

Зазоры в насосе составляют величины порядка 1 мм, что при высоких скоростях вращения обеспечивает надежность их работы. Удельная быстрота откачки может составлять ~ 2 л/с на 1 см^2 площади входного отверстия. Быстрота откачки слабо зависит от рода газа. Предельное давление насосов 10^{-7} – 10^{-8} Па. С увеличением молекулярной массы газа коэффициент компрессии растёт за счет уменьшения перетечек газа через зазоры и увеличения отношения линейной скорости ротора к тепловой скорости молекул. Наибольшее $p_{\text{вып}}$ таких насосов для воздуха 1–10 Па.

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.

Конструкции современных ТМН оптимизируются с точки зрения максимальной скорости вращения ротора и уменьшения миграции масла из подшипников. Ротор часто расположен вертикально, вместо подшипников используются газодинамические и магнитные подвески. Создаются комбинированные варианты насосов, соединяющие высокую быстроту откачки ТМН и большую степень сжатия молекулярного насоса.

2.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Действие физико-химических вакуумных насосов основано на связывании активных газов пленкой или слоем поглотителя (*геттера*); возможно также внедрение молекул или ионов газов в граничные поверхности. Таким образом, этот класс вакуумных насосов относится к насосам поверхностного действия или к *газоулавливающим вакуумным насосам*, в которых реализован второй способ откачки – поглощение газа насосом.

2.3.1. Сорбционная откачка

В основе работы большинства вакуумных насосов, альтернативных газоперекачивающим насосам, так или иначе лежат **сорбционные процессы**. Такие насосы называются *сорбционными*. Извест-

но, что на любой поверхности в результате ее бомбардировки молекулами окружающего газа протекают одновременно и непрерывно процессы адсорбции и десорбции молекул газа. Выяснено, что в процессе адсорбции возникают физические и химические связи между молекулами газа и поверхностью. В условиях равновесия скорости сорбционных процессов (см. 1.3.2) $v_{\text{ад}} = v_{\text{дес}}$ и, следовательно, число молекул газа на поверхности N_{Π} остается неизменным. Однако при нарушении условий равновесия поверхность становится либо источником газа, либо его поглотителем – насосом. Можно определить общую скорость изменения количества молекул, адсорбированных поверхностью единичной площади

$$\frac{dN_{\Pi}}{dt} = v_{\text{ад}} - v_{\text{дес}} = \frac{fp}{\sqrt{2\pi mkT_{\Gamma}}} - BN_{\Pi} \exp\left(-\frac{E}{RT_{\Pi}}\right), \quad (2.9)$$

где T_{Γ} и T_{Π} – температуры газа и поверхности соответственно. Чтобы поверхность могла служить насосом, необходимо, чтобы $dN_{\Pi}/dt > 0$. Для этого нужно либо увеличивать энергию связи с поверхностью E и вероятность прилипания f , либо уменьшать T_{Π} . Поскольку общая скорость поглощения молекул поверхностью равна $A \cdot (dN_{\Pi}/dt)$, получаем еще один параметр, определяющий скорость сорбционной откачки – эффективную площадь поверхности A .

Однако следует иметь в виду, что в процессе адсорбции N_{Π} и, следовательно, $v_{\text{дес}}$ возрастают, что приводит к уменьшению скорости откачки до тех пор, пока, в конце концов, при $dN_{\Pi}/dt \rightarrow 0$ не установится новое равновесие. Таким образом, **вакуумные насосы поверхностного действия имеют ограничивающий фактор, связанный с газовой емкостью поглощающего материала.** Для увеличения активной поверхности металла при его взаимодействии с откачиваемыми газами используется нанесение тонких пленок. Возможность обновления пленки металла на поглощающей поверхности значительно увеличивает срок службы насоса. **Сорбционные характеристики пленок сильно зависят от условий их образования.** Пленка, осажденная при низкой температуре, имеет пористую структуру, что приводит к значительному повышению скоростей поглощения газов в силу развитой эффективной площади поверхности.

2.3.2. Геттерные насосы

Принцип действия *геттерных вакуумных насосов* основан на **химическом связывании газов материалом геттера**. Показателем активности газа является его теплота адсорбции на данной поверхности Q_A , определяющая энергию связи с поверхностью. Наибольшее распространение в качестве геттеров в вакуумных насосах получили металлы: Ti, Zr, Ta, Ba, Mo, W, Hf, Er. Теплота адсорбции при малых степенях заполнения поверхности сильно зависит от рода газа (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Теплота адсорбции газов на поверхности Ti

Газ	H ₂	CO	N ₂	O ₂	CO ₂	Ar
Q_A , кДж/моль	19,3	419	356	813	461	8,38

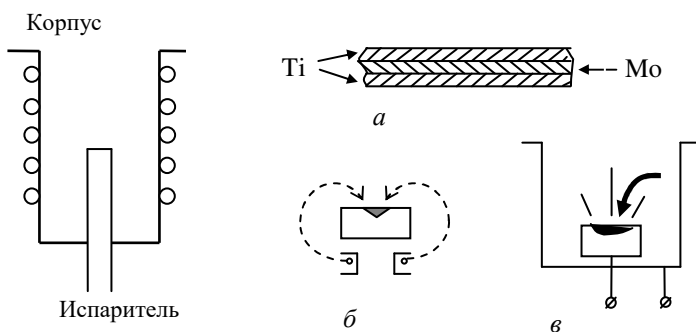
Хемосорбция характеризуется образованием прочной химической связи между поглощенной молекулой и поверхностью в результате химической или псевдохимической реакции. При этом величина энергии связи E существенно больше, чем при физической сорбции. Поэтому скорость десорбции хемосорбированных газов низка даже при комнатной температуре. Химическая связь обычно возникает между первыми слоями газа и поверхностью, когда выполняется условие $v_{AD} > v_{ДЕС}$. Для того чтобы получить высокую степень разрежения, необходимо либо использовать активную поверхность достаточно большой площади, либо непрерывно её регенерировать. Поскольку поглощаемые молекулы образуют с активной поверхностью довольно прочные связи, невозможно регенерировать поверхность простым повышением температуры.

Молекулы газа при повышении температуры частично будут диффундировать вглубь поглотителя, образуя химические связи с атомами кристаллической решетки. Однако в любом случае сорбционная емкость поглотителя конечна, и поэтому геттерные насосы применяются только в условиях предварительного разрежения не хуже 1 Па. Такие насосы обеспечивают высокую скорость откачки в течение ограниченного периода времени.

В процессе исследовательских работ и эксплуатации были выбраны наиболее эффективные геттеры, которые подразделяют на испаряющиеся и неиспаряющиеся. Аналогично существуют два типа хемосорбционных вакуумных насосов: так называемые *испарительные* (или *сублимационные*), в которых испарение геттера происходит непрерывно или через отдельные промежутки времени, и насосы, в которых используются неиспаряемые геттеры.

Испарительные геттерные насосы

К испаряющимся относятся геттеры, которые в результате их нагревания и испарения образуют пленку металла на относительно более холодных поверхностях. Материалами для геттеров в испарительных насосах промышленного производства служат тугоплавкие металлы (например, Ti), поскольку изготавливаемые из них нагревательные элементы могут непрерывно в течение длительного времени испарять со своей поверхности металл. Конструкции испарительных вакуумных насосов в основном определяются типом испарителя (установленного в некотором объеме), на стенки которого напыляется геттер. Испарители бывают прямонакальные, подогревные, электронно-лучевые и дуговые (рис. 2.36).



Р и с. 2.34. Схема испарительного насоса и типы испарителей

В качестве прямонакального испарителя используется биметаллическая проволока с молибденовым керном (рис. 2.34, а), покры-

тая слоем Ti. Через керн пропускается прямой ток до 200 А, и при этом температура Ti достигает 1423 К, что достаточно для его испарения. Максимальная скорость испарения 1 мг/с.

Электронно-лучевой испаритель представляет собой электронную пушку с вольфрамовым термокатодом, помещенную в поперечное магнитное поле (рис. 2.34, б). Ускоряющее напряжение между пушкой и катодом составляет тысячи вольт. Скорость испарения из жидкой фазы достигает 30 мг/с.

В дуговых испарителях материал расплывается в катодном пятне дуги постоянного тока ($I \sim 10^6$ А/см²). Дуга горит в парах испаряемого материала, что позволяет поддерживать ее горение даже в условиях сверхвысокого вакуума (рис. 2.34, в). Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока с напряжением 30–50 В и током 100–180 А. Скорость испарения может достигать 20 мг/с.

Очевидно, что **быстрота действия испарительных вакуумных насосов определяется главным образом площадью поверхности активной, незаполненной газами пленки геттера**. Таким образом, S_0 зависит от скорости осаждения геттера, и для того чтобы быстрота действия оставалась постоянной по мере связывания откачиваемого газа и расхода пленки, необходимо испарять соответствующее количество геттера. Поскольку **расход геттера зависит от давления откачиваемого газа**, нецелесообразно конструировать насос для непрерывной откачки в широком диапазоне давлений. Поэтому промышленные насосы работают в импульсном режиме, обеспечивающем необходимую среднюю быстроту откачки. Оптимальные режимы работы в каждом конкретном случае определяются опытным путем. Например, для давлений 10^{-4} Па осаждение пленки должно повторяться каждые 5 мин, а при 10^{-6} Па – 10 мин.

Быстрота поглощения газа пленкой S_0 зависит от ее материала, рода газа и температуры пленки. Для 1 см² титановой пленки S_0 для H₂ и N₂ при 293 К соответственно равны $15 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-3} , а при 77 К – $26 \cdot 10^{-3}$ и $7 \cdot 10^{-3}$ м³/(с·м²).

В насосах испарительного типа предельное давление составляет 10^{-7} – 10^{-9} Па. Охлаждение активной пленки до температуры жидкого азота снижает эту величину до 10^{-11} Па. Верхний предел рабочих

давлений, равный 10^{-2} Па, ограничивается образованием во время испарения на поверхности активного материала оксидов, нитридов и карбидов, что снижает скорость испарения.

Неиспарительные геттерные насосы

Неиспаряемый геттер обеспечивает процесс откачки остаточных газов без необходимости нанесения свежей геттерирующей пленки. Основным требованием, предъявляемым и таким насосам, является необходимость предварительной активации геттера в вакууме при температуре около $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы адсорбированные поверхностные слои диффундировали в объем поглотителя.

Процесс поглощения газа неиспаряющимся геттером определяется диффузией газа, так что скорость поглощения возрастает с температурой (особенно выше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Активные газы реагируют с поглотителем, образуя стабильные химические соединения, поэтому обратного выделения этих газов не наблюдается вплоть до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Инертные газы, вследствие малой теплоты адсорбции, не поглощаются геттерами.** В неиспарительных геттерных насосах в качестве геттеров используют, например, алюминий-циркониевый сплав.

После пребывания на атмосфере геттер может быть снова активирован, причем процедуру можно повторять до тех пор, пока не произойдет полное насыщение геттера.

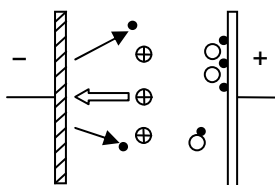
2.3.3. Ионные насосы

В ионных вакуумных насосах **поглощение геттером сочетается с электрической, иначе, ионной откачкой газов.** Эффектом ионного откачивания объясняется хорошо известное в технике явление постепенного исчезновения газа в работающих газоразрядных приборах. Ионное откачивание газов определяется главным образом следующими причинами:

- ионизованные молекулы активных газов (O_2 , N_2 , H_2 , CO_2) обладают значительно более высокой химической активностью по сравнению с нейтральными молекулами;

- ионы (в том числе инертных газов), ускоряясь в электрическом поле, приобретают значительную кинетическую энергию и вследствие этого могут проникать вглубь поверхности, о которую они ударяются.

Кроме того, возникают вторичные эффекты, обусловленные распылением металла катода при бомбардировке его ионами. Образующиеся при этом частицы металла при столкновении с молекулами газа могут их захватывать, обеспечивая тем самым откачивание газа (рис. 2.35). Осаждаясь на окружающие поверхности, распыленные частицы металла создают поглощающую пленку, аналогичную пленке геттера в испарительном насосе.



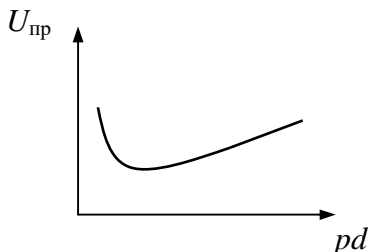
Р и с. 2.35. Схема процессов в ионном насосе:

○ – молекулы газа;

⊕ – ионы;

• – распыленный материал

Для реализации ионной откачки необходимо обеспечить в первую очередь эффективную ионизацию молекул газа. При высоких давлениях, например атмосферном, длина свободного пробега электронов очень мала, и, следовательно, для ионизации газа требуется высокая напряженность электрического поля. При таких давлениях основным механизмом гибели ионов является их рекомбинация в газовой фазе и откачивающий эффект будет незначительным. По мере уменьшения давления длина свободного пробега электронов увеличивается, соответственно уменьшается напряженность, необходимая для ионизации (рис. 2.36).



Р и с. 2.36. Зависимость напряжения пробоя в газе от давления p и расстояния между электродами d

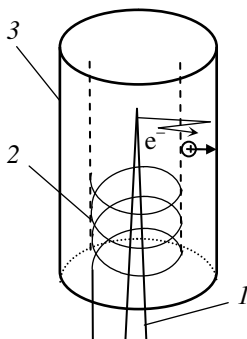
При давлениях около 1 Па возникает значительный ионизационный ток, а рекомбинация ионов происходит главным образом на поверхности, обеспечивая эффективное связывание газа. При более низких давлениях, например 10^{-2} Па, длина свободного пробега электрона становится больше размеров вакуумной камеры (при 10^{-6} Па $\lambda_e \sim 6$ км) и вероятность ионизационного столкновения электрона с молекулой газа очень мала. В этом случае для ионизации необходимы поля с высокой напряженностью, а токи получаются слабыми. То есть **электрический разряд между двумя электродами создает откачивающий эффект только в ограниченном диапазоне давлений.**

С другой стороны, поскольку общее количество газа, которое может быть связано поверхностью, ограничено, такой способ откачки представляет интерес лишь в условиях низких давлений, когда эффекты насыщения не возникают. Поэтому ионные насосы рассчитаны на работу при низких давлениях. Для реализации же ионной откачки необходимо обеспечить высокую степень ионизации газа при таких давлениях, не прибегая при этом к слишком высоким напряжениям.

Известны два метода эффективной ионизации газа при низких давлениях:

- 1) создание большого числа свободных электронов;
- 2) увеличение пути ионизации.

Поскольку эффективность образования электронов не слишком велика, их получение в больших количествах ограничено исключительно энергетическими соображениями. Поэтому при конструировании ионных насосов обычно останавливаются на втором методе.



Р и с. 2.37. Схема трехэлектродного ионизатора с цилиндрическим коллектором ионов

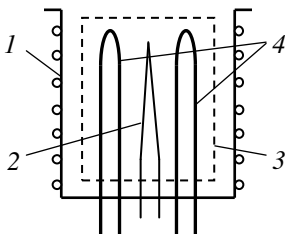
Существует несколько вариантов конфигураций электромагнитных полей, находясь в которых, электроны совершают либо колебательное движение, либо движутся по спирали в некотором ограниченном пространстве.

На рис. 2.37 представлена простейшая схема ионизатора, включающая осевой вольфрамовый термокатод прямого накала 1, тонкую анодную сетку 2 и цилиндрический коллектор ионов 3. Благодаря электрическому полю электроны совершают многократные пролеты внутри «прозрачного» сеточного анода, обеспечивая эффективную ионизацию молекул газа электронным ударом. Прикладываемое к сетке положительное напряжение около 10^3 В. Ионы газа собираются на коллекторе. Средняя быстрота откачки такого ионного насоса примерно 10^{-4} м³/с.

Собственная эффективность ионной откачки невысока, поэтому большинство насосов совмещают ионную откачку с геттерной. Различаются эти насосы по способу нанесения геттерной пленки.

Испарительно-ионные насосы

В *испарительно-ионных вакуумных насосах для образования геттерной пленки применяются нагреваемые катоды – испарители*. В ионизатор вводится дополнительная нить накала, покрытая, например, титаном (рис. 2.38).

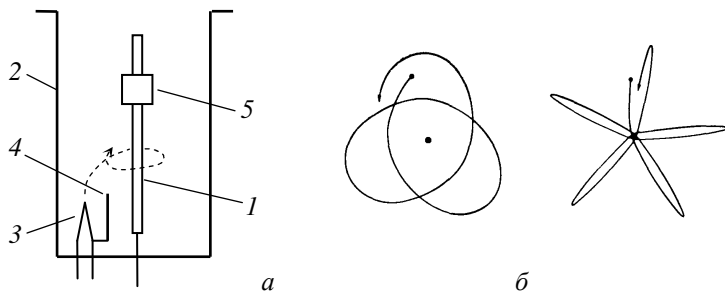


Р и с. 2.38. Схема испарительно-ионного насоса:

- 1 – охлаждаемый корпус;
- 2 – термокатод;
- 3 – анодная сетка;
- 4 – испарители

Ионизированный газ хорошо сорбируется активным металлом, напыленным на стенки насоса, а так же вследствие ионной откачки путем внедрения и последующего «замуровывания» положительных ионов в пленках титана. Быстрота действия насоса определяется габаритами корпуса и площадью геттерирующей поверхности. Срок службы фактически зависит от запаса титана в испарителях и скорости его испарения. При мощности на испарителе около 200–250 Вт и запасе титана порядка 10 г срок службы составляет примерно 1000 ч.

Другая электродная система, обеспечивающая эффективную ионизацию молекул остаточных газов при ионной откачке, используется в *орбитронном вакуумном насосе*, показанном на рис. 2.39, а. В данной конструкции, состоящей из концентрических цилиндров анода 1 и корпуса 2, термокатода 3 с экраном 4, достигается существенное увеличение длины свободного пути электронов (до нескольких метров), т.е. создается значительный ионный ток. На анод подается положительное напряжение величиной 4–5 кВ, а к катоду прикладывается положительное напряжение смещения. Ввиду асимметрии электрического поля и разброса векторов начальных скоростей электронов, имеющих радиальную и тангенциальную составляющие, электроны будут двигаться по различным траекториям (рис. 2.39, б).



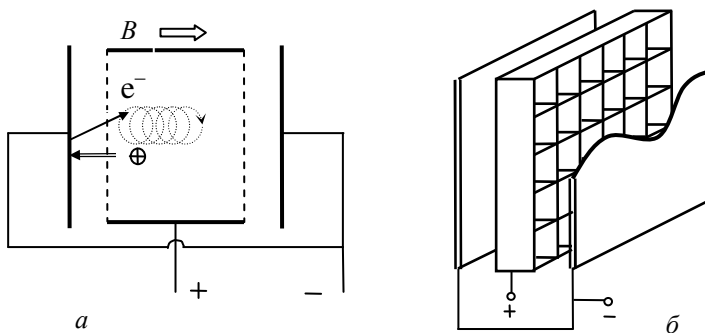
Р и с. 2.39. Схема орбитронного насоса (а) и примеры орбит электронов (б)

Для уменьшения вероятности захвата электронов анод выполняется в виде стержня небольшого диаметра (проволоки). На нем укрепляется навеска 5 геттера (титана). Некоторые близко проходящие электроны попадают на навеску и разогревают ее до температуры испарения, что приводит к нанесению геттерной пленки на внутренней поверхности насоса. Орбитронные насосы довольно компактны. Например, при $S_0 = 50 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ его габариты составляют: диаметр – 10 см, высота – 25 см; потребляемая мощность – 125 Вт.

Для испарительно-ионных насосов возможно достижение разрежения 10^{-9} – 10^{-10} Па при постоянной быстроте действия и отсутствии каких-либо загрязняющих примесей. Однако для их включения требуется предварительное разрежение порядка 10^{-1} Па.

Геттерно-ионные насосы

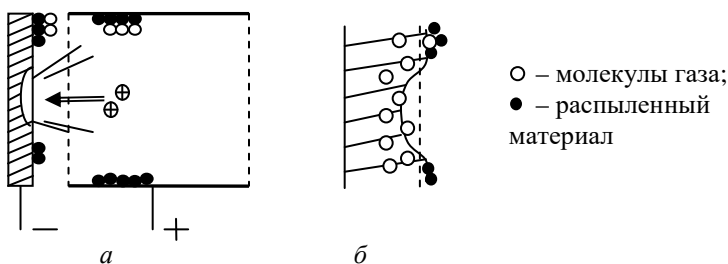
Широко распространенными ионными насосами являются *геттерно-ионные вакуумные насосы с холодным катодом*, в которых **применяется напыление поглощающей поверхности в результате ионной бомбардировки материала электродов**. В основе работы этих насосов используется конструкция ячейки Пеннинга с магнитным полем, состоящая из двух параллельных пластин – катодов и расположенного между ними цилиндрического анода (рис. 2.40, а).



Р и с. 2.40. Схема ячейки Пеннинга (а) и структура электроразрядного вакуумного насоса Холла (б)

Ячейка Пеннинга, по существу, представляет собой электронную ловушку; электроны образовавшиеся вследствие ионизации газа, а также в результате бомбардировки ионами поверхности катода, вынуждены осциллировать в потенциальной яме между катодами. В итоге они перемещаются по длинной винтообразной траектории и, следовательно, обладают высокой ионизационной способностью. Благодаря этому в ячейке с холодным катодом возникает электрический тлеющий разряд, который поддерживается вплоть до давлений порядка 10^{-9} Па.

Параллельное соединение нескольких ячеек в одном корпусе (рис. 2.40, б) применяется в качестве основы высокоэффективного вакуумного насоса. Эта конструкция является базовой моделью для большинства ионных насосов с холодным катодом – *магнитных электроразрядных вакуумных насосов*. Число ячеек в современных насосах превышает несколько тысяч. Магнитное поле, величина индукции которого составляет 0,07–0,15 Тл, образуется постоянными магнитами из феррита бария (2БА, 3БА) или сплавов железа с кобальтом, кобальта с самарием.



Р и с. 2.41. Схемы процессов в электроразрядной ячейке Пеннинга:
а – распыление катода; *б* – насыщение катода газом

Окачивающее действие насоса определяется несколькими физическими процессами (рис.2.41, *а*). Образовавшиеся в разряде ионы ускоряются и приобретают энергию порядка 5 кэВ. В результате бомбардировки ионами металл катода распыляется и покрывает стенки насоса и электроды, образуя непрерывно обновляемую пленку геттера. Ток разряда зависит от давления откачиваемого газа, тем самым **при работе насоса обеспечивается саморегулируемая скорость распыления и нанесения свежего слоя геттера.**

В случае титановых катодов активные газы (N_2 , O_2 , CO , CO_2) химически связываются поверхностью титана, образуя окисы, нитриды и карбиды, либо адсорбируются на ней. Ионы как активных, так и инертных газов в результате ускорения к катодам внедряются в их поверхность. Однако непрерывное распыление катодов будет приводить к обратному выделению не связанного химически газа (рис.2.41, *б*). Так как степень разрушения различных участков катода оказывается неодинаковой, максимальной напротив оси анодного цилиндра, то только те области катода, где происходит постоянное увеличение слоя напыленного металла, будут удалять газ. В основном молекулы инертных газов поглощаются на аноде благодаря механизму адсорбции и последующему замуравыванию напыляемым поверх металлом. В итоге скорость поглощения инертных газов мала и составляет около 1 % скорости поглощения азота. В том случае, когда откачиваемые газы содержат инертные, особенно Ar , рассмотренные выше явления приводят к флуктуации давления, когда происходят периодические выбросы газа, приво-

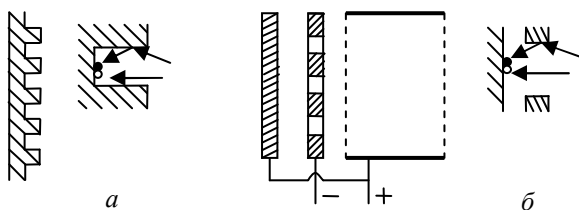
дящие к увеличению давления. Этот эффект называется *аргонной нестабильностью*.

Рассмотрим механизм откачивания водорода. Водород эффективно адсорбируется Ti с образованием псевдогидридов, которые легко диссоциируют при повышении температуры. Кроме того, вследствие малой массы иона водорода его энергии недостаточно для распыления, т.е. поверхностный слой катода плохо очищается и быстро насыщается. Поэтому при откачке H_2 происходит падение скорости откачки с течением времени в процессе достижения равновесия между адсорбцией и диссоциацией гидридов. Выделение газа катодом представляет собой еще одну проблему, характерную для ионного насоса с холодным катодом.

Таким образом, **при откачке смесей газов наблюдается выраженная селективность откачки магнитных электроразрядных насосов.** Данное явление вызвано следующими причинами:

- различием коэффициентов распыления для ионов разных масс;
- различной химической активностью газов.

Низкая скорость откачки инертных газов и аргонная нестабильность потребовали дальнейшего усовершенствования конструкции насоса. Повышение скорости откачки аргона может быть достигнуто разделением областей распыления и осаждения химически активного материала, как, например, в конструкции насоса с ребристыми катодами (рис. 2.42, *а*). Другой вариант – использование трехэлектродного (триодного) насоса (рис. 2.42, *б*). В этой конструкции ячеистый катод играет роль только источника Ti , а сорбирующей поверхностью является находящийся за ним коллектор. Ионы, двигаясь к катоду, проходят через отверстия сетчатого катода, входят в тормозящее поле и с небольшими энергиями достигают коллектора, где нейтрализуются и замуровываются распыленным материалом катода. Быстрота действия при откачке инертных газов в диодных насосах составляет для He – 10 %, Ne – 4 %, Ar , Kr , Xe – 1–2 % от быстроты действия при откачке N_2 . В конструкциях насосов с ребристыми катодами и триодного типа быстрота действия при откачке Ar повышается до 10 и 25 % от быстроты откачки азота.



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