

Р и с. 2.42. Схемы электродов и процессы их распыления в насосах с рибристым катодом (а) и тремя электродами (б)

**Главным преимуществом магнитных электроразрядных вакуумных насосов является получение с их помощью вакуума, свободного от загрязняющих примесей органических веществ.** Эти насосы характеризуются низким предельным остаточным давлением ( $<10^{-8}$  Па). Верхний предел рабочих давлений определяется газовыделением из-за перегрева электродов насоса. При давлении более  $10^{-3}$  Па длительная работа насоса возможна лишь при дополнительном охлаждении его электродов. Запуск насоса возможен и с 1 Па.

Скорость откачки электроразрядных насосов в первом приближении определяется величиной разрядного тока, являющегося функцией давления, конфигурации ячейки, величин полей. Насосы обладают особенностью саморегулировать расход энергии и запаса титана в зависимости от величины рабочего давления. Электроразрядные насосы просты в эксплуатации, для них требуется только источник электропитания, а по току разряда в насосе можно оценивать давление в системе. По сравнению с испарительными и геттерными насосами электроразрядные имеют в 10 раз больший ресурс работы, что определяется значительным запасом титана в катодных пластинах и решетках. При разрежении  $\sim 10^{-4}$  Па ресурс работы насоса составляет несколько десятков тысяч часов.

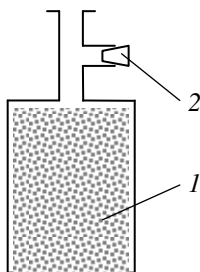
## 2.4. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

### 2.4.1. Адсорбционные насосы

Термин *адсорбционный вакуумный насос* применяется только для насосов, в которых газ адсорбируется по физическому механизму в порах материала, охлаждаемого до температуры жидкого азота. Эти насосы обычно применяют для получения предварительного вакуума – от атмосферного до давлений около 1 Па.

В качестве поглощающего материала сначала использовался активированный уголь. Усовершенствование адсорбционных насосов было достигнуто благодаря использованию новых адсорбционных материалов – так называемых «молекулярных сит». Молекулярное сито представляет собой синтетически приготовленный *цеолит* – натриевые и кальциевые алюмосиликаты. В кристаллах цеолита заключено большое количество кристаллизационной воды, поэтому после её удаления при нагревании получается пористое вещество с размерами пор 0,4–1,0 нм, сравнимыми с диаметром молекул газа ~0,3 нм. Благодаря высокопористой структуре цеолит обладает большой эффективной площадью поверхности, примерно в 40 000 раз превышающей внешнюю поверхность гранулы и составляющей величину до 1000 м<sup>2</sup> на 1 г цеолита.

Основной конструктивный элемент цеолитового насоса – камера, внутри которой помещён цеолит (рис. 2.43).



Р и с. 2.43. Схема адсорбционного цеолитового насоса:

1 – цеолит;

2 – предохранительный клапан

Насос активируют прогревом приблизительно до 200 °С при открытом на атмосферу выпускном клапане. За счет нагрева цеолита из него удаляются пары воды, составляющие основную часть газа, поглощенного цеолитом при комнатной температуре. После завершения прогрева выпускной клапан закрывается, цеолит охлаждает-

ся до температуры жидкого азота, открывается клапан на систему и производится откачка.

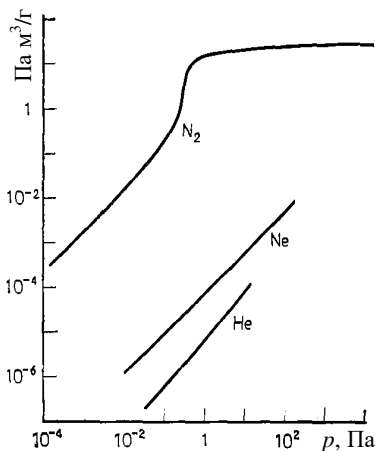
Особенности конструкции и области применения адсорбционных цеолитовых насосов определяются следующими факторами:

- эффектом насыщения;
- избирательной откачкой по разным газам;
- теплопроводностью гранул цеолита.

Важность первых двух факторов легко понять из рассмотрения процесса адсорбции. Полное число молекул газа, которые могут быть поглощены поверхностью единичной площади  $N_{\text{Пнас}}$ , определяется из условия сорбционного равновесия –  $dN_{\text{П}}/dt = 0$ . В этом случае  $v_{\text{Ад}} = v_{\text{Дес}}$  (см. (2.9)) и

$$N_{\text{Пнас}} = f \cdot p \cdot \exp(E/RT_{\text{П}}) / (B\sqrt{2\pi mkT_{\text{П}}}), \quad (2.10)$$

т.е.  $N_{\text{Пнас}}$  пропорционально давлению  $p$  и экспоненциально уменьшается с повышением температуры поверхности  $T_{\text{П}}$  при  $E > 0$  (физическая адсорбция). Данная зависимость при постоянном давлении представляет собой изотерму адсорбции и является важной характеристикой адсорбента.

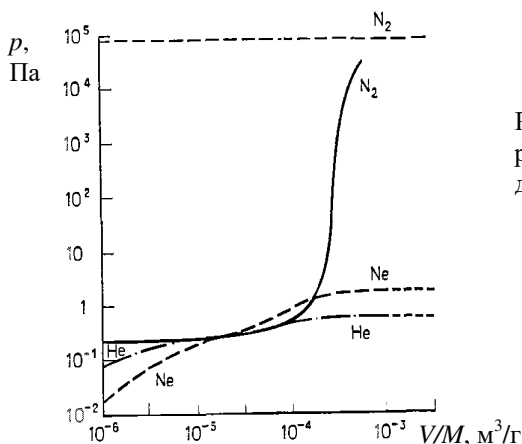


Р и с. 2.44. Зависимости от давления количества адсорбируемого цеолитом газа при температуре жидкого азота

Величина энергии связи  $E$  в случае физической адсорбции практически не зависит от типа адсорбента, а определяется, по существу, составом поглощаемого газа. Она равна теплоте адсорбции и возрастает с повышением температуры кипения газа. Влияние

энергии  $E$  на изотерму адсорбции цеолита показано на рис. 2.44, откуда видно, что при температуре жидкого азота 77 К молекул азота поглощается намного больше, чем неона и гелия, что следует из энергии связи этих газов: Ne – 0,590, N<sub>2</sub> – 15 кДж/моль. Наблюдаемый эффект насыщения для азота объясняется образованием на поверхности однородного монослоя и последующим снижением скорости адсорбции. Молекулярная плотность монослоя поглощенного газа составляет около  $5 \cdot 10^4$  молекул на  $1 \text{ см}^2$ .

Из изотерм адсорбции можно оценить предельное разрежение, создаваемое грамм-молекулой цеолита в сосуде объемом  $V$  при начальном давлении  $p$ . На рис. 2.45 представлена зависимость предельного разрежения от величины отношения  $V/M$  ( $M$  – масса цеолита). При  $V/M < 10^{-4} \text{ м}^3/\text{г}$  парциальные давления Ne, He и N<sub>2</sub> одного порядка. Далее остаточное давление азота возрастает на несколько порядков величины, что объясняется значительным его поглощением.



Для получения более низкого давления целесообразна работа двух и более цеолитовых насосов. Первый насос снижает давление N<sub>2</sub> на шесть порядков (до  $10^{-1}$  Па); давление Ne уменьшается при этом только на порядок, т.е. до  $\sim 5 \cdot 10^{-1}$  Па. Остаточный газ после работы первого насоса будет состоять в основном из Ne, и второй насос сможет откачать Ne до давления около  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. При этом давление N<sub>2</sub> снизится до  $10^{-5}$  Па. Использование пары

насосов предпочтительнее также из-за возможности значительного уменьшения парциального давления активных газов –  $N_2$ ,  $O_2$  и паров  $H_2O$ , причем насосы могут поочерёдно регенерироваться (прогреваться), обеспечивая непрерывную откачку системы.

В конструкциях цеолитовых вакуумных насосов учитываются следующие соображения:

- весь цеолит должен быть хорошо охлаждён, так как в противном случае оставшиеся «тёплыми» гранулы становятся источниками газа;
- насос должен иметь достаточную проводимость для потока газа, чтобы обеспечить поглощение газа всем объёмом цеолита.

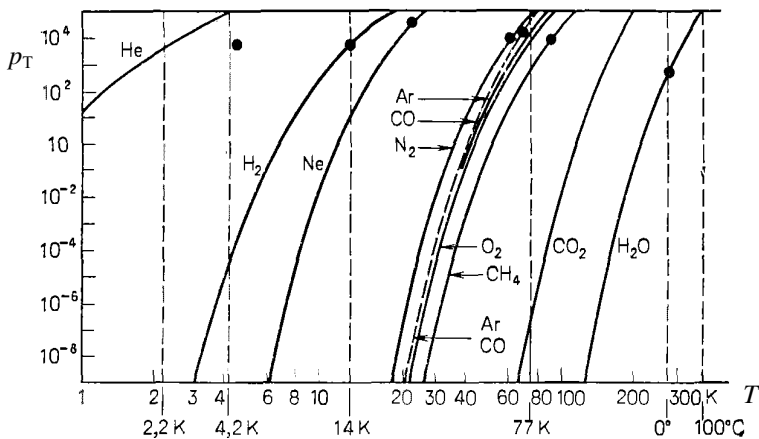
Соответственно насосы небольших размеров выполняются в виде удлинённых цилиндров, крупные насосы имеют кольцевую форму для лучшего охлаждения цеолита.

Цеолитовые вакуумные насосы нашли применение в вакуумных системах с повышенными требованиями к чистоте остаточного газа (отсутствию углеводородных загрязнений, паров воды и т.д.). Простота конструкции, высокая надёжность в работе, широкий диапазон рабочих давлений являются достоинствами этих насосов. Перевод цеолитового насоса в криогенный режим дает возможность дальнейшего снижения предельного давления.

#### 2.4.2. Криогенные насосы

Ранее рассматривалось, что холодная поверхность способна адсорбировать газ по физическому механизму до установления условий сорбционного равновесия. Адсорбированные молекулы газа образуют на поверхности мономолекулярный слой, после чего откачка практически прекращается. В условиях сорбционного равновесия при  $T_{\Gamma} = T_{\Pi}$  скорости  $v_{\text{Ад}} = v_{\text{Дес}}$ . Поэтому предельное остаточное давление  $p_{\text{ПР}} = p_{\Gamma}$ , где  $p_{\Gamma}$  – давление насыщенного пара. При повышении давления газа сверх  $p_{\Gamma}$  происходит конденсация газа на поверхности с образованием полимолекулярного слоя в виде жидкой или твёрдой фазы. **Давление  $p_{\Gamma}$  определяется температурой, следовательно, охлаждение стенок вакуумной камеры является ещё одним средством откачивания газов.**

Зависимости от температуры давления насыщенных паров и газов, обычно присутствующих в вакуумных системах, представлены на рис. 2.46.



Р и с. 2.46. Зависимости  $p_T$  газов и паров от температуры

При температуре кипения жидкого азота (77 К) сильнее всего снижается давление паров воды ( $<10^{-7}$  Па), а давление насыщенных паров N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO и т.п. остается приблизительно равным атмосферному. При снижении температуры до 20 К (температура кипения жидкого водорода) давление  $p_T$  указанных газов становится ниже  $10^{-6}$  Па. Только Ne, H<sub>2</sub> и He ещё сохраняют довольно высокие давления  $p_T$ . При температуре кипения жидкого He (4 К) давление неона становится ниже  $10^{-10}$  Па, а водорода – порядка  $10^{-5}$  Па.

Таким образом, **охлаждая вакуумную систему до температуры жидкого гелия, можно создавать сверхвысоковакуумное разрежение практически по всем газам, кроме гелия и водорода.** Такое получение вакуума путём конденсации называется *криоконденсацией* или *криооткачкой*. Охлаждение всей вакуумной системы затруднительно, поэтому криооткачку обычно осуществляют с помощью специального присоединяемого к откачиваемой камере *вакуумного крионасоса* с охлаждаемыми до низких температур поверхностями.

Быстрота откачки и предельное остаточное давление крионасоса могут быть найдены из выражения (2.9):

$$\frac{dN_{\Pi}}{dt} = v_{\text{Ад}} - v_{\text{Дес}}.$$

Однако, поскольку в равновесии  $v_{\text{Ад}} = v_{\text{Дес}}$ , скорость десорбции можно записать так (см. (1.25)):

$$v_{\text{Дес}} = f_{\text{Пп}} \cdot p_{\text{Т}} / \sqrt{2\pi mkT_{\text{П}}},$$

где  $f_{\text{Пп}}$  – коэффициент прилипания при температуре поверхности  $T_{\text{П}}$ ,  $p_{\text{Т}}$  – давление насыщенных паров при той же температуре. Тогда запишем уравнение (2.9) в виде

$$\frac{dN_{\Pi}}{dt} = v_{\text{Ад}(T_{\text{Г}})} - v_{\text{Дес}(T_{\text{П}})} = \left( f_{\text{Гп}} \frac{p}{\sqrt{T_{\text{Г}}}} - f_{\text{Пп}} \frac{p_{\text{Т}}}{\sqrt{T_{\text{П}}}} \right) / \sqrt{2\pi mk},$$

где  $f_{\text{Гп}}$  – коэффициент прилипания газа с температурой  $T_{\text{Г}}$  к поверхности с температурой  $T_{\text{П}}$ .

Предельное давление достигается при  $dN_{\Pi}/dt \rightarrow 0$ , откуда

$$p_{\text{Пр}} = p_{\text{Т}} \cdot \frac{f_{\text{Пп}}}{f_{\text{Гп}}} \sqrt{\frac{T_{\text{Г}}}{T_{\text{П}}}}, \quad (2.11)$$

т.е.  $p_{\text{Пр}}$  будет несколько выше давления насыщенного пара  $p_{\text{Т}}$ , соответствующего температуре поверхности  $T_{\text{П}}$ . Воспользовавшись выражением для  $p_{\text{Т}}$  через  $p_{\text{Пр}}$  (2.11), получим

$$\frac{dN_{\Pi}}{dt} = f_{\text{Гп}}(p - p_{\text{Пр}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{Г}}}}. \quad (2.12)$$

Коэффициент прилипания  $f_{\text{Гп}}$  для молекул, сталкивающихся с очень холодной поверхностью, может достигать больших значений – от 0,8 до 1. Следовательно, для давлений, превышающих  $p_{\text{Пр}}$  более чем на порядок, **эффективность откачивающего действия криогенной поверхности приближается к предельному значению**, определяемому числом молекул, сталкивающихся с единичной поверхностью в единицу времени:

$$\frac{dN_{\Pi}}{dt} \rightarrow \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{Г}}}},$$

$$S_{\text{макс}} = \frac{dN_{\text{II}}}{dt} \cdot \frac{1}{n_{\text{Г}}} = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{Г}}}} \cdot \frac{kT_{\text{Г}}}{p} = \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{Г}}}{m}}$$

В табл. 2.2 приведены значения теоретической максимальной быстроты действия  $S_{\text{макс}}$  в зависимости от температуры и рода газа. Такая быстрота действия значительно больше, чем в возможна на случае диффузионного насоса или ТМН. Кроме того, в отличие от адсорбционного насоса, **криповерхность не подвержена насыщению при высоких газовых нагрузках.**

Таблица 2.2

Быстрота действия единицы криповерхности  $S_{\text{макс}}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с

$T_{\text{Г}}$ , К	Газ			
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ne	H <sub>2</sub>
293	118	110	139	442
78	61	57	72	228

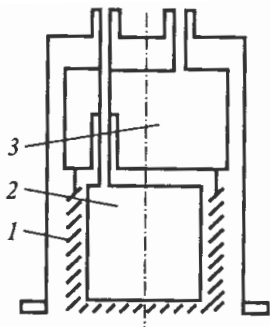
Следует отметить, что в случае образования на криповерхности сконденсированного слоя слишком большой толщины он может расслаиваться; также может возникать градиент температуры по толщине слоя, что в свою очередь может снизить эффективность откачки. Поэтому, ввиду ограничений криоадсорбционной ёмкости, крионасосы используются совместно с насосами других типов, позволяющими создавать предварительное разрежение 10 Па или ниже. Тем не менее крионасосы имеют такие неоспоримые достоинства, как:

- высокая быстрота действия;
- отсутствие загрязняющих примесей;
- высокая криоадсорбционная емкость;
- способность создавать разрежения ниже 10<sup>-8</sup> Па (при условии удаления из системы Ne);
- легкость регенерации путем повышения температуры и откачивания адсорбированного газа вспомогательным насосом.

В больших вакуумных системах обычно используются охлаждаемые жидким гелием *криопанели*. Конструктивные схемы этих вакуумных насосов построены по общему принципу. Вокруг криопа-



нели размещают охлаждаемый жидким азотом теплозащитный экран, проницаемый для газа, но отражающий тепловое излучение (рис. 2.47). Кроме того, экран связывает такие легкоконденсирующиеся газы и пары, как  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .



Р и с. 2.47. Схема криогенного насоса:

- 1 – тепловой экран;
- 2 – ёмкость с жидким гелием;
- 3 – сосуд для жидкого азота.

Такие насосы называются насосами *заливного типа*. В другом случае насосы снабжаются автономными криогенераторами.