

цесс откачки может быть существенно ускорен нагреванием системы до 450°C , но и при этом откачка занимает около часа (кривая 2). Если желательно получить предельный вакуум $\sim 10^{-8}$ Па, то необходим длительный отжиг системы (около 8 ч) при более высокой температуре. В противном случае время, затрачиваемое на достижение заданного предельного остаточного давления, может составлять недели.

4.2. СТРУКТУРЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

4.2.1. Общая характеристика вакуумных систем

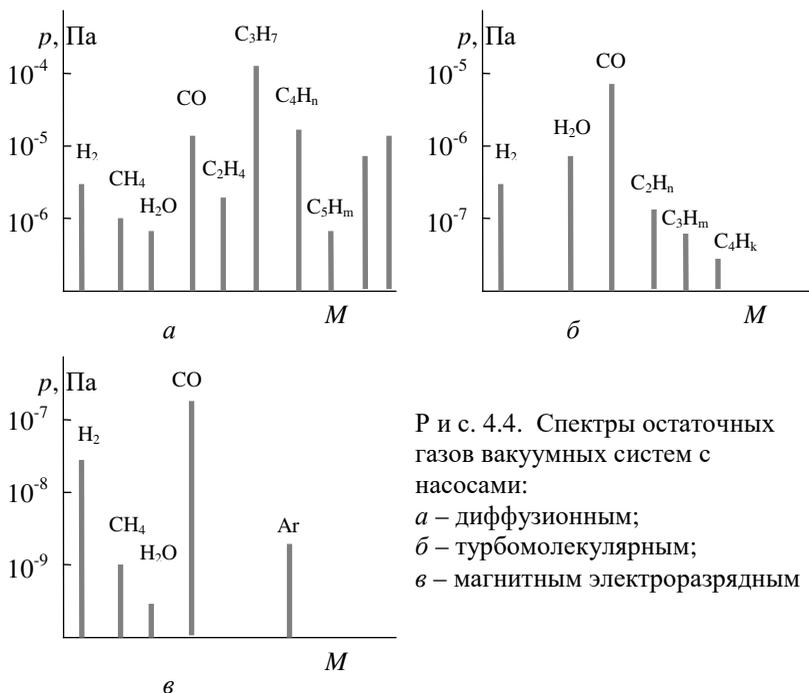
Для эффективного функционирования и обеспечения заданных параметров необходимо, чтобы вакуумные системы удовлетворяли ряду требований. К ним в первую очередь относятся следующие:

- возможность достижения расчетного предельного разрежения в откачиваемом объеме. Это требование может быть выполнено лишь в том случае, если правильно подобраны вакуумные насосы и соблюдены необходимые правила вакуумной гигиены при сборке элементов и узлов откачной системы;
- необходимая быстрота откачки и максимальная добротность вакуумной системы, оцениваемая отношением эффективной скорости откачки насоса $S_{\text{эф}}$ к его скорости действия $S_{\text{н}}$;
- удобство в работе и простота эксплуатации вакуумной системы, возможность ее максимальной автоматизации и оснащения средствами защиты.

По назначению вакуумные системы можно условно разделить на статические и динамические.

Целью откачки в **системе статического типа** является получение максимального разрежения в откачиваемом объекте либо (при достижении предельного вакуума) изоляция или отсоединение объекта от установки. В таких системах к концу откачки характерно примерно постоянное распределение давления в объемах установки и откачиваемого прибора, и нет необходимости использовать откачные средства большой производительности. Соединительные вакуумпровода и другие элементы таких систем могут иметь ограниченную пропускную способность.

Для **системы динамического типа**, больше предназначенной для работы со значительными газовыми потоками, характерно нестационарное распределение давлений, заметное увеличение давления по мере удаления от вакуумного насоса. Поэтому насос должен обладать достаточно большой быстротой действия без ограничений по газовой емкости, а соединительные вакуумпроводы и другие элементы вакуумной установки – минимальным сопротивлением.



Вакуумные системы строятся на основе турбомолекулярных, ионных, испарительных и криогенных насосов. Примерный состав остаточных газов, получаемый в системах с различными насосами, показан на рис. 4.4. Для безмасляных насосов спектр остаточных газов отличается низким содержанием углеводородов. Дополнительные отличия в спектрах связаны с селективностью средств откачки к различным газам. В табл. 4.1 приведены сравнительные

характеристики высоковакуумных насосов, отражающие преимущества и недостатки насосов различного типа.

Таблица 4.1
Характеристики насосов (для откачиваемого объема 0,5 м³)

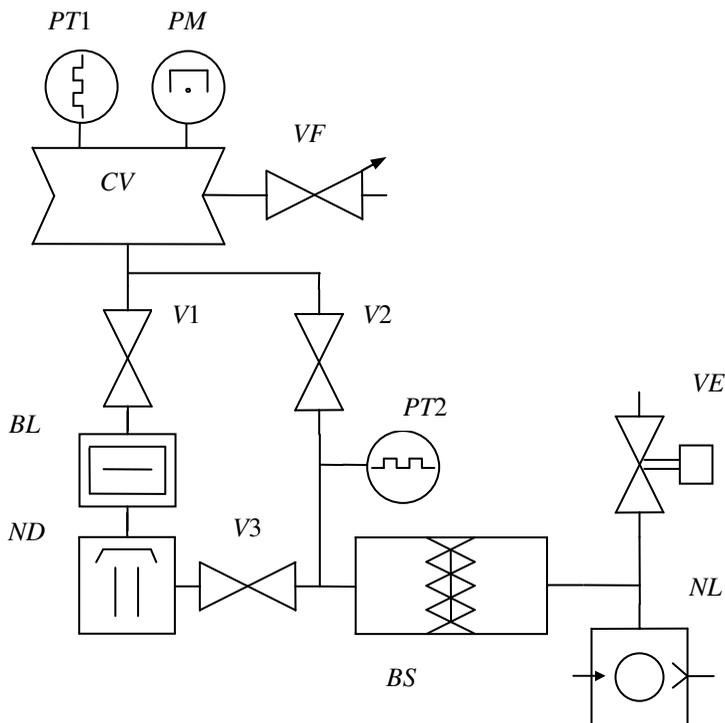
Тип насоса	S_0 , м ³ /с			p_3 , Па	Полная газовая ёмкость, Па·м ³	Примечания
	N ₂	H ₂	Ar			
Диффузионный	0,7	1,3	0,7	1,0	Неогр.	С использованием отражателя
ТМН	0,5	0,5		10 ⁻¹	Неогр.	–
Ионный	0,5	1,0	0,05	10 ⁻¹	10 ⁴	Ti хорошо поглощает H ₂ , но при последующей работе может выделять его
Криогенный	0,7	0,5	0,7	10 ⁻¹	10 ³	Возможна регенерация при нагреве
Испарительный	1,0	1,0	Мала	10 ⁻²	10 ²	–

4.2.2. Системы на механических средствах откачки

Среди большого разнообразия вакуумных систем можно выделить несколько типовых схем построения систем откачки.

Длительное время традиционными устройствами для получения высокого вакуума считались **вакуумные системы**, построенные на **диффузионных и механических вращательных насосах**. На рис. 4.5 показана типичная система вакуумной установки, имеющая два насоса: низковакуумный механический вращательный *NL* и высоковакуумный диффузионный *ND*. Вакуумная камера *CV* снабжена вакуумметрами для контроля разных уровней вакуума: тепловым *PT1* и магнитным электроразрядным *PM*. В камере могут быть различные электрические и механические вводы, клапаны

для подключения масс-спектрометра, течеискателя, напуска воздуха (натекатель VF) и др.



Р и с. 4.5. Принципиальная схема вакуумной системы на основе диффузионного насоса

Откачка производится по следующей схеме. Сначала система откачивается до давления ~ 10 Па насосом NL по линии предварительной (байпасной) откачки через открытый клапан $V2$. Это делается для предотвращения откачивания больших количеств газа через диффузионный насос, с тем чтобы не происходил возможный вынос рабочей жидкости из диффузионного насоса вместе с откачиваемым газом. Затем клапан $V2$ закрывается, открывается клапан $V3$ и включается нагрев диффузионного насоса ND . После установления рабочего режима диффузионного насоса открывается

высоковакуумный затвор $V1$ и система откачивается до высокого вакуума.

Электромагнитный клапан VE нужен для напуска воздуха во вращательный насос после прекращения откачки и закрытия всех клапанов. Он срабатывает на открытие одновременно с отключением питания насоса NL .

Сорбционная ловушка BS снижает загрязнение высоковакуумного насоса парами рабочей жидкости насоса предварительного разрежения и препятствует попаданию паров в откачиваемый объем при низковакуумной откачке. Азотная ловушка BL предохраняет от попадания в систему паров диффузионного насоса.

Вакуумметр $PT2$ позволяет контролировать выпускное давление насоса ND и измерять уровень вакуума при низковакуумной откачке через клапан $V2$.

Быстрота действия и предельное давление низковакуумного насоса, используемого в качестве вспомогательного при высоковакуумной откачке, должны быть согласованы с характеристиками высоковакуумного насоса.

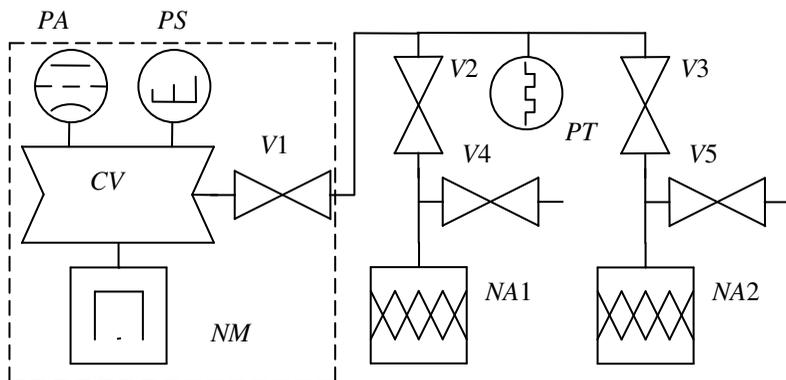
Вакуумные системы на основе ТМН во многих отношениях аналогичны системам, построенным на основе диффузионного насоса. Оба насоса, по сути, являются компрессорами с выбросом сжатого газа на сторону предварительного разрежения, т.е. требуют непрерывной работы вспомогательного насоса. ТМН откачивается, как правило, механическим вращательным насосом, так что вакуумная система в этом случае аналогична рассмотренной. Главное отличие – отсутствие азотной ловушки.

4.2.3. Системы на физико-химических средствах откачки

В случае, например, ионного насоса откачиваемый газ поглощается непосредственно в насосе и не выбрасывается в атмосферу, так что **нет необходимости в использовании непрерывно работающего вспомогательного насоса**. Однако начальное давление, при котором ионный насос может быть включен, составляет около 1 Па, и предварительная откачка необходима. Этот же подход к организации процесса откачки относится и ко всем насосам поверхностного принципа действия – геттерным, ионным, криогенным.

Поскольку одним из основных достоинств ионного насоса является полное отсутствие любых загрязняющих органических примесей, использование масляного вращательного насоса для получения предварительного вакуума в этом случае нецелесообразно. Поэтому обычно ионный насос применяется совместно с безмасляным низковакуумным насосом (например, низкотемпературным адсорбционным).

Ионный насос не нуждается в использовании ловушки или отражателя, а также противоаварийных устройствах при внезапном прекращении подачи энергии. Однако при повышении давления может произойти перегрев насоса. Обычно между ионным насосом и вакуумной системой не требуется затвор. Отсутствие ловушки и затвора позволяет максимально использовать эффективность действия ионного насоса.



Р и с. 4.6. Схема вакуумной системы установки на основе магнетрона разрядного насоса

На рис. 4.6 представлена типичная **высоковакуумная система на основе магнетрона разрядного насоса NM** и комбинации пары адсорбционных насосов NA. Для получения высокого и сверхвысокого вакуума вакуумная система должна содержать прогреваемый блок (часть системы, допускающая прогрев, обозначена штриховой линией). Прогрев до 400 °С значительно уменьшает газовыделение всех элементов вакуумной системы, непосредственно подключаемых к насосу. Для получения наилучшего ре-

зультата после включения печи вся система в течение нескольких часов выдерживается при максимальной температуре.

Перед включением системы на откачку вначале необходимо активировать адсорбционные насосы путем их нагревания до 250 °С; при этом выпускные клапаны V4 и V5 должны быть открыты, а V2 и V3 – закрыты. В результате происходит удаление паров воды и других газов, адсорбировавшихся в цеолите. После этого клапаны V4 и V5 закрываются, а насосы охлаждаются до температуры жидкого азота. Затем первый адсорбционный насос NA1 с помощью клапанов V2 и V1 подключается к системе, давление в которой при этом будет снижаться до ~1 Па.

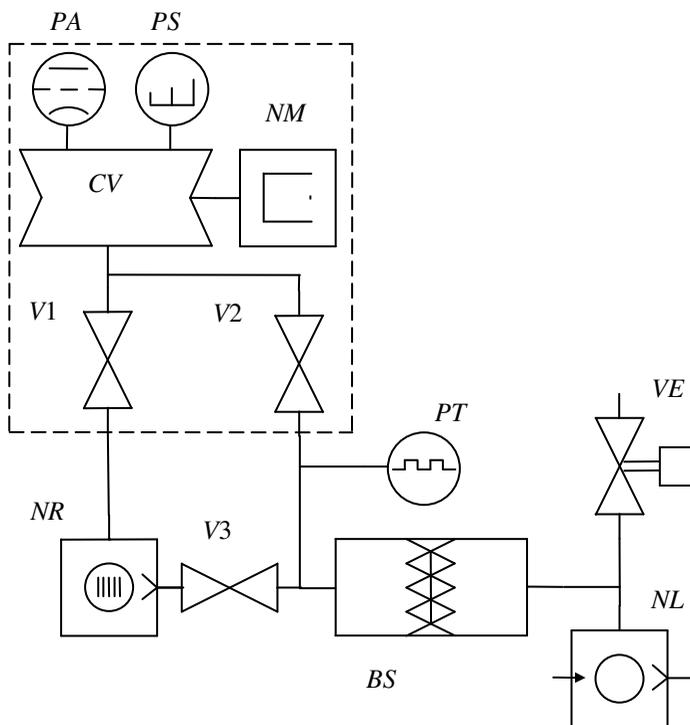
На этой стадии (при открытом V1) систему целесообразно подвергнуть предварительному прогреву (до ~120 °С) для повышения эффективности удаления паров воды с внутренней поверхности стенок камеры.

Перекрывая клапан V2 и открывая V3, продолжают откачку системы вторым, «незаполненным» сорбционным насосом. При этом температура прогрева системы может быть повышена до 250 °С, а насос ND приведен в действие. Такой прогрев не только улучшает обезгаживание системы, но и обеспечивает «регенеративный» нагрев ионного насоса, благодаря которому достигается максимальная его производительность. Считается, что повышение температуры увеличивает эффективность распыления металла катода и повышает скорость диффузии поверхностно связанного газа. В это время сорбционные насосы могут быть отключены от системы клапаном V1. В результате такого отжига давление в системе должно снизиться, по крайней мере, до 10^{-3} Па.

После перекрытия клапана V1 повышают температуру рабочей камеры до 450 °С, оставляя неизменной температуру ионного насоса (~250 °С); при этом в системе достигается предельное давление ~ 10^{-8} Па. После охлаждения всех элементов системы давление может снизиться менее 10^{-10} Па.

Для удаления значительных количеств газов, которые могут выделяться в систему, целесообразно использовать титановый испарительный насос. Адсорбционный и ионный насосы имеют ограниченную газопоглощающую емкость, особенно в отношении инертных газов. Емкость адсорбционных насосов может быть увеличена путем предварительного их откачивания с помощью дополнитель-

ного механического насоса (безмасляного). В этом случае адсорбционные насосы активируются путем их прогрева при более низких давлениях ($\sim 10^4$ Па), и тогда в системе достигается более низкое парциальное давление неона, ограничивающее предельные давления адсорбционных насосов.



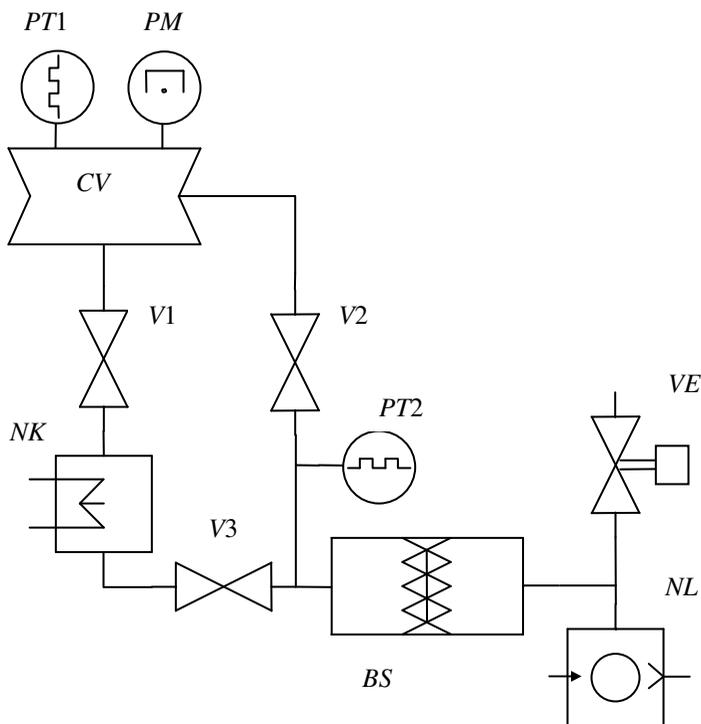
Р и с. 4.7. Схема гибридной вакуумной системы

Альтернативным решением проблемы удаления больших потоков газа является **использование гибридной системы откачки**, особенно ионного насоса в паре с ТМН (рис. 4.7). Представленная система удобна при длительной работе, когда возможно возникновение больших начальных газовых нагрузок (например, при проведении эксперимента). ТМН удаляет основную часть газа, обеспечивая необходимые условия для надежного запуска ионного насоса,

который, в свою очередь, может создавать сверхвысокий вакуум. Высоковакуумные клапаны $V1$ и $V2$ должны быть прогреваемыми.

4.2.4. Системы на криогенных средствах откачки

Криооткачка, как и ионная, характеризуется отсутствием загрязняющих примесей и возможностью размещения насоса непосредственно в рабочей камере; в дополнение к этому крионасосы обладают более высокой производительностью и могут работать при больших начальных давлениях остаточного газа.



Р и с. 4.8. Принципиальная схема вакуумной системы на основе криогенного насоса

С другой стороны, эти насосы требуют периодической регенерации (отогрева) для удаления ранее откачанного газа. Поэтому в системах на основе крионасосов (рис. 4.8) следует предусмотреть наличие высоковакуумного изолирующего затвора VI для отсечения насоса на время регенерации и наличие соответствующей линии регенерации, по которой будет откачиваться газ из насоса (через клапан V3). Вследствие ограничений по газовой емкости крионасосов вакуумная система должна быть предварительно откачана с помощью другого насоса. Очевидно, что и здесь, ввиду отсутствия углеводородных загрязнений у крионасоса, в качестве дополнительного лучше всего подходит безмасляный насос. Однако при необходимости откачивать большие количества инертного газа, например аргона, использование того же адсорбционного насоса не всегда оправдано. Хотя криопанель эффективно откачивает аргон, она имеет ограниченную газовую емкость и требует регенерации; в этом случае также возникает проблема откачки аргона сорбционными насосами. Поэтому для этих целей обычно рекомендуют использовать другие насосы (например, вращательные с хорошей защитой от попадания в систему паров масла).

Крионасос может быть использован совместно с другими высоковакуумными насосами. Однако это будет оправдано лишь в случае существенного улучшения характеристик системы крионасосом.

4.3. ПРОТЯЖЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

4.3.1. Проводимость протяженных систем

Давление в протяженных вакуумных камерах возрастает по мере удаления от места подключения вакуумного насоса. Это обстоятельство резко ограничивает возможности получения сверхнизких давлений в протяженных камерах, откачиваемых по традиционной схеме – с помощью дискретно размещенных вдоль камеры насосов. Для иллюстрации такого ограничения проводимости рассмотрим ситуацию с периодическим расположением насосов вдоль протяженного вакуумного тракта (рис.4.9). В такой системе давление вдоль тракта имеет параболическое распределение с минимумом в месте расположения насоса.