

## 1.6. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

**Цель лекции:** классификация высоковакуумных средств откачки, изучение принципа их действия и современных параметров, а также получение знаний и умений по их выбору для конкретного технологического процесса.

К высоковакуумным средствам откачки относят следующие типы насосов, работающие в диапазоне давлений  $10^{-1}$  Па до  $10^{-10}$  Па и ниже:

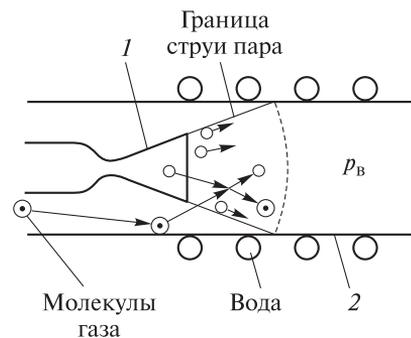
- диффузионные;
- молекулярные;
- сорбционные;
- криогенные;
- геттеро-ионные.

Все эти насосы примерно в одинаковой степени используются для создания высокого и сверхвысокого вакуума в технологических установках. В меньшей степени в последнее время применяются диффузионные насосы, поскольку при их использовании требуется дополнительная защита в виде ловушек для предотвращения миграции паров масла в вакуумную камеру.

### 1.6.1. ДИФФУЗИОННЫЕ НАСОСЫ

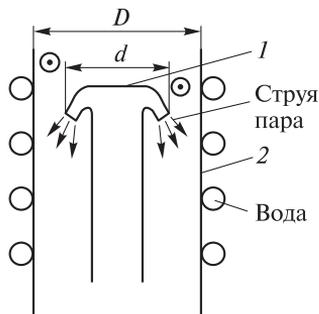
Принцип работы диффузионного насоса заключается в откачке молекул газа струей пара, переносящей откачиваемые молекулы из области впуска к выпускному патрубку. Принцип работы насоса с «прямым» диффузионным соплом показан на рис. 1.13. Главной частью такого насоса является расположенное в центре охлаждаемого водой или воздухом корпуса прямооточное расширяющееся сопло — сопло Ловаля. Струя паров масла или ртути, выходящая из сопла со сверхзвуковой скоростью, образует расходящийся конус и, касаясь холодного корпуса, конденсируется на нем.

Молекулы откачиваемого газа, находящиеся в области впускного патрубка, попадая в струю пара, переносятся этой струей к области выпускного патрубка насоса (к форвакуумной области насоса). Прямое



**Рис. 1.13.** Принцип работы сопла Ловаля:

1 — сопло; 2 — охлаждающая стенка;  
 $p_v$  — выпускное давление



**Рис. 1.14.** Принцип работы зонтичного («обращенного») сопла:

1 — сопло; 2 — охлаждающая стенка;  $D$  — диаметр охлаждающей стенки;  $d$  — диаметр сопла

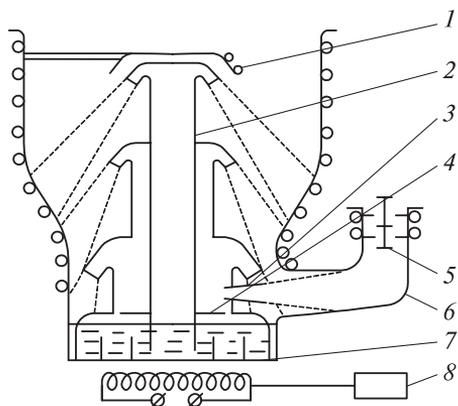
сопло образует струю высокой плотности, в которую откачиваемым молекулам газа трудно проникнуть (диффундировать), что снижает скорость откачки, так как большая часть молекул газа отражается от струи обратно.

Если использовать сверхзвуковую струю пара малой плотности, то можно достигнуть высокой эффективности откачки. Такая струя образуется в так называемом «обращенном» сопле — зонтичном сопле (рис. 1.14).

Только 25–30 % молекул, ударяющихся о струю, проникают в нее и могут быть откачены. Кроме того, обратное давление в зоне работы рассматриваемого сопла должно быть минимальным, чтобы уменьшить обратный поток газа. В одноступенчатом диффузионном насосе не удается обеспечить малое обратное давление, поэтому обычно используются многоступенчатые диффузионные насосы, где обратное давление растет от ступени к ступени. На рис. 1.15 показан насос, в котором использованы три последовательных диффузионных «обращенных» (зонтичных) сопла и одно прямооточное инжекторное сопло.

Охлаждаемая водой ловушка-колпачок уменьшает обратный (в сторону вакуумной камеры) поток паров масла из сопла на 90 %, незначительно

уменьшая при этом скорость откачки насоса. В центральный паропровод из кипятильника попадают только тяжелые фракции масла с меньшим давлением насыщающих паров, кипящих при большей температуре, только в центре кипятильника. Козырек внутри наружной трубы паропровода, служит для отражения капель при кипячении масла. Днище кипятильника обеспечивает хорошую теплопередачу, не допускающую перегрева зон кипятильника свыше 240 °С, чтобы избежать образования легких фракций масла, не улавливаемых ловушкой. Форвакуумная ловушка-лабиринт уменьшает потери (выбрасывание в форвакуумную линию) масла.



**Рис. 1.15.** Конструкция четырехступенчатого диффузионного насоса:

1 — ловушка-колпачек; 2 — центральный паропровод; 3 — инжекторное (прямоточное) сопло; 4 — козырек; 5 — форвакуумная ловушка-лабиринт; 6 — выпускной патрубок; 7 — днище кипятильника; 8 — нагреватель (печь)

Поскольку в отличие от ртути (момента) вакуумное масло — полимер, состоящий из смеси фракций со слегка

различающимся давлением насыщающих паров, необходимо не допустить легкие (легкокипящие) фракции к впускному патрубку. Приведенный на рис. 1.15 насос — разгоночный, так как отделяет (разгоняет) легкие фракции, кипящие в зоне внешнего паропровода, от тяжелых, достигающих центральной, более нагретой зоны кипятильника и кипящих в зоне центрального паропровода. Таким образом достигается улучшение предельного вакуума примерно на порядок (на вакуумном масле ВМ-5 достигается  $p' \approx 4 \cdot 10^{-4}$  Па).

### 1.6.2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Главная идея молекулярного насоса — придание всем молекулам откачиваемого газа, движущимся в произвольных направлениях, дополнительной составляющей скорости в направлении к выпускному патрубку. Классическим примером молекулярного насоса является вращательный насос (см. рис. 1.10).

Однако с таким типом насоса невозможно обеспечить большую быстроту откачки ( $S_n > 1$  л/с) из-за малой пропускной способности рабочей полости насоса. Для достижения больших скоростей откачки используют другой тип молекулярных насосов — турбомолекулярные насосы.

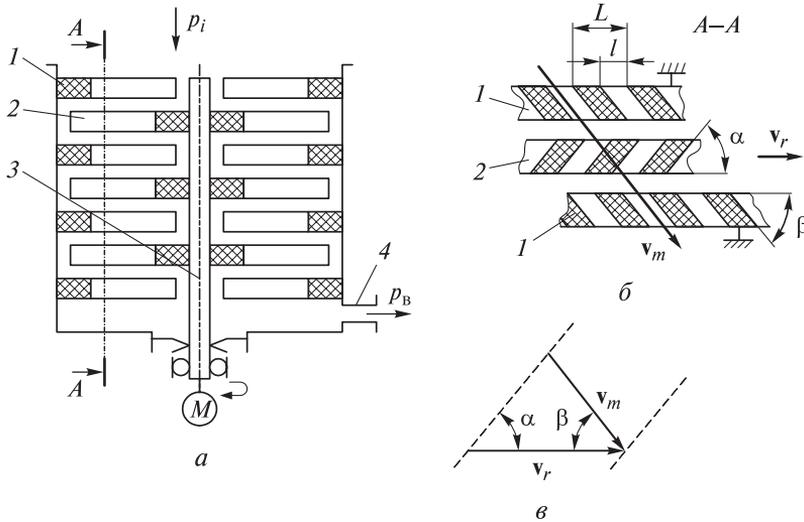
В отличие от молекулярного насоса, в котором ротор и отраженные от него молекулы перемещаются в одном направлении, в турбомолекулярном насосе молекулы откачиваемого газа движутся перпендикулярно плоскости вращения ротора насоса.

Процесс откачки газа в турбомолекулярном насосе обеспечивается системой чередующихся, вращающихся и неподвижных, дисков с косыми прорезями (рис. 1.16, *a*).

Молекулы, движущиеся вниз от впускного фланца вдоль наклонных прорезей неподвижного диска (рис. 1.16, *b*), попадая в объем, занимаемый диском ротора, не соударяются со стенками прорезей в этом диске движутся с линейной скоростью  $v_r$ . Эту скорость можно рассчитать с помощью векторной диаграммы скоростей (рис. 1.16, *в*), где  $v_m$  — вектор скорости теплового движения «откачиваемой» молекулы;  $v_r$  — вектор скорости перемещения стенки зазора ротора; штриховая линия — направление вектора «проскальзывания» молекулы вдоль стенки прорези ротора. Молекулы газа, движущиеся в других направлениях с другой (резко отличающейся от  $v_m$ ) скоростью или движущиеся в обратном направлении, пропускаться системой дисков не будут.

Для эффективной откачки молекул газа, движущихся со средней тепловой скоростью  $v_a \approx 500$  м/с, необходимо придать ротору (диаметром 200...400 мм) скорость вращения около 16 000...25 000 об/мин.

Турбомолекулярные насосы создают предельное давление до  $p_1 = 10^{-8}$  Па и обеспечивают стабильную быстроту откачки 50...4000 л/с в диапазоне впускных давлений  $p_{вп} = 10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-8}$  Па.



**Рис. 1.16.** Схема работы турбомолекулярного насоса:

*a* — схема конструкции; *б* — процесс пролета молекул через систему дисков с прорезями; *в* — диаграмма скоростей; 1 — диски статора с прорезями, наклоненными под углом  $\beta$  к плоскости дисков; 2 — диски ротора с прорезями под углом  $\alpha$  к плоскости вращения дисков; 3 — вал ротора; 4 — выпускной патрубков

Эти насосы предназначены для откачки больших потоков газов, в том числе агрессивных, что делает их незаменимыми в приборостроении при реализации процессов нанесения и травления тонких пленок.

### 1.6.3. СОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Сорбционные насосы — насосы для удаления газов из вакуумного объема, в которых используется физическая адсорбция.

Большим достоинством сорбционных насосов является отсутствие масла в конструкции, что позволяет получить с их помощью «безмасляный» вакуум. Обычно сорбционные насосы используют как насосы предварительного разряжения совместно с магнитно-разрядными или криосорбционными насосами для получения «безмасляного» сверхвысокого вакуума.

В ряде случаев сорбционные насосы применяются как самостоятельное средство откачки для получения безмасляного среднего и высокого вакуума.

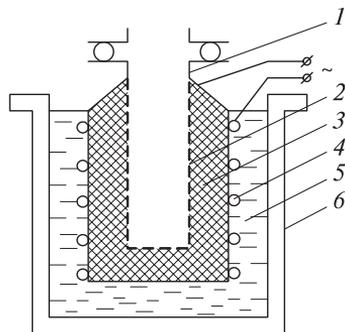
Рассмотрим принцип работы сорбционного насоса (рис. 1.17).

Обычно корпус насоса выполнен в виде цилиндрического стального контейнера, наполненного сорбентом, эффективно поглощающим газ (активированным углем, цеолитом, силикагелем) и допускающим многократную регенерацию.

Поскольку полный рабочий цикл одного насоса включает в себя как период регенерации (нагрева, когда насос не откачивает, а, наоборот, выделяет

**Рис. 1.17.** Схема сорбционного насоса:

1 — присоединительный патрубок, служащий как для откачки (всасывания газов в насос), так и для регенерации (удаления газов из объема насоса); 2 — сетчатый контейнер, наполненный адсорбентом; 3 — адсорбент; 4 — нагреватель для регенерации адсорбента; 5 — охлаждающее устройство, заполняемое жидким азотом после регенерации для приведения адсорбента в рабочее состояние; 6 — теплоизолирующий контейнер (сосуд Дюара)



откачанный им газ), так и рабочий период, для обеспечения непрерывности процесса откачки необходимо использовать два насоса. Тогда в любой момент времени один насос откачивает газ из вакуумной системы, а другой — регенерируется.

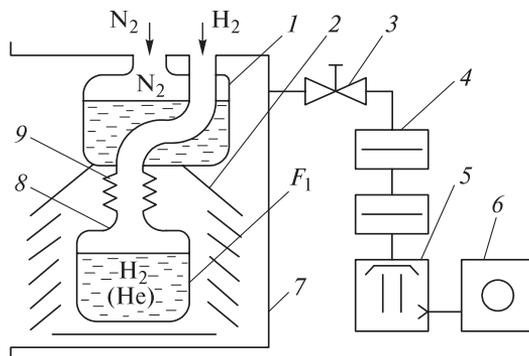
#### 1.6.4. КРИОСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Криосорбционными (криогенными) называются насосы, в которых для удаления остаточных газов из вакуумного объема используются очень низкая температура ( $T = 4...20$  К). Откачка происходит за счет конденсации молекул откачиваемого газа на поверхностях криопанелей, охлаждаемых до криогенных температур.

Обычно в криогенных насосах применяют жидкий гелий (температура кипения в атмосфере 4,2 К) или, реже, жидкий водород (температура кипения 20,3 К). Для того чтобы минимизировать потери (испарение) используемых жидких хладагентов ( $H_2$  и  $He$ ) и не допустить нежелательного повышения температуры криопанелей с конденсированным на них газом, в крионасосах используются экраны, охлаждаемые жидким азотом и уменьшающие тепловую радиацию от деталей корпуса, нагретых до комнатной температуры (300 К). Защитные экраны проектируют таким образом, чтобы криопанель не была «видна» со стороны нагретых до комнатной температуры деталей.

Схема конструкции «заливного» крионасоса, в который хладагент — жидкий гелий или водород — заливают снаружи, показана на рис. 1.18.

Рабочая криопанель представляет собой емкость, заливаемую рабочим хладагентом. Эта панель окружена охлаждаемыми жидким азотом (77 К) экранами. Емкость, охлаждаемая жидким азотом, предотвращает нагрев до комнатной температуры крепежной горловины криопанелями. Для уменьшения теплового потока, подводимого по материалу горловины, она выполнена в виде тонкостенного сильфона из коррозионно-стойкой стали, обладающей малой теплопроводностью. Такая конструкция горловины уменьшает подвод теплоты от корпуса к рабочей криопанели и уменьшает расход жидкого гелия. Экраны уменьшают теплоподвод, осуществляемый за счет тепловой радиации от корпуса насоса (нагретого до комнатной



**Рис. 1.18.** Схема конструкции «заливного» крионасоса:

1 — емкость, охлаждаемая жидким азотом;  
 2 — экраны; 3 — затвор; 4 — азотная ловушка;  
 5 — диффузионный насос; 6 — механический насос;  
 7 — корпус; 8 — рабочая криопанель; 9 — тонкостенный сильфон (горловина)

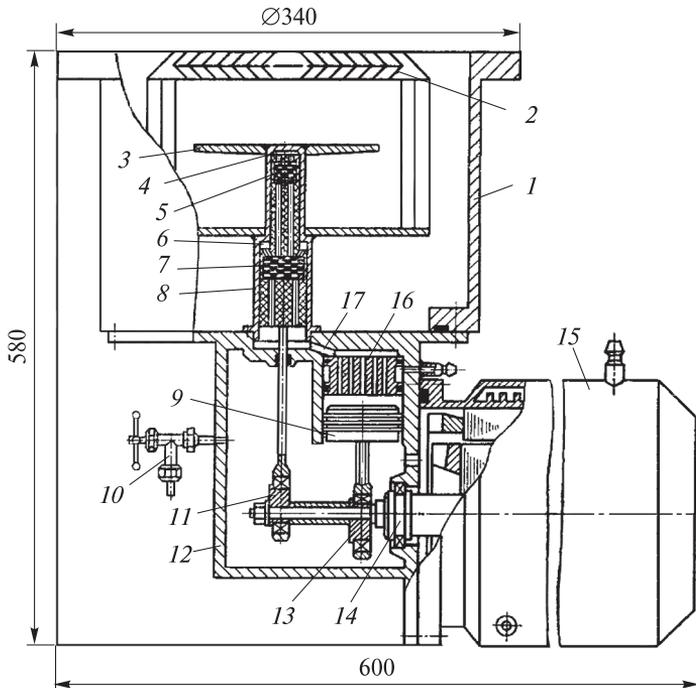
температуры 300 К). При этом экраны конструируют таким образом, чтобы не уменьшать быстроту откачки насоса (криопанели).

В принципе криогенный насос может работать, начиная с атмосферного давления, но при этом большое количество хладагента (жидкого гелия или водорода) необходимо затратить на конденсацию газов, которые можно было бы откачать насосами других типов с минимальными затратами средств. Поэтому перед запуском (заливкой) крионасоса вакууммируемый объем откачивается системой предварительной откачки, которая обычно включает диффузионный паромасляный насос (так как пары масла хорошо вымораживаются ловушкой), механический насос и присоединяется к корпусу криогенного насоса через затвор. Эта система создает предварительное разрежение порядка  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па.

Конденсационный насос с криогенератором приведен на рис. 1.19. В корпусе насоса 1 размещена криопанель 3, являющаяся откачивающим элементом насоса. Криопанель имеет хороший тепловой контакт со второй ступенью машины, температура которой достигает примерно 10. Для снижения теплопритока к криопанели со стороны теплых стенок насоса и откачиваемой камеры предусмотрен жалюзийный экран 2, который имеет хороший тепловой контакт с первой ступенью машины 8. Температура экрана поддерживается на уровне 80 К.

На первой ступени конденсируются пары воды и пары углеводородов, на второй — азот, кислород, неон, углекислый газ. Для откачки водорода на нижнюю поверхность криопанели второй ступени наносят слой активированного угля, который сорбирует водород. При этом крионасосы такого типа практически не откачивают гелий.

В картере 12 размещены компрессорный поршень 9 и шатуны привода, сидящие на эксцентриковых втулках 11 и 13 вала 14 встроенного



**Рис. 1.19.** Конденсационный насос со встроенным криогенератором

электродвигателя 15. Картер криогенератора через кран 10 заполняется газообразным гелием под 16...20 атм (1,62...2,03 МПа).

Криогенератор работает следующим образом. Газ, сжатый компрессорным поршнем 9 до давления 35...40 атм (3,55...4,06 МПа), поступает в водяной холодильник 16, где отводится теплота сжатия. Затем газ по каналу 17 проходит через сетчатый регенератор 7, расположенный в вытеснителе. Часть газа поступает в полость расширения 6 первой ступени, а другая часть, пройдя регенератор 5, поступает в полость расширения 4 второй ступени. При движении поршня вниз происходит расширение газа в обеих ступенях и его охлаждение.

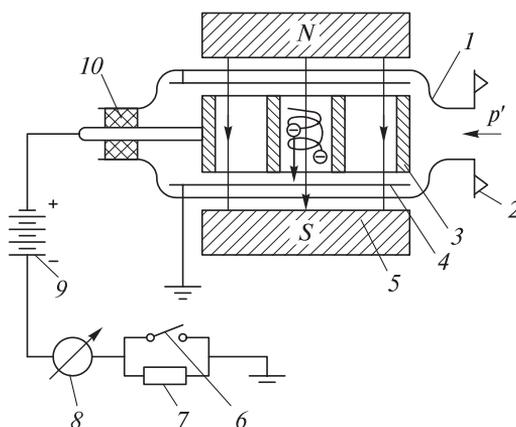
Быстрота действия серийно выпускаемых конденсационных насосов достигает  $10^5$  л/с, предельное остаточное давление составляет менее  $10^{-7}$  Па.

### 1.6.5. ИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип работы ионных насосов основан на сорбции ионизированных молекул газа сорбентами (геттерами), использующими принцип хемосорбции. При этом для повышения эффективности процесса поглощения ионизированные молекулы газа (ионы) с помощью электрического поля принудительно направляются к сорбирующей поверхности и с большой силой «вбиваются» в нее.

В качестве геттера используется титан (иногда в сплаве с цирконием) вследствие высокой энергии сорбции, позволяющей прочно удерживать сорбированные молекулы. На практике применяют два вида ионных насосов, различающиеся способом увеличения траектории электронов и способом испарения титана: магниторазрядные и геттеро-ионные насосы.

Первичные электроны (рис. 1.20), образовавшиеся в центре ячеек ячеистого анода (например, вследствие космического излучения), ионизируют молекулы находящегося в объеме ячеек газа. Образовавшиеся вторичные электроны устремляются к стенкам ячеек положительно заряженного анода. Поперечное магнитное поле превращает их траекторию в архимедову спираль, лежащую в плоскости, нормальной к магнитным силовым линиям. Увеличение траектории электронов резко повышает вероятность ионизации остальных молекул газа. Образовавшиеся ионы, летят к титановым катодам и, бомбардируя их, распыляют титан на стенки ячеек анода. Таким образом, катоды поглощают газ в виде ионов, а аноды — в виде нейтральных молекул (поглощая их свежераспыленной титановой пленкой).



**Рис. 1.20.** Схема конструкции магниторазрядного насоса:

1 — корпус; 2 — фланец для крепления к вакуумной системе (камере); 3 — ячеистый анод; 4 — катод (два катода по обе стороны анода); 5 — магнит, образующий поперечное магнитное поле; 6 — переключатель для работы в среднем либо в высоком вакууме; 7 — дополнительное сопротивление для работы в среднем вакууме; 8 — амперметр; 9 — высоковольтный источник; 10 — токвод

Свойство геттерных насосов откачивать различные газы с разной скоростью (селективность откачки) может быть использовано для целей течеискания. Так, обдувая негерметичную вакуумную систему аргоном или гелием, при попадании струи пробного газа на место течи оператор наблюдает

увеличение давления, поскольку эти газы медленнее откачиваются (медленнее, чем  $N_2$  и  $O_2$ , составляющие основу атмосферы).

Ионные насосы работают в широком диапазоне давлений:  $10^{-1} \dots 10^{-7}$  Па. Максимальное (стартовое) рабочее давление насоса составляет 1 Па. Насос может быть прогрет до температуры  $450^\circ C$  без магнитов или до  $150^\circ C$  в сборе с магнитами.

## Тесты к лекции 6

### **1. В чем заключается принцип действия диффузионного насоса?**

- а) в захвате молекул газа струей пара и их переносе из области входного патрубка насоса к его выпускному патрубку;
- б) в специальном направлении потока паров масла, совпадающем с направлением движения молекул газа;
- в) в распределении откачиваемых газов по типам за счет системы сопел, обеспечивающих разную скорость паров масла.

### **2. Особенностью турбомолекулярных насосов является:**

- а) отсутствие обратного движения молекул из полости насоса в вакуумную камеру;
- б) откачка любых типов газа с одинаковой скоростью;
- в) возможность откачки с атмосферного давления.

### **3. Криогенный насос используется для:**

- а) откачки газов, у которых температура конденсации выше температуры холодных поверхностей насоса;
- б) преимущественной откачки гелия;
- в) преимущественной откачки паров воды.

### **4. Магниторазрядный насос является наилучшим выбором для:**

- а) получения высокого и сверхвысокого вакуума в рабочих камерах большого объема;
- б) откачки больших потоков газа;
- в) откачки гелия.