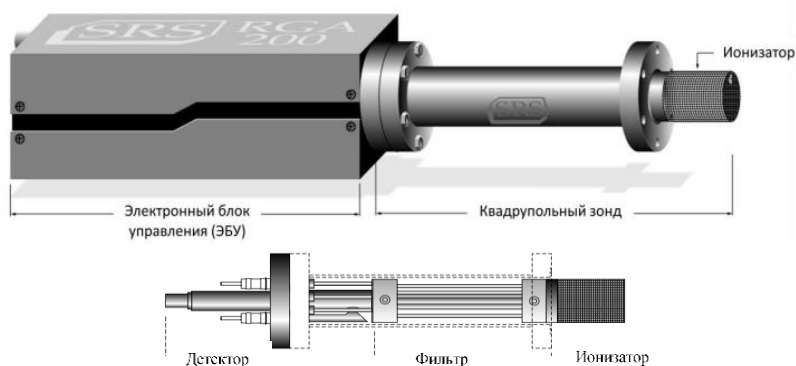


Рис. 5.23. Масс-спектрометр SRS RGA200

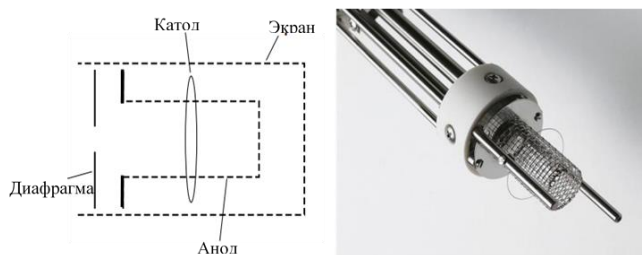


Рис. 5.24. Схема и внешний вид конструкции ионизатора

Основными частями ионизатора являются: отражательный экран, анодная сетка, нить накаливания катода и фокусирующая диафрагма.

Нить накаливания катода двойная, иридиевая. Катод работает при отрицательном потенциале относительно земли. Электроны, испускаемые термоэлектронной эмиссией, ускоряются по направлению к анодной сетке, которая положительно заряжена по отношению к нити накаливания и земле. Большинство электронов не ударяются об анод, а проходят через сетку, где они создают ионы в результате ударной ионизации. Электроны, которые проходят без ударений через объем сетки, выходят в область между анодной сет-

кой и отражающим экраном. Там они замедляются и снова ускоряются обратно к сетке электрическим полем. Такие колебания электронов увеличивают эффективность ионизации.

В объеме анодной сетки ионы притягиваются к центру отрицательным потенциалом, создаваемым повышенной плотностью электронов у оси. Из ионизатора ионы вытягиваются и фокусируются электрическим полем, создаваемым фокусирующей диафрагмой, которая находится под отрицательным потенциалом (относительно земли).

Ионизатор лучше всего подходит для работы в диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума (от 10^{-2} до 10^{-12} Па). Нелинейности ионных токов, объясняющиеся в основном эффектами пространственного заряда, следует ожидать при давлениях выше 10^{-3} Па. Эффекты нелинейности могут быть сведены к минимуму при работе на пониженных настройках тока электронной эмиссии.

Средняя энергия ионизирующих электронов устанавливается в диапазоне от 25 до 105 эВ. Выше порога ионизации эффективность ионизации линейно увеличивается с энергией электронов до тех пор, пока не будет достигнут максимум. Для большинства молекул этот максимум находится в диапазоне около 50–100 эВ, а для энергий электронов выше максимума эффективность ионизации медленно уменьшается с увеличением энергии электронов.

Напряжение смещения анодной сетки определяет кинетическую энергию ионов при их поступлении в ионный фильтр. Энергия ионов определяет время прохождения ионами фильтра, и, следовательно, ограничивает максимальное разрешение. С другой стороны, величины ионных токов (т.е. чувствительность) обычно увеличиваются с увеличением энергии ионов. Доступны два уровня энергии ионов (т.е. напряжения анодной сетки): 8 (низкий) или 12 эВ (высокий).

Отрицательный потенциал фокусирующей диафрагмы может быть отрегулирован на любое значение в диапазоне от 0 до -150 В. Диафрагма выполняет двойную функцию: вытягивает ионы из области анодной сетки и удерживает ионизирующие электроны внутри источника. Как правило, напряжение подбирается таким образом, чтобы оптимизировать ионные сигналы.

В табл. 5.9 приведены доступные настройки ионизатора, включая заводские значения по умолчанию.

Таблица 5.9

Настройки ионизатора RGA200

Параметр	По умолчанию	Диапазон
Энергия ионов, эВ	12	8, 12
Энергия электронов, эВ	70	25 – 105
Фокусирующее напряжение, В	-90	0 – -150
Ток эмиссии, мА	1	0 – 3,5

Квадрупольный фильтр масс (рис. 5.25) сконструирован из четырех электропроводящих цилиндрических стержней, которые точно удерживаются на месте набором из двух изоляторов из оксида алюминия высокой чистоты.

Стержни из нержавеющей стали (тип 304) имеют длину 4,5 дюйма, диаметр 0,250 дюйма (допуск 100 мкм), удерживаются в квадратуре и параллельно друг другу с допусками менее 300 мкм с помощью прецизионно отшлифованных проставок из оксида алюминия. Подпружиненные перфорированные винты крепят стержни к проставкам. Точное расположение стержней оптимизировано для минимизации искажения электродинамического квадрупольного поля за счет исключения членов потенциала более высокого порядка (мультипольных). Радиус окружности в пространстве внутри стержней составляет 0,109 дюйма. Рабочая частота $f = 2,7648$ МГц.



Рис. 5.25. Компоненты квадрупольного фильтра масс

На рис. 5.26 показана сборка детектора ионов, включая опцию умножителя электронов. Положительные ионы, проходящие через квадрупольный фильтр, фокусируются с помощью выходной заземленной диафрагмы и направляются в детектор. В детекторе ионные

токи измеряются напрямую цилиндром Фарадея (ЦФ), или с помощью дополнительного детектора с электронным умножителем (ЭУ) измеряется ток электронов, пропорциональный ионному току.

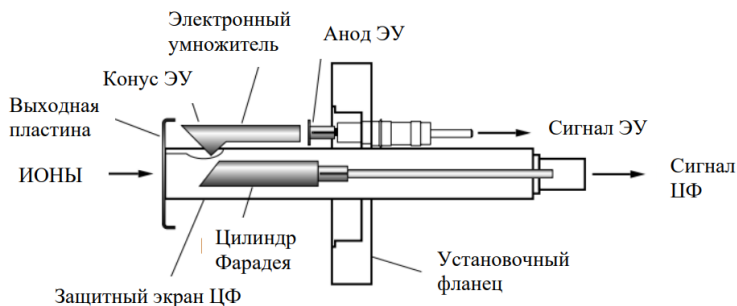


Рис. 5.26. Конструкция детектора ионов

Цилиндр Фарадея представляет собой небольшой металлический цилиндр (стакан) из нержавеющей стали (тип 304), расположенный по оси в конце квадруполя. Он экранирован от интенсивных радиочастотных и постоянных полей квадруполя заземленной выходной пластиной – диафрагмой, которая также обеспечивает некоторую фокусировку ионов в детекторе. Цилиндрическая трубка (защитный экран) окружает ЦФ, защищая его от сильных электродинамических потенциалов соседних стержней и от сторонних паразитных ионов. Сигнал по коаксиальному экранированному каналу передается на электрометр электронного блока управления масс-спектрометра. Детектор ЦФ измеряет падающий ионный ток напрямую. Положительные ионы попадают в заземленный детектор, ударяются о металлическую стенку и нейтрализуются путем переноса электронов от металла к иону. Поскольку номинальная чувствительность RGA составляет порядка 10^{-4} А/торр, измеряемые токи очень малы: от 10^{-9} до 10^{-15} А для давлений порядка 10^{-5} до 10^{-11} торр соответственно. Минимально обнаруживаемое парциальное давление с ЦФ возможно до $5 \cdot 10^{-11}$ торр. Однако в приложениях реального времени детекторы ЦФ редко используются для измерения парциального давления ниже 10^{-9} торр.

Достоинствами ЦФ являются: простота, стабильность, большой динамический диапазон. Все ионы регистрируются с одинаковой эффективностью независимо от их массы.

Электронный блок (ЭБ) включает в себя несколько регулируемых источников питания, микропроцессор, микропрограмму управления и стандартный порт передачи данных RS232. Питание осуществляется от внешнего источника питания 24 В постоянного тока (2,5 А). Встроенный логарифмический пикоамперметр с температурной компенсацией измеряет ионные токи, собранные цилиндром Фарадея. Электронный блок полностью автоматический и измеряет как положительные, так и отрицательные токи с одинаковой точностью и разрешением. Его рабочий диапазон охватывает амплитуды тока в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-15} А и обеспечивает динамический диапазон в шесть порядков при однократном измерении и сканировании массы, а также измеряет парциальные давления не хуже 10^{-11} Па при регистрации с помощью дополнительного электронного умножителя.

Светодиоды на задней панели ЭБ (рис. 5.27) обеспечивают постоянную обратную связь с информацией о состоянии нити накала, электронного умножителя, электронной системы, датчика и связи, а также предупреждают пользователя о любых проблемах.

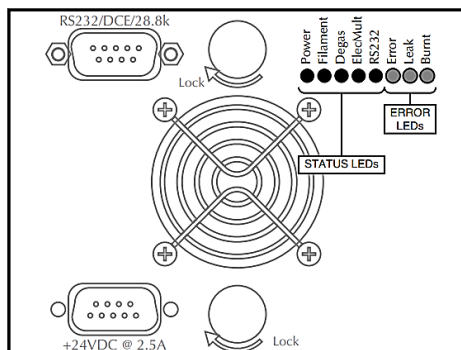


Рис. 5.27. Панель электронного блока

Индикаторы состояния (зеленые)

Питание («Power»): загорается при каждом успешном включении RGA.

Нить накаливания («Filament»): указывает на наличие тока электронной эмиссии в ионизаторе RGA.

Обезгаживание («Degas»): активируется во время процессов дегазации.

Электронный умножитель («ElecMult»): включается, когда детектор электронного умножителя активен.

Индикаторы ошибки (красные)

Ошибка («Error»): указывает на наличие ошибок в работе RGA.

Течь («Leak»): автоматически включается, когда нагреватель нити накаливания не может установить требуемый ток (обычно по причине течи).

Нить сгорела («Burnt»): загорается, когда ЭБ не обнаруживает нить накала.

Интеллектуальная прошивка, встроенная в блок RGA, полностью контролирует работу прибора и обеспечивает четыре основных режима работы масс-спектрометра:

аналоговое сканирование;

гистограммное сканирование;

измерение единственной массы;

полное измерение давления.

В табл. 5.10 приведены основные технические характеристики масс-спектрометра.

Таблица 5.10

Технические характеристики масс-спектрометра RGA200

Параметр	Значение
Тип анализатора	Квадрупольный
Диапазон анализируемых масс	1–200 а.е.м.
Детектор	Цилиндр Фарадея и сменный электронный умножитель
Рабочее давление	Ниже 10^{-2} Па
Минимально определяемое парциальное давление	$5 \cdot 10^{-9}$ Па (цилиндр Фарадея); $5 \cdot 10^{-12}$ Па (электронный умножитель)
Разрешение	Лучше 0,5 а.е.м. на пике 10 % по всему диапазону
Ионный источник	Открытый
Парциальная чувствительность ионного источника	$2 \cdot 10^{-6}$ А/Па (цилиндр Фарадея) по азоту
Катоды	Двойные иридиевые
Ток эмиссии	1 мА
Энергия электронов	70 эВ
Электропитание	24 В, 2,5 А, постоянный ток
Размер фланца	CF40
Вес	2,23 кг

5.3.2. Программное обеспечение SRS RGA

Запуск программного обеспечения RGA

Для запуска программного обеспечения RGA [20] дважды щелкнуть значок RGA в группе программ «SRS». Одновременно можно запустить только одну копию ПО RGA (рис. 5.28).

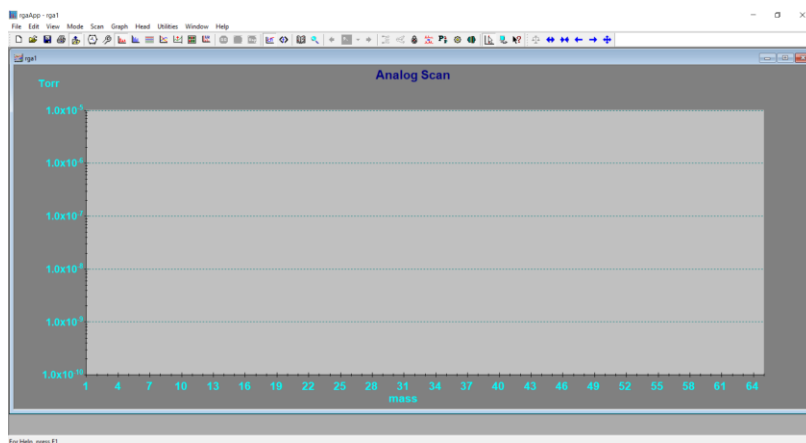


Рис. 5.28. Окно программы RGA

Чтобы подключиться к блоку RGA, выполните следующие действия:

- включите устройство SRS RGA;

- в главном меню выберите «Настройка списка соединений» (Connector List Setup) или нажмите кнопку быстрого доступа (кнопка RS232);

- в столбце разъемов выберите порт, к которому подключено устройство RGA;

- нажмите кнопку «Подключиться».

Соединение установлено, когда в столбце состояния отображается «Подключено» (Connected), кнопка RS232 отмечена флажком, кнопка «GO» на панели инструментов становится зеленой, а команды меню «Сканирование» (Scan) и «Устройство» (Head) становятся активными.

Сканирование в реальном времени

Выполните следующие действия:

выберите желаемый режим отображения (меню режимов или кнопку режима см. ниже);

включите нить накала через главное меню или кнопку «Нить накаливания» (Filament On);

выберите нужные параметры сканирования в меню «Сканирование» или кнопкой «Параметры»;

выберите желаемую частоту запуска (меню «Сканирование» или кнопкой «Расписание»);

выберите команду «Начать сканирование» (меню «Сканировать» или кнопкой «Пуск»).

Выключение системы RGA

Рекомендуемая процедура отключения следующая:

остановите сканирование, если оно выполняется, с помощью команды «Остановить сейчас» (Stop Now) в меню «Сканирование» или нажмите кнопку быстрого доступа (кнопка со знаком «Стоп»);

выключите нить накаливания, сняв флажок с команды «Нить накаливания» (Filament On) в меню «Устройство» или нажав кнопку быстрого доступа (кнопка с изображением нити накаливания);

сохраните файл RGA, над которым вы работали, с помощью команды «Сохранить» или «Сохранить как» в меню «Файл»;

завершите работу программы RGA, используя команду «Выход» в меню «Файл»;

выключите устройство RGA.

Режимы работы

В устройстве RGA имеется несколько различных режимов работы и отображения.



Аналоговый режим

Режим анализа спектра, общий для всех анализаторов остаточных газов. Графическое представление: ось X – диапазон масс, выбранный в «Параметрах сканирования» (Mass Spec Scan Parameters)

меню «Сканирование», ось Y – амплитуды ионного тока для каждого измеренного приращения массы, пересчитанные в единицы давления.

Для масштабирования данных можно использовать команду «Автомасштабирование» (AutoScale) в меню «График» (Graph).

В аналоговом режиме RGA сканирует от начальной до конечной массы с заданным шагом приращения массы (Points Per AMU), указанным в диалоговом окне «Параметры сканирования» или на кнопке быстрого доступа «Параметры».



Режим гистограммы

Отображаются отдельные амплитуды масс для выбранного диапазона сканирования. В этом режиме RGA выполняет захват пика и вычисляет одну амплитуду для каждой массы, ось X – диапазон масс, ось Y – амплитуды ионного тока для каждой измеряемой массы. Индикатор индекса массы расположен слева от оси X . Индекс отображает массу, которая в данный момент обновляется (при условии, что выполняется сканирование в реальном времени).



Режим таблицы

Отображаются показания предварительно выбранных газов в табличной форме, а также предупреждения об уровне опасности. Массы, названия и параметры газа можно задать с помощью меню «Сканирование» или кнопки быстрого вызова «Параметры».



Режим давления от времени

Представляет собой прокручиваемый график, отображающий до десяти масс газа на одном графике. График прокручивается влево по мере того, как данные заполняют экран, и данные сохраняются для просмотра в любое время. Массы, названия и параметры газа можно задать с помощью меню «Сканирование».



Режим проверки герметичности

Наиболее эффективный способ изучения поведения отдельного газа. Этот режим обеспечивает построение графика, который отслеживает динамику содержания газа в течение определенного периода времени, мгновенное считывание парциального давления, вакуумметр и аварийное сообщение. Массу газа, название и параметры сканирования можно настроить с помощью команды «Параметры сканирования...» (меню «Сканирование»).



Режим сигнализатора

Обеспечивает способ визуального контроля уровня предупреждения о наличии газа. График состоит из больших зеленых панелей, каждая из которых представляет уровень концентрации газа и тревоги. При достижении уровня тревоги цвет панели меняется на ярко-красный и отображается соответствующее тревожное сообщение. Массы, названия и параметры газа можно задать с помощью команды «Параметры таблицы» из меню «Сканирование».



Режим библиотеки

Выбранные шаблоны фрагментов газа библиотеки отображаются на гистограмме. При сопоставлении с гистограммой или аналоговым графиком диапазон масс библиотеки автоматически будет соответствовать диапазону этого графика для облегчения сравнения газов. Также возможен поиск и просмотр списка в библиотеке по команде



Коэффициенты чувствительности

Устройство RGA использует два коэффициента чувствительности: один для общего давления и один для парциального давления. Коэффициенты используются в качестве коэффициентов преобразования ионных токов, полученных от устройства, и единиц давления, выбранных пользователем.

5.3.3. Анализ масс-спектра

Описание спектрального анализа

Эта утилита предоставляет возможность быстрого анализа остаточного газа на основе полной гистограммы или аналогового сканирования. С помощью метода обращения матрицы анализируется состав остаточного газа, и наилучшее приближение к его составу дается либо в единицах давления, либо в процентах. Пользователь может анализировать до 12 распространенных газов. Эта функция доступна только во время активного сканирования.

Процедура анализа

Убедитесь, что окно RGA находится в аналоговом режиме или в режиме гистограммы и подключено к устройству RGA. Установить диапазон сканирования от 1 до, по меньшей мере, 50 а.е.м. Выполните следующее:

выберите команду «Настройки анализа» в меню «Утилиты», чтобы выбрать или отменить выбор газов из библиотеки для анализа;

выберите команду «Анализ» в меню «Утилиты» или нажмите кнопку «Анализ» на панели инструментов;

чтобы открыть диалоговое окно «Анализ спектра», выберите команду «Окно анализа» в разделе «Утилиты»;

нажмите кнопку «Настройка», если нужно изменить выбор газа или единицы анализа;

выберите команду «Пуск» в меню «Сканирование», чтобы начать сканирование;

когда сканирование будет завершено (достигнута стоп-масса), результаты анализа отобразятся в диалоговом окне «Спектральный анализ».

Анализ будет повторяться каждый раз, когда сканирование достигнет стоп-массы.

5.3.4. Состав остаточного газа

Программное обеспечение SRS RGA позволяет анализировать состав газов вакуумной системы двумя методами. Наиболее распространенным является измерение масс-спектра вакуума. Это обеспечивает «отпечаток пальца» остаточных газов в вакуумной системе (см. прил. 2). Второй метод заключается в отслеживании конкретных видов или пиков масс-спектра.

Основное назначение RGA – масс-спектрометр. На рис. 5.29 показан график зависимости парциального давления от массы, измеренной с помощью RGA. Сканирование было сделано для вакуумной системы, близко к предельному вакууму. Ось давления нанесена в логарифмическом масштабе, чтобы можно было увидеть большой диапазон. В логарифмическом масштабе пики кажутся шире, чем при построении в линейном масштабе. Сканирование от 1 до

75 а.е.м. показывает основные газы, обычно присутствующие в вакуумных камерах.

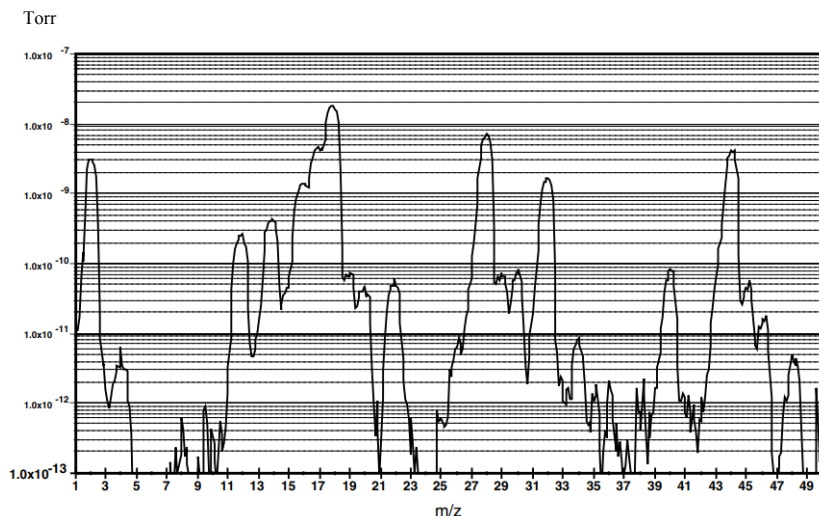


Рис. 5.29. Масс-спектр остаточного газа

Пиков много, но они обусловлены в основном семью видами. Водород находится под номером 2, а гелий – под номером 4. Вода дает пики под номерами 16, 17 и 18, обусловленные ионами O^+ , HO^+ и H_2O^+ . Меньшие пики при 19 и 20 обусловлены ^{18}O , который естественным образом присутствует в концентрации 0,2 %. Азот находится в пике номер 28, а также вызывает пики в номерах 14 для атомарного N^+ и дважды ионизированного N^{2+} . Молекулярный кислород показывает пик при номере 32, а изотопный пик – при 34. Аргон показывает пик при 40. Диоксид углерода имеет пик при 44, а пики CO_2^{++} и C^+ – при 22 и 12. Остальные пики вызваны фрагментами этих веществ и примесями.

Присутствие в спектрах компонентов воздуха могло бы заставить нас предположить то, что система негерметична, но это не так. Гибридный турбомолекулярный насос просто достиг предела сжатия. Форвакуумный насос работал при общем давлении 0,5 торр; при этом степень сжатия находится в диапазоне 10^8 (как указано в характеристиках турбонасоса). Азот, кислород и аргон присутствуют в

тех же соотношениях, что и стандартная атмосфера. Присутствие гелия интересно, поскольку его концентрация в атмосфере составляет около семи частей на миллион. Можно ожидать, что его пик будет на шесть порядков меньше пика азота. Низкая степень сжатия турбокомпрессора для гелия (10^5) объясняет, почему пик всего на три порядка меньше.

На рис. 5.30 представлен масс-спектр частого источника загрязнения вакуумных систем – масла. Наличие масла механического насоса сразу бросается в глаза. Пики масс 39, 41, 43, 55 и 57 вызваны обратным потоком масла механического насоса в вакуумную камеру. Общее давление в камере в основном создавалось водой и составляло менее $2 \cdot 10^{-8}$ торр. В этом случае общее давление может удовлетворять условиям эксплуатации, но спектры показывают, что система сильно загрязнена маслом. Это могло быть вызвано неправильной последовательностью включения клапанов или насыщенным маслоуловителем.

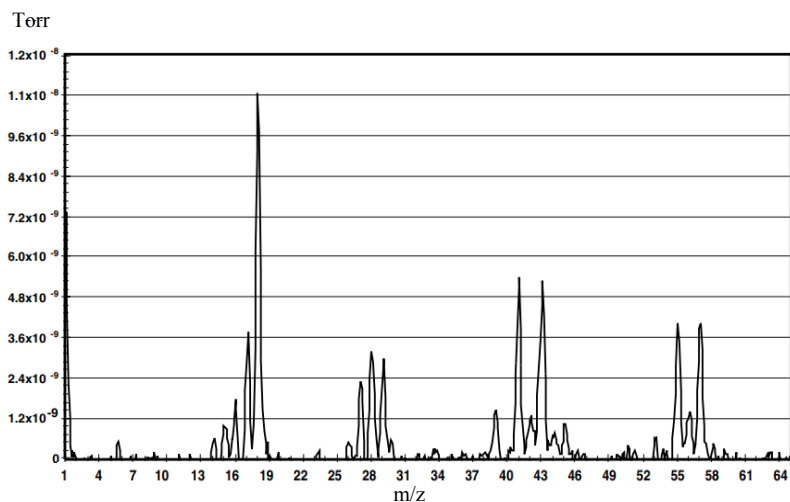


Рис. 5.30. Масс-спектр загрязнения маслом от насоса

5.4. Течеискание

5.4.1. Гелиевый течеискатель ТИ1-50М

Течеискатель масс-спектрометрический гелиевый модели ТИ1-50М «ГелиТест» [21] является универсальным автоматическим прибором, позволяющим производить предварительную откачку, а также работать как в режиме *прямого потока*, так и *обратного потока* с автоматическим выбором системой управления оптимального режима в зависимости от характеристик испытуемого объекта.

Первый принцип действия гелиевого течеискателя основан на методе прямого потока – «прямотока» (рис. 5.31, а).

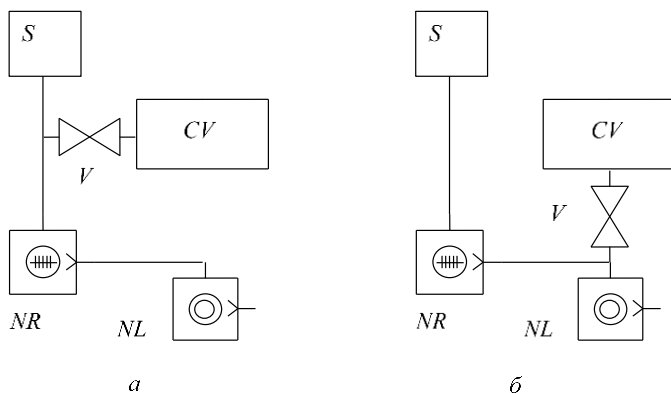


Рис. 5.31. Режимы работы гелиевого течеискателя:
а) на прямом потоке; б) на противотоке;
CV – тестируемая камера, V – входной клапан течеискателя,
S – масс-спектрометр, NR – турбомолекулярный насос,
NL – форвакуумный насос

При этом весь поток гелия проходит через высоковакуумную систему течеискателя, где масс-спектрометр измеряет парциальное давление проходящего гелия. При использовании метода обратного потока – «противотока» тестируемый объект не связан с высоким вакуумом (рис. 5.31, б). Вместо этого он связан с предварительным вакуумом (между турбомолекулярным насосом и форвакуумным насосом), так что весь поток газа, особенно водяные пары, не влияет

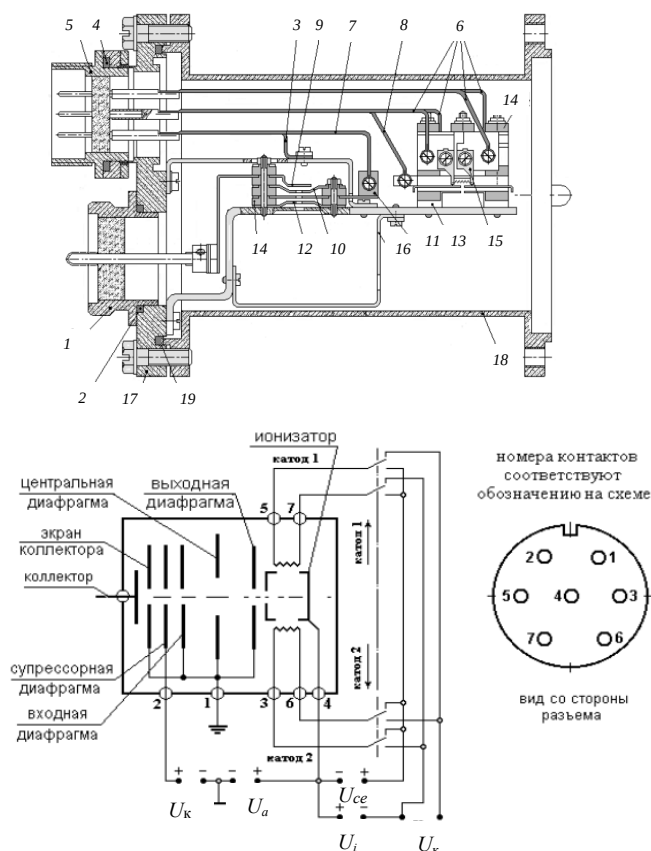
на давление в масс-спектрометре. Гелий, попадающий в предварительный вакуум, можно обнаружить, так как он способен двигаться к масс-спектрометру против направления откачки турбомолекулярного насоса. Это происходит из-за высокой тепловой скорости атомов гелия. Чувствительность данного метода не уступает чувствительности метода «прямотока» при верно подобранной комбинации мощности потока форвакуумного насоса и компрессии гелия в турбомолекулярном насосе.



Рис. 5.32. Течеискатель масс-спектрометрический гелиевый ТИ1-50М

Течеискатель ТИ1-50М (рис. 5.32) представляет собой высокочувствительный магнитный масс-спектрометр, настроенный на регистрацию потока пробного газа (гелия). Течеискатель состоит из вакуумной системы, клавиатуры и устройства индикации с центральным процессором, устройства питания анализатора, усилителей, каналов давления, устройства управления клапанами, электрометрического усилителя, а также источников питания.

Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрический анализатор, состоящий из ионного источника, магнитной системы, а также приемника ионов (рис. 5.33). В течеискателе применен статический магнитный анализатор с поворотом пучка на 180° и магнитной фокусировкой. Ионный источник состоит из двух катодов, ионизационной камеры, выходной диафрагмы 13. Катод 15 представляет собой спираль из вольфрамовой проволоки, приваренную к пластинам – электродам. Подача питания на электроды ионного источника и приемника ионов осуществляется через семиштырьковый герметичный разъем 5.



U_k – напряжение накала катода (1–6 В)
 U_a – ускоряющее напряжение (250–450 В)
 U_i – напряжение ионизации (0–150 В)
 U_{ce} – ускоряющее напряжение электронов (0–50 В)
 U_s – супрессорное напряжение (0–300 В)

Рис. 5.33. Масс-спектрометрический анализатор: 1 – герморазъем подключения электрометрического усилителя; 2 – уплотнитель герморазъема; 3 – токопровод центральной диафрагмы; 4 – уплотнитель герморазъема; 5 – герморазъем подключения источника ионов; 6 – токопроводы катодов К1, К2; 7 – токопровод супрессорной диафрагмы; 8 – токопровод ионизационной камеры; 9 – коллектор ионов; 10 – коллекторная диафрагма; 11 – супрессорная диафрагма; 12 – входная диафрагма; 13 – выходная диафрагма; 14 – изоляционные втулки; 15 – катод; 16 – диафрагма промежуточная; 17 – фланец; 18 – корпус анализатора; 19 – уплотнитель

Анализатор расположен в межполюсном зазоре магнитной системы с постоянными магнитами, обеспечивающей напряженность магнитного поля в пределах от 0,17 до 0,25 Тл. Радиус траектории ионов приблизительно равен 2,5 см. Изменением ускоряющего напряжения осуществляется настройка на «пик гелия», при которой в приемник ионов направляется максимум потока ионов гелия. Коллектор ионов 9 соединен с входом электрометрического усилителя, сигнал с которого подается на усилитель постоянного тока, а затем, после программной обработки, на устройство управления и индикации.

Вакуумная схема течеискателя ТИ1-50М приведена на рис. 5.34.

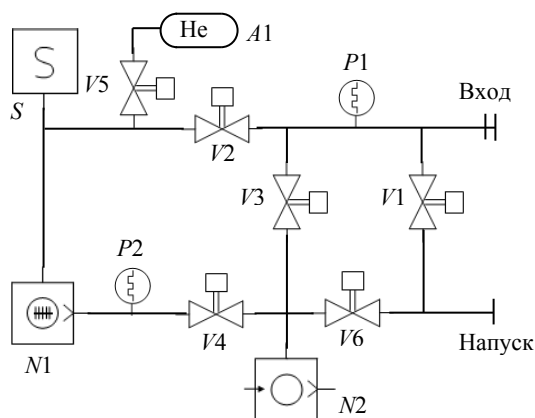


Рис. 5.34. Принципиальная вакуумная схема течеискателя ТИ1-50: S – анализатор масс-спектрометрический; V6 – нормально открытый электромагнитный клапан ДУ1.6; V1, V5 – нормально закрытый электромагнитный клапан ДУ1.6; V2, V3, V4 – нормально закрытый электромагнитный клапан ДУ16; N1 – насос турбомолекулярный; N2 – насос форвакуумный; A1 – течь гелиевая «Гелит-1»; P1, P2 – датчики давления

Вакуумирование объекта испытаний осуществляется откачной системой течеискателя, состоящей из форвакуумного насоса N2 объемного действия и высоковакуумного турбомолекулярного насоса N1. Предварительная откачка объекта до рабочего давления осуществляется через клапан V3 «Байпас». Работа течеискателя в режиме «противоток» осуществляется при открытых клапанах V3 и

И/4 «Откачка ТМН». Работа течеискателя в режиме «прямоток» осуществляется при открытых клапанах И/2 «Прямоток» и И/4. Клапан И/1 «Смена объекта» предназначен для напуска атмосферного воздуха в объект испытаний при его смене без остановки течеискателя. Клапан И/6 «Напуск» предназначен для напуска атмосферного воздуха в форвакуумную магистраль (на вход насоса И/2) при выключении течеискателя или аварийном отключении питания. Эта операция выполняется автоматически при отключении насоса и необходима для предотвращения перекачивания атмосферным давлением масла из картера насоса в вакуумную систему при его остановке. Клапан И/5 «Гелит» обеспечивает подключение контрольной течи. Контроль давления на входе течеискателя обеспечивается датчиком Р2. Контроль давления форвакуумной линии обеспечивается датчиком Р1.

Турбомолекулярный насос ТМГН-51М [22] (рис. 5.35), в целях увеличения степени сжатия и расширения диапазона допустимых входных давлений течеискателя в большую сторону, дополнительно оснащен вязкостной откачной ступенью (ступень Хольвека). Предельное остаточное давление не более $3 \cdot 10^{-6}$ Па; скорость откачки по азоту 55 л/с; скорость откачки по гелию 51 л/с; частота вращения ротора 50000 об/мин. Управление работой турбомолекулярного насоса осуществляется от контроллера, интегрированного в конструкцию турбомолекулярного насоса.



Рис. 5.35. Насос турбомолекулярный гибридный ТМГН-51М

В данной модификации течеискателя используется выносной пластинчато-роторный насос с масляным уплотнением VALUE VRD-4, установленный на стойке течеискателя. Быстрота действия насоса – 4 м³/ч, предельное давление – 0,5 Па.

Вакуумметры – низковакуумные тепловые (типа Пирани).

Встроенная калиброванная гелиевая течь типа «Гелит-1» служит для настройки анализатора и контроля потоков, регистрируемых течеискателем, (рис. 5.36). Течь воспроизводит неизменный по величине поток гелия при заданной температуре.

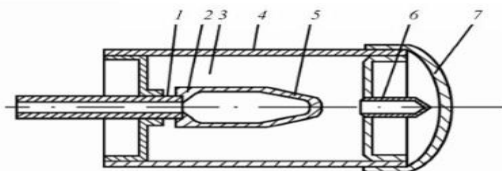


Рис. 5.36. Гелиевая течь «Гелит-1»: 1 – кварцевый патрубок; 2 – переход стекло-кварц; 3 – объем с гелием; 4 – корпус из нержавеющей стали; 5 – кварцевая мембрана (молибденовое стекло); 6 – капилляр напуска гелия, запаянный; 7 – колпак

Принцип действия течи основан на диффузии гелия сквозь проницаемый элемент, представляющий собой колбу из кварцевого или молибденового стекла. Внутри герметичного металлического баллона имеется трубка для подсоединения течи к испытуемой вакуумной системе. Стенки металлического баллона, выходной трубки и проницаемого элемента образуют замкнутый объем, заполненный гелием газообразным техническим до давления 20–100 кПа. В процессе работы происходит диффузия гелия через стенки колбы проницаемого элемента. Толщина стенки, площадь поверхности проницаемого элемента, а также давление гелия в баллоне определяют диапазон воспроизводимых потоков.

Для переключения вакуумной системы на различных режимах работы течеискателя используются электромагнитные клапаны (ДУ16). Клапаны имеют два режима работы: включения клапана и удержания. В режиме включения на обмотку клапана подается импульс тока 3,5 А напряжением более 80 В и продолжительностью 15–20 мс (форсировка). После срабатывания клапана на обмотку подается постоянное напряжение удержания, равное 24 В при токе в обмотке 0,3 А. Описанная схема питания катушек исключает перегрев обмотки при удержании клапана в открытом состоянии длительное время в процессе работы. Управление клапанами производится от устройства управления клапанами по командам системы управления течеискателем.

Технические характеристики течеискателя приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Технические характеристики течеискателя ТИ1-50М

Параметр	Значение
Диапазон измерений по входу течеискателя	$5 \cdot 10^{-13}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Па·м ³ /с
Диапазон показаний при работе способом шупа	$1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Па·м ³ /с
Время выхода в режим готовности, не более	5 мин
Быстрота действия высоковакуумного насоса	55 л/с
Производительность форвакуумного насоса	4 м ³ /с
Минимально регистрируемый поток, м ³ ·Па/с: режим «прямоток»; режим «противоток»; режим «шуп»	$5 \cdot 10^{-13}$; $4 \cdot 10^{-11}$; $1 \cdot 10^{-9}$
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, % от измеряемой величины: режим прямотока (диапазон измерения от $5 \cdot 10^{-13}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ Па·м ³ /с); режим противотока (диапазон измерения от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Па·м ³ /с); режим шупа	$\pm(0,30 + Q_{\text{нпн}}/Q_{\text{изм}}) \cdot 100$ ($Q_{\text{нпн}} = 5 \cdot 10^{-13}$ Па·м ³ /с); ± 50 ; не нормируется
Максимальное рабочее давление на входе, Па: в режиме «прямоток»; в режиме «противоток» без установки дроссельной диафрагмы; в режиме «противоток» с установкой дроссельной диафрагмы	20; 1000; 100000
Детектируемая масса	4 а.е.м.
Минимальное время реакции на поток пробного газа по входу	1 с
Напряжение питания переменного тока	220 ± 10 % В
Потребляемая мощность	1500 В·А
Вес	41 кг

5.4.2. Работа с течеискателем

Органы управления течеискателем

Управление течеискателем осуществляется при помощи клавиатуры и сенсорного экрана. Индикационные светодиоды обеспечивают визуализацию состояния вакуумной системы течеискателя как в ручном, так и в автоматическом режиме работы.

Внешний вид клавиатуры и органов управления течеискателя показан на рис. 5.37.

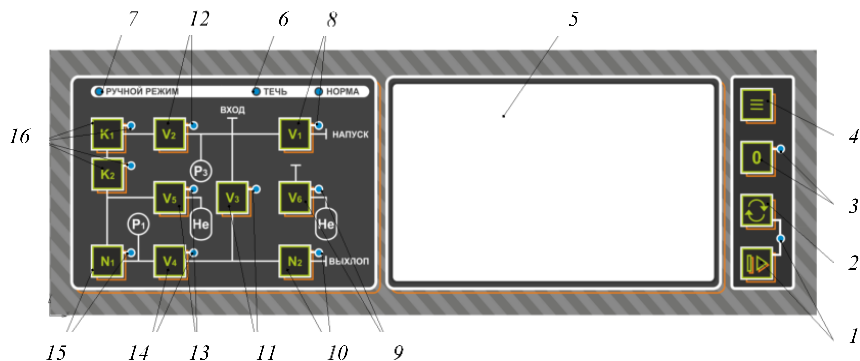


Рис. 5.37. Панель управления течеискателя: 1 – кнопка и индикатор «Старт/Стоп»; 2 – кнопка «Смена объекта»; 3 – кнопка и индикатор «Вычитание фона»; 4 – кнопка «Меню»; 5 – цветной сенсорный дисплей; 6 – индикатор «Течь»; 7 – индикатор «Ручной режим»; 8 – кнопка и индикатор клапана «Смена объекта»; 9 – кнопка и индикатор клапана внешней течи; 10 – кнопка и индикатор форвакуумного насоса N2; 11 – кнопка и индикатор клапана V3; 12 – кнопка и индикатор клапана V2; 13 – кнопка и индикатор клапана V5; 14 – кнопка и индикатор клапана V4; 15 – кнопка и индикатор насоса N1 (ТМН); 16 – кнопка и индикаторы включения катодов

На рис. 5.38 показан вид задней панели разъемов течеискателя для подключения внешних устройств и питания прибора. Здесь находятся блок подключения сетевого кабеля с предохранителем и выключателем питания, сетевой разъем подключения внешнего форвакуумного насоса, разъем подключения щупа, выход внутреннего форвакуумного насоса (при наличии), порт подключения магистрали очищенного газа для напуска на вход форвакуумного насоса, а также объекта испытаний.



Рис. 5.38. Задняя панель течеискателя

Назначение элементов интерфейса панели управления течеискателя приведено в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Элементы интерфейса панели управления ТИ1-50М

Элемент интерфейса	Описание / функция
Ручной режим	Индикация работы течеискателя в ручном/автоматическом режиме
Течь	Индикация наличия течи
Норма	Индикация состояния «Норма»
	Клавиша включения/выключения катода 1
	Клавиша «V2». Обеспечивает управление клапаном «прямотока»
	Клавиша «V1». Обеспечивает управление клапаном «Смена объекта»
	Клавиша включения/выключения катода 2
	Клавиша «V5». Обеспечивает подключение встроенной течи в процессе калибровки течеискателя
	Клавиша «V3». Обеспечивает управление клапаном предварительной откачки, а также режимом «противотока»
	Клавиша «V6». Обеспечивает подключение внешней течи в процессе калибровки течеискателя
	Клавиша «N1». Обеспечивает управление ТМН. Состояние ТМН отображается двухцветным индикатором
	Клавиша «V4». Обеспечивает управление клапаном откачки ТМН
	Клавиша «N2». Обеспечивает синхронное управление ФВН, а также его клапаном напуска
	Клавиша «Меню». Обеспечивает переключение экранов графического интерфейса
	Клавиша «Ноль». Обеспечивает привязку текущего значения сигнала к его фоновому значению (следающая компенсация фона)
	Клавиша «Смена объекта». Обеспечивает остановку цикла вакуумных испытаний и напуск атмосферы на вход течеискателя и испытуемый объект
	Клавиша «Старт/Стоп». Обеспечивает запуск/остановку цикла вакуумных испытаний в автоматическом режиме, а также прерывание текущего цикла автоматической подстройки/калибровки без сохранения его результатов

Расположение и описание клавиш на сенсорном экране показано на рис. 5.39.

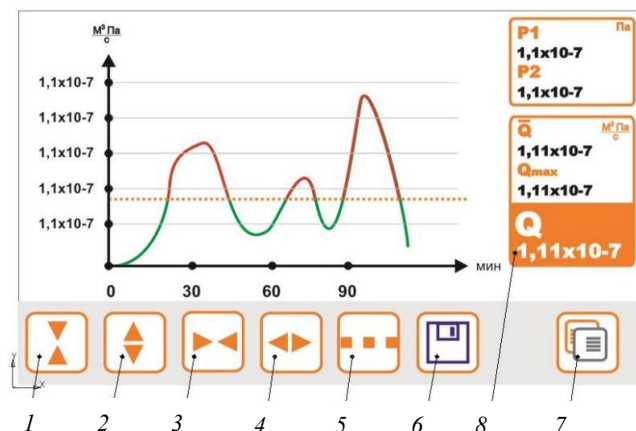


Рис. 5.39. Сенсорный экран управления течеискателем ТИ1-50М:
1 и 2 – клавиши масштаба графика по потоку; 3 и 4 – клавиши масштаба графика по времени; 5 – клавиша браковочного порога; 6 – клавиша сохранения результатов измерений; 7 – клавиша «Меню оператора»;
8 – индикация сигнала течеискателя в единицах потока

«Масштаб потока» – позволяет изменять масштаб графика по вертикальной оси (оси потока). Клавиша 1 – увеличивать масштаб графика, клавиша 2 – уменьшать.

«Масштаб времени» – значение этого параметра определяет величину временного интервала на графике потока, отображаемую на экране. Возможный диапазон значений – от 30 с до 600 мин.

«Браковка» – установка величины браковочного порога в текущих единицах измерения потока. При превышении текущим значением сигнала установленной величины браковочного порога активируется звуковая (если она разрешена в настройках течеискателя) и световая сигнализация наличия течи.

Режимы управления течеискателем

Система управления течеискателем имеет два функциональных меню: «Меню оператора» и «Меню настроек».

«Меню оператора» содержит следующие параметры.

«Калибровка» – режим предназначен для автоматической подстройки масс-спектрометра течеискателя на регистрацию пробного газа (гелия) путем изменения ускоряющего напряжения в небольших пределах. В результате в память течеискателя заносится новое значение ускоряющего напряжения, обеспечивающее наибольшее значение сигнала от встроенной гелиевой течи. Одновременно производится калибровка шкалы измерений, позволяющая сопоставить значение указанного сигнала с установленными в настройках единицами измерения величины потока. Рекомендуется периодически проводить автоматическую подстройку/калибровку в процессе работы (особенно при изменении внешних условий – температуры и влажности окружающей среды и т. п.), что гарантирует правильность настройки анализатора и, соответственно, достижение максимальной чувствительности прибора. Нажатие «Старт/Стоп» позволяет прервать текущий цикл автоматической калибровки, аннулировать его результаты и перевести течеискатель в режим готовности.

По окончании автоматической подстройки/калибровки выводится значение $Q_{\text{мин}}$ минимально регистрируемого потока гелия. При решении принять данные значения необходимо нажать кнопку «Ок» на сенсорном экране – в память течеискателя заносится достигнутое значение минимально регистрируемого потока по встроенной течи, и прибор переводится в режим готовности. В случае если необходимо повторно произвести калибровку, следует нажать кнопку «Повтор» и повторить процесс заново.

«Звуковая индикация» – установка этого параметра определяет наличие звукового сигнала при превышении величиной текущего сигнала браковочного порога. При этом высота тона звукового сигнала зависит от степени близости текущего значения сигнала к браковочному порогу, что позволяет судить о направлении изменения сигнала (уменьшении или увеличении) по звуку.

«Метод испытания» – устанавливает метод испытания: *универсальный* (он же автоматический) или *метод щупа*. Метод щупа используется только в специальной версии поставки течеискателя с возможностью использования подключения щупа на заднюю стенку течеискателя.

«Смена объекта» – кнопка дублирует клавишу смены объекта, расположенную на пленочной клавиатуре панели управления.

«Меню настроек» предназначено для установки параметров течеискателя, определяющих его функционирование во всех режимах работы, и содержит настройки, не требующие оперативного изменения, т.е. изменение которых, как правило, не требуется во время текущего цикла вакуумных испытаний. В зависимости от выбранной схемы испытаний, характеристик испытуемых объектов, требований технологических инструкций вакуумных испытаний и других факторов оптимальные значения настроек могут различаться. Вызов «Меню настроек» осуществляется при нажатии кнопки «Меню», расположенной на пленочной клавиатуре течеискателя, с последующим вводом корректного пароля. Кнопка «Меню» не доступна в процессе проведения испытаний в автоматическом режиме (т.е. нахождении прибора в режиме испытаний), а также в процессе проведения автоматической настройки/калибровки течеискателя.

Включение течеискателя

Установить выключатель «Сеть» на сетевом блоке в положение «I». При подаче питания должен включиться экран панели управления, отображающий заставку с названием прибора. В ходе запуска течеискателя производится тестирование всех элементов вакуумной системы. Происходит включение ФВН N2, открытие клапана V4 «Откачка ТМН» и, в случае достижения давления ниже 1000 Па, давление контролируется по датчику P1, выполняется запуск ТМН N1. По окончании запуска течеискатель переходит в «Режим готовности», о чем свидетельствует появление сообщения «Нажмите кнопку СТАРТ» на экране прибора. В процессе запуска и тестирования течеискателя возможен выход в экран настроек течеискателя, таким образом, он может быть переведен в «Сервисный режим» управления, что может использоваться для устранения неполадок в том случае, если прибор не может быть выведен автоматической системой управления в режим готовности в силу неисправности.

ВНИМАНИЕ! Не допускается транспортирование течеискателя, находящегося во включенном состоянии, во избежание повреждения опорных подшипников турбомолекулярного насоса из-за возникающего гироскопического момента сил на быстро вращающемся роторе турбомолекулярного насоса.

Проведение вакуумных испытаний

Режим вакуумных испытаний запускается кнопкой «Старт/Стоп» из экрана автоматического режима работы – «Режима готовности». Повторное нажатие кнопки прерывает режим, переводя течеискатель в состояние готовности. Режим также может быть прерван нажатием кнопки «Смена объекта» либо системой управления течеискателя автоматически при возникновении каких-либо ошибочных ситуаций.

Автоматический режим вакуумных испытаний включает в себя три фазы (состояния течеискателя):

1. Предварительная откачка объекта вакуумных испытаний. Режим предназначен для понижения давления на входе течеискателя до порога переключения в «противоток» (либо сразу «прямоток»). В этом режиме анализатор откачивается насосом $N1$, включается катод анализатора. Клапан $V3$ открыт, $V4$ закрыт. Осуществляется откачка насосом $N2$ входа течеискателя с присоединенным к нему объектом вакуумных испытаний вплоть до давления переключения течеискателя в режим «противотока» (либо «прямотока»). Для поддержания достаточного вакуума на выходе турбомолекулярного насоса в процессе длительной откачки внешнего объекта осуществляется периодическое закрытие $V3$ и открытие $V4$.

2. Режим «противотока». В этом режиме производится регистрация значения сигнала потока в противоточной схеме вакуумных испытаний. Анализатор откачивается насосом $N1$. Клапаны $V3$ и $V4$ открыты, обеспечивая откачку входа течеискателя и насоса $N1$ насосом $N2$. Переход в этот режим из режима предварительной откачки осуществляется при достижении давления $P2$ порога переключения в «противоток». Использование режима «противотока» позволяет работать с более высокими давлениями газа на входе течеискателя по сравнению с режимом прямого потока. Режим «противотока» используется при определении утечек с большой концентрацией гелия в месте утечки, для локализации течей по способу обдува или способу шупа.

3. Режим «прямотока». Наиболее чувствительный режим. Клапаны $V2$ и $V4$ открыты, $V3$ закрыт. Анализатор напрямую связан со входом течеискателя. Переход в него осуществляется в ходе вакуум-

ных испытаний из режима «противотока» либо предварительной от качки при достижении давления P_2 порога переключения в «прямоток». Режим «прямотока» осуществляется через клапан V_2 . Этот режим наиболее широко используется для определения степени негерметичности объекта по способу вакуумной камеры, накопления, а также способу обдува. Прямоточный режим является более чувствительным по сравнению с режимом «противотока» и позволяет определять наличие меньших концентраций гелия в исследуемом объеме.

Набор для обдува гелием

Комплект для обдува предназначен для использования в качестве инструмента для подачи пробного газа – гелия в места предполагаемой негерметичности изделий и/или вакуумных систем (установок) в момент проведения контроля герметичности с помощью гелиевого масс-спектрометрического течеискателя. Обдуватель имеет удлиненное сопло для обдува труднодоступных мест, а спиральный шланг делает процесс удобным. Длинный спусковой рычаг обдувателя обеспечивает плавный ход для более точной дозировки подачи газа. Максимально возможное давление в шланге и обдувателе – 8 кг/см².

5.5. Запорно-регулирующая арматура

5.5.1. Регулятор массового расхода газа РРГ-12 с блоком управления

Регулятор расхода газа модели РРГ-12 «Элточприбор» [17] (рис. 5.40) предназначен для регулирования потоков, напускаемых в рабочую камеру.

Регулятор представляет собой систему автоматического регулирования расхода газа на основе микропроцессора, имеющую электрический аналоговый и цифровой выходные сигналы, пропорциональные расходу газа. В основе измерительной части регулятора лежит принцип теплового преобразования массового расхода газа в электрический сигнал. Работа регулирующей части основана на принципе изменения площади проходного сечения газового канала

за счет перемещения запорного элемента исполнительного механизма. Направление газового потока указано стрелкой на корпусе регулятора.

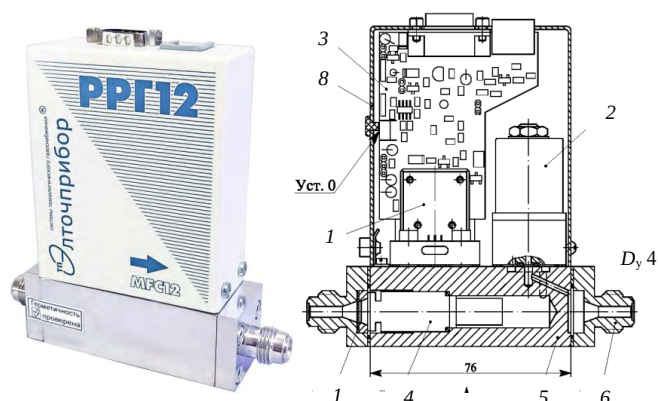


Рис. 5.40. Регулятор расхода газа РРГ-12: 1 – преобразователь первичный, 2 – механизм исполнительный, 3 – усилитель измерительный, 4 – байпас, 5 – корпус, 6 – штуцер, 7 – сетка-рассекатель, 8 – крышка

Газ поступает в регулятор через входной штуцер (см. рис. 5.40) и разделяется на два потока. Один проходит через преобразователь первичный 1, другой – через обводной канал – байпас 4. Преобразователь первичный представляет собой тонкостенную трубочку, внутри которой проходит газ, на ней расположены два теплоприемника – проволочные терморезисторы и нагреватель. При отсутствии газа оба терморезистора имеют одинаковое сопротивление. При наличии потока газа происходит охлаждение терморезистора, стоящего до нагревателя, и дополнительный нагрев терморезистора, расположенного после нагревателя. Чем больше скорость газа, тем более длинным будет участок нагретого газа после нагревателя, тем выше будет температура второго терморезистора. Разность сопротивлений преобразуется в цифровой сигнал, который обрабатывается в микропроцессоре (линеаризуется, термокомпенсируется) и затем сравнивается с цифровым сигналом задания расхода. По результатам вычисления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих разности сигнала и задания расхода микропроцессор управляет электромагнитным исполнительным механиз-

мом 2. Изменением соотношения длительностей нахождения клапана 2 в положениях «Открыто» и «Закрыто» регулируют поток рабочего газа, поступающего в камеру.

Выходной аналоговый электрический сигнал напряжения постоянного тока в диапазоне от 0 до 10 В пропорционален расходу газа (100 % расхода газа соответствует 10 В выходного напряжения).

Каждый регулятор расхода газа отградуирован на заводе-изготовителе на определенный расход по азоту. При необходимости использовать регулятор на других газах используются значения поправочных коэффициентов. При этом погрешность составит приблизительно 4 %. Технические характеристики регулятора расхода газа приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Основные характеристики РРГ-12

Параметр	Значение
Диаметр условного прохода Ду (DN), мм	4
$Q_{\text{вп}}$ – верхний предел диапазона регулирования расхода газа по азоту, нл/ч	0,36
Диапазон регулирования, %	2–100
Входное давление, диапазон, МПа (изб.)	0,03–0,3
Основная погрешность регулирования расхода газа	$\pm 1,2 \% Q_{\text{вп}}$
Время самопрогрева, мин	30
Задание расхода / аналоговый выход, В	0–5 / 0–10 (0–5)
Цифровой интерфейс	RS232, RS485
Протокол обмена	Modbus RTU, Элточприбор 10М
Разъемы	DB9F и RJ45
Напряжение питания / ток потребления, В/мА	+15 $\pm$ 3 % / 200
Вес нетто, кг, не более	1,0

Блок управления БУИП-1М

Блок управления модели БУИП-1М [18] (рис. 5.41) предназначен для обеспечения работы регуляторов массового расхода газа РРГ в режиме аналогового управления.

Управление БУИП происходит с помощью шести окон меню, в которых производят все необходимые установки. Последовательный переход между окнами возможен при нажатии на кнопку  «Вправо» или кнопку  «Влево». Выбор параметров возможен

кнопками  «Вверх» или  «Вниз» (величина больше или меньше), а также центральной кнопкой  «Меню».



Рис. 5.41. Блок управления модели БУИП-1М

1. Основное окно или окно управления.

Оно появляется сразу после включения прибора в сеть. В основном окне на индикаторе вверху производится установка «Задания» и управление регулятором. Для того чтобы изменить «Задание», необходимо нажать на центральную кнопку «Меню». На той цифре, которая доступна для изменения, появится мигающий прямоугольник. Нажимая кнопки «Вверх» или «Вниз», установите нужное значение «Задания». Кнопки «Вправо» или «Влево» позволяют перемещаться по разрядам сигнала задания. Если набранная цифра удовлетворяет, нажмите еще раз на центральную кнопку «Меню». Выбранное значение запишется в память процессора.

ЗАДАНИЕ	5,000 в
РАСХОД	0,00 л/ч

Для того чтобы полностью открыть или закрыть регулятор, необходимо нажать на кнопки «Вверх» – «Открыт», где в строчке «Расход» будет указано максимальное количество газа, проходящее через регулятор в выбранных единицах, или «Вниз» – тогда РРГ «Закрыт».

РРГ - ОТКРЫТ
РАСХОД 196 л/ч

РРГ - ЗАКРЫТ
РАСХОД 0,00 л/ч

2. Окно состояния РРГ.

Нажмите на кнопку «Вправо» и перейдите в окно состояния РРГ. В этом окне показывается, в каком состоянии находится РРГ. Надпись «Регул.» означает, что РРГ находится в режиме регулирования (есть еще два режима: «РРГ Открыт» и «РРГ Закрыт»). Далее максимальный расход газа в выбранных единицах измерения (вольты, литры в час, миллилитры в минуту). Задается

РЕГУЛ	3,6	л/ч
Внутр.	Красх	1,00

«Внутр.» (по умолчанию) или «Внешн.» управление. «Красх» – коэффициент газа, может устанавливаться в зависимости от рода газа, протекающего через РРГ. По умолчанию установлено 1,000, что соответствует сжатому воздуху или азоту.

3. Окно установки максимального расхода.

Нажмите на кнопку «Вправо» – перейдете в окно установки максимального расхода. Нажимая на кнопку «Вверх» или «Вниз», будете перемещаться по всей линейке расходов (0,36; 0,9; 3,6; 6; 9; 18; 36; 90; 180; 360; 720; 900; 1800 л/ч), выберите тот, который указан на крышке РРГ. Выбираем (0,36 л/ч) и нажимаем на центральную кнопку, затем нажимаем еще раз на центральную кнопку для подтверждения выбора.

3, 6	УСТ.	л/ч
МАХ	РАСХОД	()

4. Окно установки единиц измерения.

Нажмите на кнопку «Вправо» – перейдете в окно установки единиц измерения. Порядок тот же. Нажмите на кнопку «Вверх» или «Вниз», увидите справа сверху выбранные единицы измерения (вольты, литры в час, миллилитры в минуту). Выберите нужную величину и нажмите на центральную кнопку, затем еще раз для подтверждения.

	Уст.	л/ч
Ед. измерен.		()

5. Окно установки выбора задания.

Нажмите на кнопку «Вправо» – перейдете в окно установки выбора задания. Управление РРГ осуществляется или от самого блока, или от внешнего источника аналогового сигнала 5 В. Порядок тот же. Кнопками «Вверх» или «Вниз» выберите управление «Внешн.» или «Внутр.». Нажмите на центральную кнопку два раза для подтверждения выбора.

	Уст.	Внутр.
Выбор задания		()

6. Окно установки коэффициента газа.

Нажмите на кнопку «Вправо» – перейдете в окно установки коэффициента газа. Установка коэффициента дает возможность пересчета напряжения, выдаваемого регулятором в одну из выбранных величин измерения (вольты, литры в час, миллилитры в минуту) соответственно тому газу, который идет через РРГ. Нажмите на центральную кнопку, начнет мигать первая цифра. Используя кнопки «Вверх» (больше), «Вниз» (меньше) и «Влево», «Вправо» (переход на следующий разряд), установите нужную величину. Некоторые газы: азот, воздух – 1,00;

Красх = 1, 000	
Множ расхода	()

аргон – 1,45; двуокись углерода – 0,74; гелий – 1,454. Обратите внимание: не устанавливайте «Красх» равным нулю – иначе расход газа не будет индицироваться в основном окне.

Подготовка к работе с РРГ

Включить питание БУИП.

Появится первое окно – окно управления, отображаются задание и расход.

Некоторое время значения будут меняться. Прогрев блока занимает несколько секунд. Сам РРГ прогревается до получаса.

Установить ноль расхода (отверткой через боковое отверстие в крышке регулятора).

Установить верхний предел регулирования РРГ (указан на крышке РРГ). Для этого клавишей «Вправо» перейти в третье окно, клавишами «Вверх» и «Вниз» выбрать нужный расход. Подтвердить выбор двойным нажатием центральной клавиши.

Установить единицы расхода. Переходим в четвертое окно, выбираем единицы измерения и подтверждаем.

Выбрать вид установки задания. Переходим в пятое окно, выбрать тип задания – «Внутр.». Подтвердить выбор.

Установить вид газа. Переходим в шестое окно, центральной клавишей изменяем поправочный коэффициент газа (далее – клавишами «Вверх», «Вниз» и «Вправо»). Подтверждаем выбор.

Проверяем установленные параметры во втором окне.

5.5.3. Шиберный затвор СС63В

Шиберный затвор модели CBVAC СС63В [7] с уплотнением эластомерным кольцом и ручным приводом с сильфонным уплотнением представлен на рис. 5.42. Для открытия и закрытия необходима комбинация движений в двух направлениях. Во-первых, запорный элемент шиберного затвора может поступательно перемещаться перпендикулярно плоскости потока газов. В открытом состоянии запорный элемент находится в боковом «кармане» – специальной полости, так что проходное сечение затвора полностью открыто. Во-вторых, в момент открытия / закрытия необходимо движение запорного элемента в направлении оси газового потока. Это движение

обеспечивает деформацию эластомерного кольца и, соответственно, изоляцию вакуумных объемов друг от друга.



Рис. 5.42. Внешний вид шиберного затвора CC63B и схема привода затвора

В затворе CC63B используется ручной привод механизма затвора с механическим индикатором положения затвора. **Внимание: максимальный перепад давления на затворе перед открыванием – $3 \cdot 10^3$ Па (30 мбар)**, большой перепад давления может привести к поломке механизма затвора. Открытие затвора производится плавным вращением ручки привода против часовой стрелки, закрытие – по часовой стрелке, до упора. Индикатором положения затвора служит указатель на штоке привода затвора – головка винта, перемещающаяся в правое («Открыто») или левое («Закрыто») крайние положения. Характеристики затвора приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Технические характеристики вакуумного затвора CC63B

Параметр	Значение
Диапазон рабочего давления	От $1,3 \cdot 10^{-7}$ до $1,2 \cdot 10^5$ Па
Скорость натекания	$1,3 \cdot 10^{-7}$ Па·л/с
Перепад давления перед открыванием затвора	≤ 3000 Па в любом направлении
Материал затвора	AISI 304 нержавеющая сталь
Уплотнение	Фторкаучук, сильфон
Привод	Ручной
Диаметр фланца	DN63
Тип фланца	ISO F
Масса	6,5 кг

5.5.4. Угловой клапан MAV-HV-KF-16

Клапан угловой модели King Lai MAV-HV-KF-16 [8] тарельчатый с уплотнением эластомерным кольцом и ручным приводом с сильфонным уплотнением показан на рис. 5.43.



Рис. 5.43. Внешний вид углового клапана модели MAV-HV-KF-16 и схема привода углового клапана

Основными элементами запорного тарельчатого клапана являются корпус с присоединительными фланцами и седлом и шток с тарелкой с уплотнением. Седло – часть корпуса клапана с обработанной гладкой поверхностью, по которой происходит герметизация. Поступательное движение штока клапана обеспечивает перемещение тарелки с уплотнением. Открытие клапана производится плавным вращением ручки привода против часовой стрелки, закрытие – по часовой стрелке, до упора. В закрытом состоянии тарелка с уплотнением прижимается к неподвижному седлу, изолируя друг от друга вакуумные объемы. В качестве уплотнения используется кольцо с круглым сечением из эластомерного материала, зафиксированное в проточке тарелки. Данная серия вакуумных клапанов имеет сильфонное уплотнение штока, что с точки зрения вакуумных технологий является более предпочтительным вариантом по сравнению с уплотнением штока с помощью витонového кольца. Характеристики клапана приведены в табл. 5.15.

Таблица 5.15

Технические характеристики клапана MAV-HV-KF-16

Параметр	Величина
Диапазон рабочего давления	От $1,3 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^5$ Па
Скорость натекания	$1,3 \cdot 10^{-7}$ Па·л/с
Перепад давления перед открыванием затвора	$2 \cdot 10^5$ Па
Материал затвора	Нержавеющая сталь, алюминий
Уплотнение	Фторкаучук, сильфон
Привод	Ручной
Диаметр фланца	DN16
Тип фланца	KF
Масса	0,8 кг

5.5.5. Клапан регулировки потока 2701 KF16-0,8

Клапан регулировки потока (натекатель) модели 2701 KF16-0,8 [2] ручной механический игольчатого типа изображен на рис. 5.44. Ручные натекатели (игольчатые клапаны, прецизионные клапаны напуска) предназначены для тонкой регулировки потока подачи рабочего газа в вакуумную камеру. С помощью прецизионной винтовой передачи с малым шагом регулируют величину зазора между конусной иглой и отверстием (седлом), тем самым изменяя площадь сечения отверстия. Положение накателя регулируется плавным поворотом регулирующей головки: против часовой стрелки – «Открыто», по часовой стрелке до легкого упора – «Закрыто». Характеристики клапана регулировки приведены в табл. 5.16.



Рис. 5.44. Внешний вид клапана регулировки потока 2701 KF16-0,8

Таблица 5.16

Технические характеристики накателя 2701 KF16-0,8

Параметр	Значение
Диапазон рабочего давления	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1,2 \cdot 10^5$ Па
Минимальный регулируемый поток	$4,7 \cdot 10^{-3}$ Па·л/с
Максимальный поток	$1,4 \cdot 10^3$ Па·л/с
Перепад давления перед открыванием затвора	$1,2 \cdot 10^5$ Па в любом направлении
Натекание	$1,3 \cdot 10^{-7}$ Па·л/с
Уплотнение	Игольчатое
Привод	Ручной, винтовая передача
Диаметр проходного отверстия	DN 0,8
Тип фланца	KF16
Масса	0,48 кг

Список литературных источников и интернет-ресурсов

1. Руководство по эксплуатации. Турбомолекулярные насосы KUKY FF-40/25(J), FF-63/80(HV,FE,HVFE). ООО «Эрствак».
2. ООО «Эрствак», <http://www.erstvak.com> (дата обращения: 21.11.2022).
3. Руководство по эксплуатации. Контроллеры ТС-100/ТСР-100/ТСР-240. ООО «Эрствак».
4. Руководство по эксплуатации. Двухступенчатые маслonaполненные пластинчато-роторные вакуумные насосы. Серия VRD. ООО «Эрствак».
5. Руководство по эксплуатации. Измерительный вакуумный преобразователь МТР4D-KF16, МТР4D-CF16. ООО «Эрствак».
6. Руководство по эксплуатации. Измерительный вакуумный преобразователь МТМ9D-KF25, МТМ9D-CF40. ООО «Эрствак».
7. Руководство по эксплуатации. Сверхвысоковакуумные затворы. Тип CCQ, CC, CCD. ООО «Эрствак».
8. Руководство по эксплуатации. Ручные угловые клапаны MAV. ООО «Эрствак».
9. Operating instructions HiCube 80 Eco Turbo pumping station (PT0263BE/A).
10. Operating instructions DCU002/110/180/310/ 400 Display Control Unit (PT0250BEN).
11. Operating instructions HiPace 80 Turbopump (PT0208BN).
12. Operating instructions MVP015-2 / MVP015-4 DC Diafragm Pumps (PU0070BEN/C).
13. Operating instructions Capacitance Diaphragm Type Absolute Pressure transmitter KYM240. KUKY Technology.
14. Operating instructions Three-channel Vacuum Controller KGC-103/KGC-101. KUKY Technology.
15. Руководство по эксплуатации. Измерительный вакуумный преобразователь МТН10D-KF40, МТН10D-CF40. ООО «Эрствак».
16. Operating instructions PKR251 Pirani/Cold cathode gauge (BG5155BEN).
17. Регулятор расхода газа РРГ-12. Руководство по эксплуатации БРАГ.421413.004ТО. ООО «Элточприбор».
18. ООО «Элточприбор», <http://www.eltochpribor.ru> (дата обращения: 17.10.2022).

18. ООО «Элточприбор», <http://www.eltochpribor.ru> (дата обращения: 17.10.2022).

19. Краткое руководство по эксплуатации. Модели RGA100, RGA200 и RGA300, SRS. Анализатор остаточных газов (версия 1.8). ГК «Криосистемы».

20. Сайт программы RGA Windows <https://www.thinksrs.com> (дата обращения: 14.06.2022).

21. Течеискатель масс-спектрометрический гелиевый ТИ1-50М «ГелиТест». Руководство по эксплуатации ГТКБ.033.00.000 РЭ. НПО «Геликон».

22. ООО «НПО «Геликон», <http://www.gelikonspb.ru> (дата обращения: 15.09.2023).

Список рекомендуемой литературы

1. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009.
2. Справочник по вакуумной технике и технологиям/ Под ред. Д. Хоффман, Б. Сингха, Дж. Томаса III; Пер. с англ. Ю.Л. Цвирко; Под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова. М.: Техносфера, 2011.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007.
4. Шатохин В.Л. Вакуумная техника: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.
5. Шестак В.П. Вакуумная техника. Концепция разреженного газа: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

Соотношения между единицами измерений

Давление:

1 торр (мм рт. ст.) = 133,3 Па (Н/м²) = 1,333 мбар;

1 Па = 0,01 мбар = $7,5 \cdot 10^{-3}$ торр;

1 мбар = 100 Па = 0,75 торр.

Быстрота действия (скорость откачки), проводимость:

1 м³/ч = 0,278 л/с = 278 см³/с;

1 л/с = 103 см³/с = 3,6 м³/ч;

1 см³/с = $3,6 \cdot 10^{-3}$ м³/ч = 10^{-3} л/с.

Поток, производительность:

1 торр·л/с = 0,133 Па·м³/с = 1,33 мбар·л/с = 1,3 sccs;

1 Па·м³/с (Вт) = 10 мбар·л/с = 10 sccm = 7,5 торр·л/с;

1 мбар·л/с = 1 sccs = 0,75 торр·л/с = 0,1 Па·м³/с;

1 sccs (атм.·см³/с) = 0,76 торр·л/с = 0,1 Па·м³/с = 1 мбар·л/с.

Примечание: sccs – стандартный кубический сантиметр в секунду (англ. – standard cubic centimeters per second, std.cm³/s); единицы измерения потока в см³/с при стандартных температуре (0 °С) и давлении (760 мм. рт. ст.)

Источники остаточного газа

Пик массы, а.е.м.	Газ	Источник
2	Водород H_2	1. Десорбция из материалов; 2. Диссоциация паров воды; 3. Диссоциация рабочих жидкостей. Основной компонент в сверхвысоковакуумных системах
4	Гелий He	1. Следы течеискания; 2. Проникновение через материалы – стекло и эластомеры (витон)
16	Метан CH_4	Синтезируется на поверхности титана в системах с магниторазрядным и испарительным насосами. Характеризуется семейством пиков масс-спектра с соотношением амплитуд: 13(CH^+); 14(CH_2^+); 15(CH_3^+); 16(CH_4^+); 8 % 16 % 85 % 100 %
17	Аммиак NH_3	Если пик 17 массы превосходит 18-й пик, возможна течь. Проникающий N_2 реагирует с остаточным H_2 с образованием NH_3
18	Вода H_2O	Десорбция хемосорбированных молекул воды с внутренних поверхностей. Является основным компонентом остаточной среды в непрогретой системе. Определяется семейством пиков в спектре: 16(O^+); 17(OH^+); 18(H_2O^+); 2 % 25 % 100 %
16 19 23 35/37 39	Кислород O Фтор F Натрий Na Хлор Cl Калий K	Продукты электронно-стимулированной десорбции с поверхностей в ионизаторе масс-спектрометра. Присутствует группа пиков
20	Неон Ne	Соотношение амплитуд пиков 20/22 примерно 10/1
22	Изотоп Ne	В основном – проявление остаточного атмосферного газа в системах откачки с магниторазрядным насосом. Большая амплитуда 22 пика может являться CO^{2+}
28	Оксид CO	Синтезируется на нити накала. Как правило, является составляющей пика 28 массы

28	Азот N ₂	Вероятность течи (мнимой), подтверждается присутствием пика массы 14(N ⁺) с соотношением N ⁺ /N ₂ ⁺ ~7 %
30	Окись NO	Реакция N ₂ + O ₂ на нити накала
32	Кислород O ₂	Как правило, значительный пик свидетельствует о наличии натекания
40	Аргон Ar	В случае течи – большой пик в системе откачки с ионно-сорбционным насосом
44	Оксид CO ₂	1. Десорбция с непрогретых поверхностей. Наблюдается соотношение пиков масс 22 (CO ₂ ²⁺) и 44 (CO ₂ ⁺) как 1/10; 2. Синтезируется на нити накала. Концентрация CO ₂ всегда выше в системах откачки с испарительным насосом вследствие реакции CO и O ₂
16 30 44 58	CH ₄ C ₂ H ₆ C ₃ H ₈ C ₄ H ₁₀	Группа пиков с приращением на 14 а.е.м. (CH ₂ ⁺) типична для углеводородных загрязнений, основным источником которых является вращательный насос (вакуумное масло)
41 43	Углеводородные загрязнения	Разрушение (деградация) углеводородных пластикоподобных материалов
53	Ацетон	Продукты разложения. Присутствуют пики: 19 (20 %), 43 (100 %), 58 (28 %)
130	Трихлорэтилен	Продукты разложения, основные пики: 60 (65 %), 95 (100 %), 130 (89 %), 132 (85 %)

Вакуумная гигиена

При работе с вакуумным оборудованием наряду с правилами по технике безопасности необходимо соблюдать ряд специальных правил вакуумной гигиены, предусматривающих предохранение вакуумных приборов и установок от попадания в них разного рода загрязнений (механических частиц, пыли, масел, воды и др.). 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.

При нахождении и работе в лаборатории вакуумной техники следует неукоснительно придерживаться следующих правил:

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

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

3. Все открытые вакуумные поверхности и уплотнения после контакта с окружающей средой и при контакте с руками перед монтажом на экспериментальный стенд необходимо проверить на наличие загрязнений, царапин, порезов и обезжирить, протирая безворсовой тканью, смоченной обезжиривающей жидкостью.

4. 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.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ	3
<i>Глава I. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ (лабораторная работа I).....</i>	5
1.1. Общие сведения	5
1.1.1. Откачка вакуумной системы.....	5
1.1.2. Проводимость вакуумных элементов.....	7
1.1.3. Этапы вакуумной откачки.....	8
1.1.4. Вакуумные насосы.....	10
1.2. Лабораторная установка № 1	17
1.3. Порядок выполнения.....	19
1.3.1. Подготовка к выполнению работы.....	19
1.3.2. Низковакуумная откачка установки (<i>задание 1</i>).....	20
1.3.3. Высоковакуумная откачка установки (<i>задание 2</i>).....	21
1.3.4. Оценка газовой нагрузки в вакуумных камерах (<i>задание 3</i>).....	22
1.3.5. Определение скорости действия насоса (<i>задание 4</i>)...	22
1.3.6. Выключение установки.....	23
Контрольные вопросы.....	24
<i>Глава II. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА И ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ (лабораторная работа 2).....</i>	25
2.1. Общие сведения.....	25
2.1.1. Характеристики вакуумных измерений.....	25
2.1.2. Вакуумметрия.....	26
2.1.3. Градуировка вакуумметров.....	37
2.2. Лабораторная установка № 2	40
2.3. Порядок выполнения.....	42
2.3.1. Подготовка к выполнению работы.....	42
2.3.2. Измерение низкого вакуума, статическая градуировка вакуумметров (<i>задание 1</i>).....	43
2.3.3. Измерение высокого вакуума, динамическая градуировка вакуумметров (<i>задание 2</i>).....	44
2.3.4. Оценка относительного коэффициента чувствительности вакуумметров (<i>задание 3</i>).....	46
2.3.5. Измерение эффективной скорости откачки ТМН (<i>задание 4</i>).....	48
2.3.6. Выключение установки.....	49
Контрольные вопросы.....	49

<i>Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО ГАЗА (лабораторная работа 3).....</i>	<i>50</i>
3.1. Общие сведения.....	50
3.1.1. Состав остаточных газов.....	50
3.1.2. Масс-спектрометрия.....	51
3.1.3. Квадрупольный масс-спектрометр.....	54
3.1.4. Расшифровка масс-спектров остаточных газов.....	57
3.1.5. Определение парциальных давлений.....	59
3.2. Лабораторная установка № 3.....	60
3.3. Порядок выполнения.....	62
3.3.1. Подготовка к выполнению работы.....	62
3.3.2. Откачка установки (<i>задание 1</i>).....	63
3.3.3. Получение масс-спектра остаточного газа (<i>задание 2</i>).....	64
3.3.4. Анализ масс-спектра (<i>задание 3</i>).....	66
3.3.5. Выключение установки.....	67
Контрольные вопросы.....	67
<i>Глава IV. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНИКИ ТЕЧЕИСКАНИЯ (лабораторная работа 4).....</i>	<i>69</i>
4.1. Общие сведения.....	69
4.1.1. Герметичность вакуумной системы и течеискание.....	69
4.1.2. Гелиевые течеискатели.....	72
4.1.3. Чувствительность течеискания.....	75
4.1.4. Способы течеискания.....	78
4.2. Лабораторная установка № 4.....	81
4.3. Порядок выполнения.....	82
4.3.1. Подготовка к выполнению работы.....	82
4.3.2. Включение течеискателя, проверка работоспособности (<i>задание 1</i>).....	83
4.3.3. Определение эффективности системы откачки течеискателя (<i>задание 2</i>).....	85
4.3.4. Калибровка течеискателя (<i>задание 3</i>).....	86
4.3.5. Выполнение процедуры течеискания (<i>задание 4</i>).....	87
4.3.6. Выключение установки.....	88
Контрольные вопросы.....	88
<i>Глава V. ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ.....</i>	<i>89</i>
5.1. Вакуумные насосы.....	89
5.1.1. Турбомолекулярный насос FF63/80 с блоком управления TSP100.....	89
5.1.2. Турбомолекулярный насос HiPace 80.....	92
5.1.3. Мембранные насосы MVP 015-2 DC и MVP 015-4 DC.....	95
5.1.4. Пластинчато-роторный насос VRD-4.....	97
5.1.5. Вакуумный откачной пост HiCube 80 Eco.....	99

5.2. Вакуумметрия.....	102
5.2.1. Мембранный емкостной датчик KYM-240 с контроллером KGC101.....	102
5.2.2. Широкодиапазонный вакуумметр PKR251.....	105
5.2.3. Вакуумметры MultiTorr MTP4D, MTM9D, MTH10D..	108
5.2.4. Программное обеспечение MultiTorrGraph.....	112
5.3. Масс-спектрометрия.....	114
5.3.1. Масс-спектрометр квадрупольный SRS RGA200.....	114
5.3.2. Программное обеспечение SRS RGA	121
5.3.3. Анализ масс-спектра.....	124
5.3.4. Состав остаточного газа.....	125
5.4. Течеискание.....	128
5.4.1. Гелиевый течеискатель ТИ1-50М.....	128
5.4.2. Работа с течеискателем.....	134
5.5. Запорно-регулирующая арматура.....	141
5.5.1. Регулятор массового расхода газа РРГ-12 с блоком управления.....	141
5.5.3. Шиберный затвор СС63В.....	146
5.5.4. Угловой клапан MAV-HV-KF-16.....	147
5.5.5. Клапан регулировки потока 2701 KF16-0,8.....	149
Список литературных источников и интернет-ресурсов.....	150
Список рекомендуемой литературы.....	152
Приложение 1. Соотношения между единицами измерений....	153
Приложение 2. Источники остаточного газа.....	154
Приложение 3. Вакуумная гигиена.....	156

Вадим Леонидович Шатохин

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ**

Учебно-методическое пособие

Редактор Е.Е. Шумакова
Оригинал-макет подготовлен В.Л. Шатохиным

Подписано в печать 05.05.2025. Формат 60х84 1/16.

Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 10. Тираж 50 экз.

Изд. № 001-1. Заказ № 32.

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ».

115409, Москва, Каширское ш., 31.

Типография НИЯУ МИФИ