

1.7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Цель лекции: изучить классификацию, принцип действия и характеристики средств измерения вакуума в различных диапазонах давлений, а также вспомогательных элементов, используемых при построении вакуумных систем.

1.7.1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

Следует отметить, что измерение вакуума — это измерение давления ниже атмосферного. Поскольку давление является критическим параметром практически для всех технологических процессов, реализуемых в вакууме, измерение давления (вакуума) представляет собой важнейшую процедуру. Давление, создаваемое современными вакуумными системами, варьируется в диапазоне $10^5 \dots 10^{-13}$ Па (рис. 1.21), поэтому технически невозможно создать манометр, работающий в столь широком диапазоне давлений.

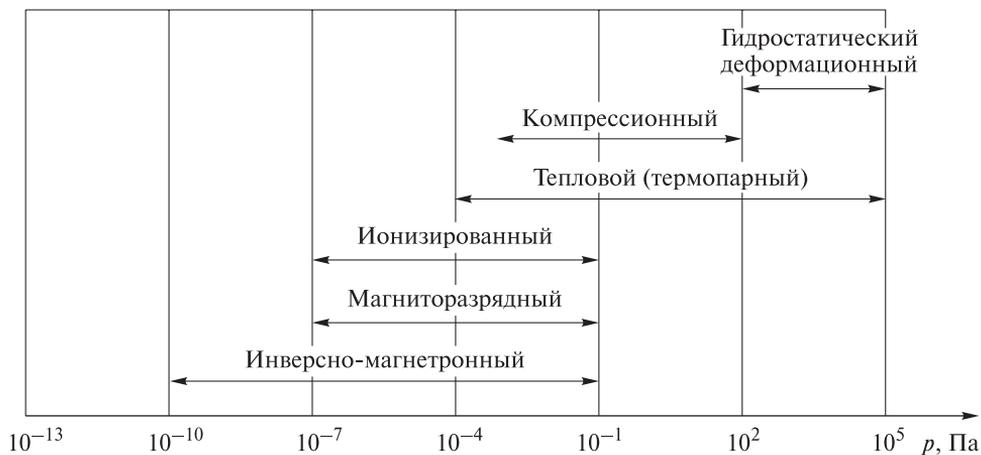


Рис. 1.21. Диапазоны измерений манометров

Единицей давления в СИ является паскаль, принятый в честь Паскаля, впервые измерившего атмосферное давление:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

До 1950-х годов была принята внесистемная единица давления 1 Торр = = 1 мм рт. ст. = 133,3 Па, названная в честь Торричелли, впервые определившего «силу боязни пустоты». Соотношения указанных единиц с некоторыми другими принятыми в Англии, США, а также с единицами, принятыми в гидравлике и пневматике, даны приведены ниже.

Единица измерения	Торр	Миллибар	Бар	Паскаль	Стандартная атмосфера, атм (ГОСТ 4401–81)
1 Торр.....	1.....	1,333.....	$1,33 \cdot 10^{-3}$	133,3.....	$1,326 \cdot 10^{-3}$
1 мбар.....	0,75.....	1.....	0,001.....	100.....	$9,87 \cdot 10^{-4}$
1 бар.....	750.....	1000.....	1.....	$1 \cdot 10^5$	$9,87 \cdot 10^{-1}$
1 паскаль.....	0,0075.....	0,01.....	$1 \cdot 10^{-5}$	1.....	$9,87 \cdot 10^{-6}$
1 атм.....	760.....	1013.....	1,013.....	101 325.....	1

Обычно манометры снабжены блоком управления с контроллером, позволяющим преобразовывать изменения давления в электрический сигнал, для управления автоматикой вакуумной системы.

Рассмотрим основные типы широко применяемых манометров.

Гидростатические V-образные манометры. Эти манометры позволяют измерять давление от атмосферного до 10^2 Па и состоят из откачанной V-образной трубки, частично заполненной ртутью и соединенной с вакуумной системой. Преимуществом манометров — прямое измерение давления, независимость от вида газа.

Деформационные манометры. Принцип их работы основан на изменяющейся (в зависимости от давления) деформации упругого элемента — трубки Бурдона или металлической мембраны. Использование металлической мембраны в сочетании с индуктивными или емкостным датчиком точных перемещений позволяет измерять давления в области $p_{изм} = 105 \div 10^{-2}$ Па.

Компрессионный манометр (Мак–Леода). Это усовершенствованная разновидность гидростатического V-образного манометра. Газ сжимается в манометре в известное число раз, что обеспечивает с помощью прямого метода измерение давления до 10^{-3} Па. Компактная разновидность манометра — **вакустат** — позволяет монтировать манометр на установке.

Достоинства компрессионного манометра:

- прямые измерения давления, что позволяет использовать его в качестве образцового для калибровки манометров других типов;
- широкий диапазон измеряемых давлений, распространяющийся на область высокого вакуума.

К недостаткам следует отнести:

- большое время, затрачиваемое на один замер (2...5 мин);
- невозможность работы с конденсирующимися парами.

Тепловые манометры. Принцип работы тепловых манометров основан на связи теплопроводности газа с давлением. В зависимости от способа измерения температуры нагреваемой нити их подразделяют на два типа:

1) манометры сопротивления (манометры Пирани) — измеряют изменение температуры нити как функцию изменения ее сопротивления. Сопротивление нити измеряют с помощью мостовой схемы. Манометр может измерять давление в диапазоне $10^3 \dots 10^{-2}$ Па;

2) термопарный манометр — основан на том же принципе, что и манометр Пирани. Представляет собой наиболее дешевую и простую разновидность теплового манометра, в котором температура нагретой нити измеряется с помощью термопары. Работает в диапазоне давлений $10^2 \dots 10^{-1}$ Па.

Ионизационный манометр. Принцип его работы основан на ионизации газа в объеме датчика потоком электронов, который строго стабилизирован (обычно $50 \cdot 10^{-6}$ А). Тогда количество образованных (за счет электронной бомбардировки молекул) ионов будет зависеть от давления (точнее, от объемной концентрации газа). В простейшей модификации возможно измерение давления в диапазоне $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Па. В усовершенствованной модификации (датчик Альперта), в которой устранена причина, вызывающая заметный фототок, диапазон измеряемого давления $10^{-1} \dots 10^{-9}$ Па.

Магниторазрядный манометр (манометр Пеннинга). Принцип действия манометра Пеннинга, или так называемого манометра с холодным катодом как и у ионизационного манометра основан на ионизации газа. Для расширения диапазона измеряемых давлений и возможности использования холодного катода в манометре использована система скрещенных магнитного и электрического полей. Магнитное поле закручивает траекторию электронов по спирали, увеличивая вероятность ионизации молекул газа электронами. Диапазон измеряемых давлений составляет $10 \dots 10^{-10}$ Па.

Инверсно-магнетронный манометр так же, как и магниторазрядный, использует схему скрещенных электрического и магнитного полей. В отличие от магниторазрядного конструкция системы «анод–катода» позволяет создать практически стационарную орбиту для появляющихся в результате ионизации вторичных электронов. Конструкция предусматривает также разделение фонового и ионного (измеряемого) токов, что обеспечивает расширение диапазона измеряемых давлений в области сверхвысокого вакуума и работу в диапазоне $p_{\text{изм}} = 10 \div 10^{-12}$ Па.

1.7.2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Запорная арматура (клапаны, затворы, натекатели) предназначена для герметичного перекрытия вакуумных линий, а также для подачи рабочих газов в объем камеры или в требуемые элементы вакуумной системы.

Существует множество различных типов запорной арматуры для различных применений в области вакуумной техники. Их наименования определяются в зависимости от конструкции или функции.

Угловые клапаны (рис. 1.22) отличаются высокой герметичностью, они прочны, пригодны для промышленного применения и устойчивы к загрязнениям. Входной и выходной фланцы расположены под углом 90° друг к другу на корпусе из алюминия или коррозионно-стойкой стали. Уплотнение

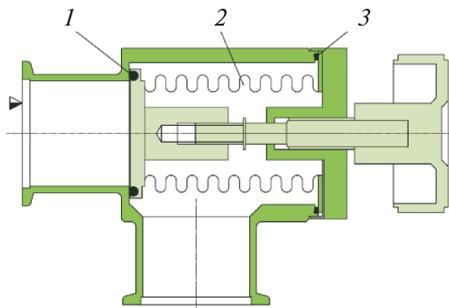


Рис. 1.22. Схема углового клапана с сильфонным уплотнением:

1 — уплотнение тарелки; 2 — сильфон;
3 — уплотнение корпуса

из эластомера трапецевидной или кольцевой формы находится на тарелке клапана. Пластина клапана прижата к седлу клапана для его герметизации. Поскольку элементы привода расположены вне вакуумного объема, их можно смазывать. Угловые клапаны выпускаются со всеми распространенными типами фланцев и могут иметь ручное, пневматическое, электромеханическое или электромагнитное управление.

Для сверхвысокого вакуума уплотнения корпуса и седла клапана выполняют из фторкаучука, меди или специальных сплавов. В последнем случае они называются цельнометаллическими.

Прходные (линейные) клапаны в основном имеют ту же конструкцию, что и описанные выше угловые клапаны, кроме того, что их вход и выход расположены по оси. Благодаря своей конструкции проводимость линейных клапанов обычно выше, чем у угловых клапанов.

В то время как клапаны лишь частично освобождают номинальное поперечное сечение, затворы (рис. 1.23) обеспечивают свободный проход в открытом положении. Вместе с их небольшой высотой это приводит к высокой проводимости и, следовательно, уменьшению потерь эффективной скорости откачки при использовании высоковакуумных насосов.

Тарелка затвора, обычно сдвоенной конструкции, двигается вперед и назад, открывая и закрывая проходное отверстие затвора. В закрытом положении элементы тарелки раздвигаются и прижимаются к уплотняющим поверхностям с помощью шариков. Большинство затворов являются герметичными при перепаде давления 0,1 МПа, действующем на его тарелку, однако они могут открываться только при наличии низкого перепада давления на тарелке.

Клапаны дозирования газа — натекатели (рис. 1.24) используются для ввода заданных потоков газа в вакуумную систему, например, для поддержания или установления определенного давления. Часто они работают по принципу игольчатого клапана. При повороте шпинделя освобождается зазор, что обеспечивает пропускную способность для определенного потока газа. Поток газа зависит от оборотов шпинделя и представлен в виде

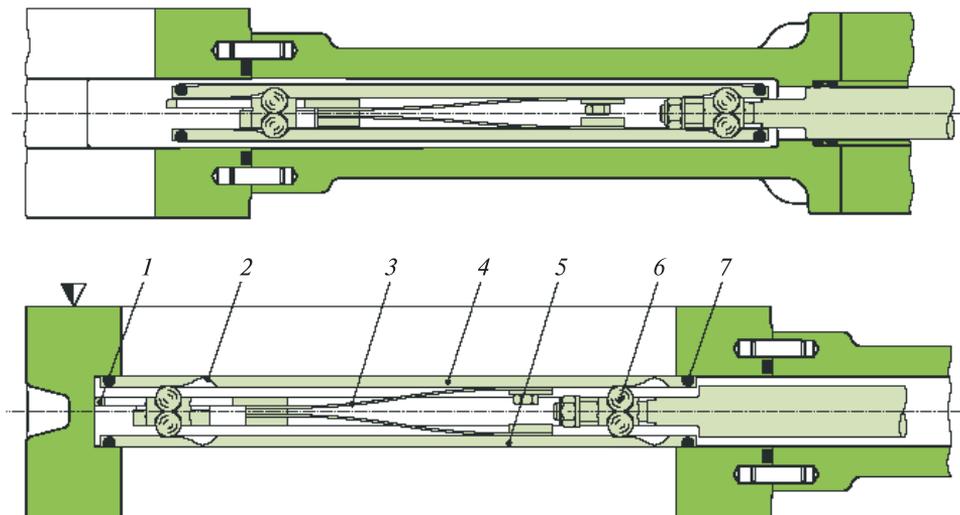


Рис. 1.23. Схема шиберного затвора:

1 — пружинный стопор; 2 — фиксаторы шариков; 3 — пластинчатые пружины; 4 — тарелка;
5 — распорная пластина; 6 — пары шариков; 7 — уплотнение тарелки

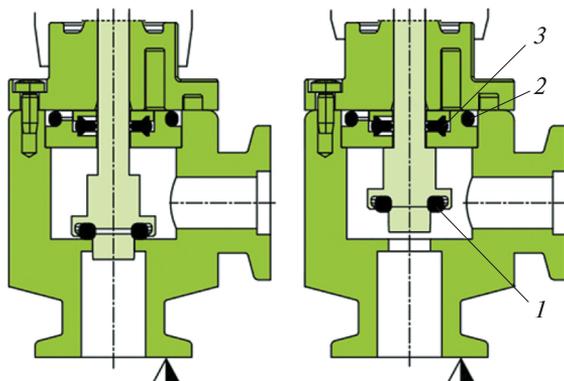


Рис. 1.24. Схема механического натекателя:

1 — уплотнение тарелки; 2 — уплотнение корпуса;
3 — уплотнение штока

характеристической кривой. Положение клапана можно считывать со шкалы и воспроизводимо устанавливать.

Фитинги предназначены для соединения (коммутации) остальных элементов вакуумной системы между собой.

Для монтажа стандартных вакуумных соединений до условного диаметра (ДУ) проходного сечения DN50 в низком, среднем и высоком вакууме (рис. 1.25) используется KF-фланец (DIN 28403, ISO 2861).

Между двумя фланцами находится уплотнение. Оно состоит из центрирующего кольца из коррозионно-стойкой стали или алюминия, и

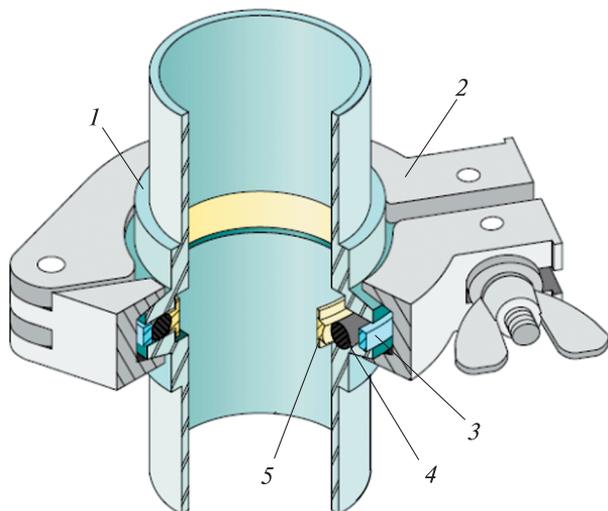


Рис. 1.25. Схема соединения с помощью KF-фланца:

1 — KF-фланец; 2 — хомут; 3 — дополнительное внешнее кольцо;
4 — уплотнительное кольцо; 5 — центрирующее кольцо

уплотняющего кольца из вакуумной резины (витон, нитрил). Фланцы соединяются с помощью накидного хомута, который имеет коническую внутреннюю поверхность, соответствующую внешней конической поверхности фланцев.

Для монтажа применяются, как правило, внутренние центрирующие кольца и обычные шарнирные хомуты с «барашковой» гайкой. Они позволяют проводить быстрый и простой монтаж без использования инструментов. Для специальных применений имеются, кроме того, внешние центрирующие кольца и специальные хомуты или звеньевые хомуты.

При монтаже стандартных вакуумных трубопроводов для среднего и высокого вакуума, начиная от условного диаметра проходного сечения DN63 используется нормированная система соединения ISO-K (DIN 28404, ISO 1609) (рис. 1.26).

Два одиночных ISO-K-фланца соединяются с помощью струбинообразных зажимов с двойным захватом. На внешней (атмосферной) стороне фланцы имеют паз, за который крепятся зажимы, стягивающие фланцы. Как и при KF-соединениях между фланцами находится

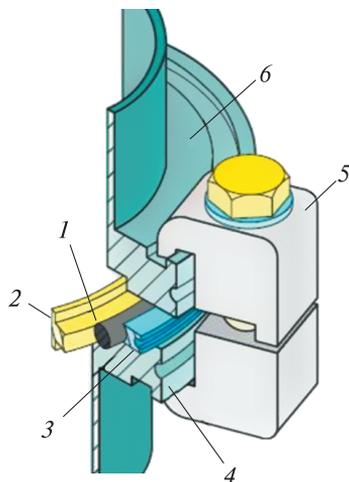


Рис. 1.26. Схема ISO-K-соединения:

1 — уплотнительное кольцо;
2 — центрирующее кольцо; 3 — внешнее кольцо; 4, 6 — фланцы ISO; 5 — двойная струбина

уплотнение, состоящее из центрирующего и уплотняющего колец. Чаще всего используется дополнительное опорное кольцо, которое обуславливает сохранение равномерного расстояния между фланцами во время монтажа.

Для получения сверхвысокого вакуума (UHV) к материалам и соединениям предъявляются особые требования, в частности CF-стандарт (ISO/TS 3669-2:2007).

На сверхточных токарных станках с числовым управлением вытачиваются CF-фланцы из нержавеющей стали. Вращающиеся CF-фланцы состоят из двух частей: из внутренней части с уплотняющей поверхностью и внешней части с отверстиями для болтов. С вакуумной стороны CF-фланцы имеют специальный острый выступ — «зуб», который вдавливается в плоское уплотнительное кольцо, в результате чего происходит уплотнение (рис. 1.27).

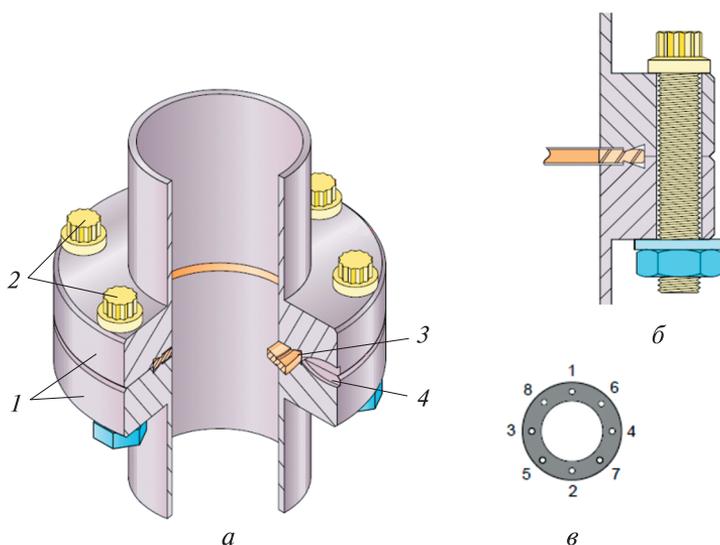


Рис. 1.27. Схема CF-соединения:

а — схема монтажа медной прокладки; *б* — схема монтажа фланцев;
в — последовательность затягивания болтов; 1 — фланцы; 2 — болты; 3 — медная прокладка; 4 — щель для шупа течеискателя

Компоненты, применяемые в технике сверхвысокого вакуума, должны иметь минимальный уровень натекания и высокую температуру нагрева. Для уплотнения CF-фланцев используют уплотнительные кольца из особо чистой бескислородной меди (OFHC). Вследствие деформации режущей кромкой медные кольца можно использовать только один раз. При этом прокладка из отожженной меди является одноразовой, т. е. ее многократное применение не допускается. Сдавливание проводится болтами, которые равномерно затягивают с помощью гаечного ключа во избежание деформаций. Такое фланцевое соединение имеет уровень натекания менее $1 \cdot 10^{-9}$ Па л/с и температуру нагрева до 450 °С.

Тесты к лекции 7

1. Тепловые и термопарные датчики давления предназначены для измерения:

- а) низкого и среднего вакуума;
- б) высокого вакуума;
- в) сверхвысокого вакуума.

2. Ионизационные датчики давления предназначены для измерения:

- а) высокого и сверхвысокого вакуума;
- б) высокого вакуума;
- в) низкого и среднего вакуума.

3. В соединениях стандарта KF в качестве материала уплотнения используется:

- а) вакуумная резина;
- б) алюминий;
- в) бескислородная медь;

4. В соединениях стандарта CF в качестве материала уплотнения используется:

- а) бескислородная медь;
- б) алюминий;
- в) вакуумная резина.