

5

АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

препринт 280

М.Д.Малев, Э.М.Трахтенберг

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ
МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

Новосибирск

1969

110

Отвеченный за выпуск Малев М.Д.
Подписано к печати 20.2.69
Усл. л. печ. л. 100 экз.
Заказ № 280, Новосибирск.

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР, н.н.

М.Д.Малев, Э.М.Трахтенберг

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

А Н Н О Т А Ц И Я

Кратко описан принцип действия и особенности работы магнитоэлектрического насоса. На основании полученных ранее эмпирических формул для скорости откачки и минимального давления насоса предложена методика расчета основных размеров магнитоэлектрического насоса по заданным значениям скорости откачки, рабочего давления и напряженности магнитного поля. Рассмотрено влияние требований к составу остаточной атмосферы и диапазону рабочих давлений на конструкцию основных элементов насоса. Даны практические рекомендации по проектированию встроенных магнитоэлектрических насосов.

ВОЕН. СССР
Институт химии
физики

Достоинства магниторазрядных насосов, обеспечивающие им все более широкое распространение взамен других типов высоковакуумных откачных устройств, общеизвестны: простота эксплуатации, надежность работы, компактность, отсутствие нагреваемых и движущихся частей, возможность получения сверхвысокого вакуума без загрязнения объема тяжелыми углеводородами. В последнее время область применения магниторазрядных насосов расширяется еще больше, так как на их основе очень удобно создавать встроенные откачные средства для таких устройств, как ускорители и накопители заряженных частиц, мощные электронные приборы, установки для термоядерных исследований и т.д.

Встроенные магниторазрядные насосы размещаются в рабочем объеме откачиваемого устройства в непосредственной близости от главных источников газоотделения — этим исключается потеря скорости откачки в вакуумпроводе и обеспечивается наиболее эффективное использование насоса. Не менее важным достоинством встроенных магниторазрядных насосов является возможность использования собственного магнитного поля откачиваемого устройства. Отсутствие необходимости в специальной вакуумноплотной оболочке и магните позволяют предельно упростить конструкцию встроенного насоса, сведя ее по сути дела к двум электродам и одному высоковольтному вакуумному вводу. Встроенные магниторазрядные насосы могут быть сделаны как сосредоточенными (если в откачиваемом объеме имеется локальный источник газоотделения: катод электронной пушки, коллектор быстрых электронов и т.п.), так и распределенными (если источники газоотделения "размазаны" по объему устройства: например, синхротронное излучение релятивистских электронов в накопительном кольце).

К сожалению, опыт разработки промышленных типов магниторазрядных насосов недостаточен для конструирования встроенных насосов. Дело в том, что отечественные и зарубежные образцы промышленных магниторазрядных насосов работают в узком диапазоне магнитных полей — от 1 до 2 кэ / 1 /, тогда как напряженность собственного магнитного поля откачиваемого устройства может варьироваться от 200-300 э/магнетроны и ЛБВ/ до 15-20 кэ (накопители и термоядерные установки). Поэтому в каждом конкретном случае появляется необходимость в разработке встроенного насоса, наилучшим образом приспособленного к созданным условиям.

В настоящей работе предложена методика расчета основных размеров магниторазрядного насоса по заданным значениям рабочего диапазона давлений, скорости откачки и напряженности магнитного поля, и даны некоторые рекомендации по конструированию насосов.

Рассмотрим основные физические процессы в магниторазрядном насосе. Механизм откачки сводится к поглощению газов титаном, распылаемым с поверхности катода ионной бомбардировкой. От обычного сорбционного титанового насоса магниторазрядный насос отличается по сути дела только способом распыления титана (ионная бомбардировка вместо нагрева), однако в этом способе распыления заключено по крайней мере два принципиальных преимущества:

1. Ионный ток, а следовательно и скорость распыления титана, прямо пропорциональны давлению откачиваемого газа, что обеспечивает наиболее полное использование распыленного титана для связывания газа.
2. Кроме чистой сорбции, газ в магниторазрядном насосе связывается ионной откачкой - часть ионов внедряется в толщу катода и остается там - этот механизм особенно важен при откачке инертных газов.

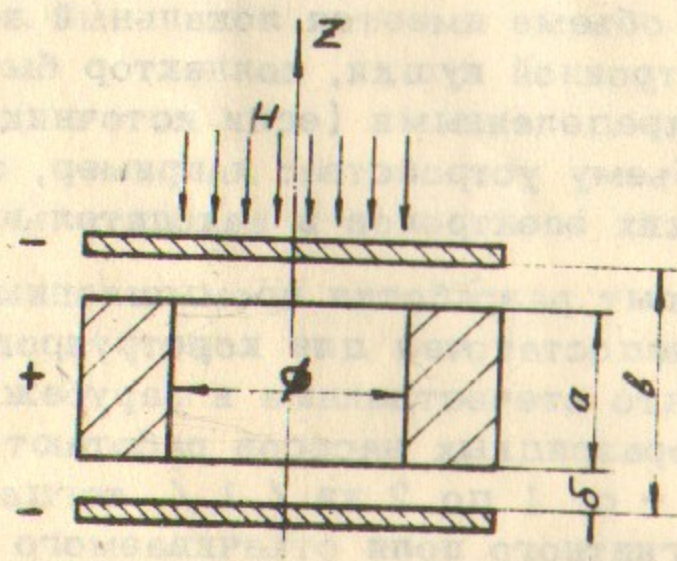


Рис.1. Характерные размеры ячейки Пеннинга.

" + " - анод; " - " - катоды; Z - ось разряда;

H - магнитное поле.

Основой магниторазрядного насоса является ячейка Пеннинга (рис. 1), в которой скрещенные электрическое и магнитное поля образуют ловушку для электронов, обеспечивающую существование газового разряда при очень низких давлениях. Электрон, захваченный в ловушку, колеблется вдоль оси разряда под действием продольного электрического поля и одновременно движется по циклоиде вокруг этой оси под воздействием поперечного электрического и магнитного полей / 2 /. При этом, несмотря на малые размеры ячейки, проходимый электроном путь оказывается значительно больше длины свободного пробега даже при очень низком давлении газа. При столкновениях захваченных в ловушку электронов с атомами газа происходит ионизация атома либо упругое рассеяние электрона; в обоих случаях направление движения первичного электрона изменяется. В результате электроны начинают дрейфовать поперек магнитного поля по направлению к аноду. Именно этот дрейф и создает разрядный ток в ячейке. Очевидно, что величина тока разряда будет пропорциональна полной частоте соударений электронов с атомами (упругих и неупругих), то есть для данной ячейки и заданных значений анодного напряжения и напряженности магнитного поля - давлению газа:

$$I_G = \text{Const} \cdot p$$

Для стабильного существования разряда уход электронов из ловушки на анод должен восполняться захватом в ловушку новых электронов. Как это происходит? Ионы, образующиеся в разряде, слабо закручиваются магнитным полем и попадают на катод. Процессы на катодах ячейки Пеннинга ничем не отличаются от катодных процессов в обычном тлеющем разряде: ионы выбивают из катода вторичные электроны, часть которых захватывается в ловушку. Кроме того, ионная бомбардировка приводит к распылению атомов титана с поверхности катода. Именно явление катодного распыления и служит основным рабочим процессом магниторазрядного насоса.

Условие самостоятельного существования разряда Пеннинга можно получить из обычных соображений теории газового разряда. Если электрон в процессе дрейфа к аноду испытывает Π ионизирующих столкновений с атомами и если каждый ион выбивает из катода γ вторичных электронов, из которых γ' захватывается в ловушку, то условие самостоятельности разряда будет:

$$\Pi \gamma' \geq 1$$

Поскольку частота ионизирующих столкновений прямо пропорциональна давлению, а величины γ и γ' от давления не зависят, очевидно, что скорость генерации электронов в ловушке прямо пропорциональна давлению. Таким образом, уход электронов на анод и их поступление в ловушку оказываются сбалансированными при любом давлении.

Описанная модель построена в работах /3,4/ на основе классической теории диффузии электронов поперек магнитного поля и без учета распределения объемного заряда внутри ячейки. Эти представления являются весьма грубой идеализацией: в действительности пропорциональность разрядного тока давлению в ячейке Пеннинга существует только в ограниченном диапазоне давлений.

Перед зажиганием разряда распределение потенциала по радиусу ячейки близко к квадратичной зависимости, причем потенциал на оси ячейки существенно зависит от ее размеров / 5 / (см. рис. 2). Экспериментальные исследования показали, что после зажигания разряда картина резко меняется / 6 /. В области у оси разряда образуется плазма, потенциал которой не превышает 100-300 в и почти не зависит от геометрии ячейки. Падение напряжения (несколько киловольт) практически полностью сосредоточено в тонком слое отрицательного пространственного заряда у анода, толщина которого по порядку величины равна ларморовскому радиусу для электронов.

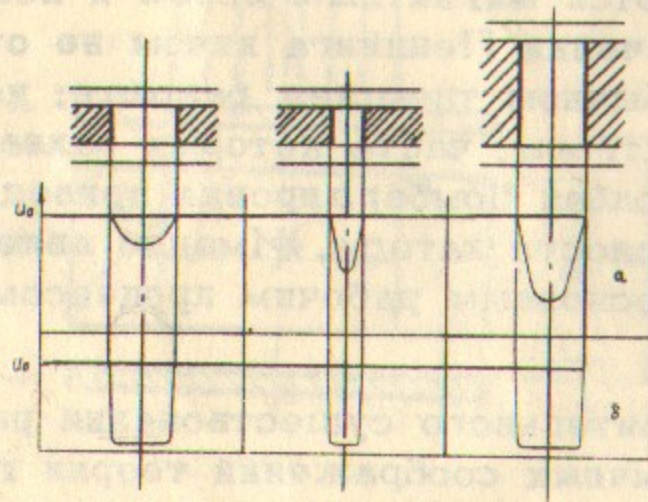


Рис.2. Распределение потенциала по радиусу анодного отверстия в ячейках Пеннинга с разным соотношением размеров:

- а) до зажигания разряда,
- б) после зажигания разряда.

$$U_a = 3 \text{ кв.}$$

Прианодный слой — наиболее важная область разряда Пеннинга: именно в нем разыгрываются основные процессы ионизации. Электроны в прианодном слое, как уже отмечалось, участвуют в трех видах движения:

1. Колебания вдоль оси разряда между катодами
2. Холловское движение вдоль поверхности анода
3. Дрейф к поверхности анода поперек магнитного поля.

В области существования высоковакуумной формы разряда Пеннинга отрицательный объемный заряд в слое не зависит от давления, так как уход и приход электронов сбалансированы, а положительный объемный заряд ионов пренебрежимо мал. По мере увеличения давления плотность ионов растет. Теоретические оценки и экспериментальные данные показывают, что при давлении порядка 10^{-4} тор объемный заряд электронов компенсируется положительными ионами /7/. В результате распределение потенциала в ячейке резко изменяется, нарушается пропорциональность тока давлению, и разряд переходит в новую форму, характерную для высоких ($10^{-3} - 10^{-1}$ тор) давлений.

Процессы в прианодном слое определяют собой и нижнюю границу рабочего диапазона давлений. Стягивание отрицательного объемного заряда в тонкий слой толщиной порядка 10^{-2} см приводит к тому, что плотность электронов в слое достигает $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При такой высокой концентрации частиц в пространственном заряде появляются флуктуации плотности — неоднородности, вызванные коллективным взаимодействием частиц. Рассеяние электронов на этих неоднородностях вызывает появление аномального (неклассического) дрейфа электронов поперек магнитного поля, хорошо изученного в теории магнитного удержания плазмы.

В отличие от рассматривавшейся выше классической диффузии коэффициент аномальной диффузии не зависит от давления. Поэтому в разрядном токе появляется независимая от давления составляющая. При сравнительно высоких давлениях она пренебрежимо мала по сравнению с классической компонентой, и разрядный ток практически точно пропорционален давлению. Однако при уменьшении давления обе составляющие начинают сравнивать-

ся, в результате баланс электронов в прианодном слое нарушается, плотность объемного заряда падает, разрядный ток резко уменьшается и разряд гаснет.

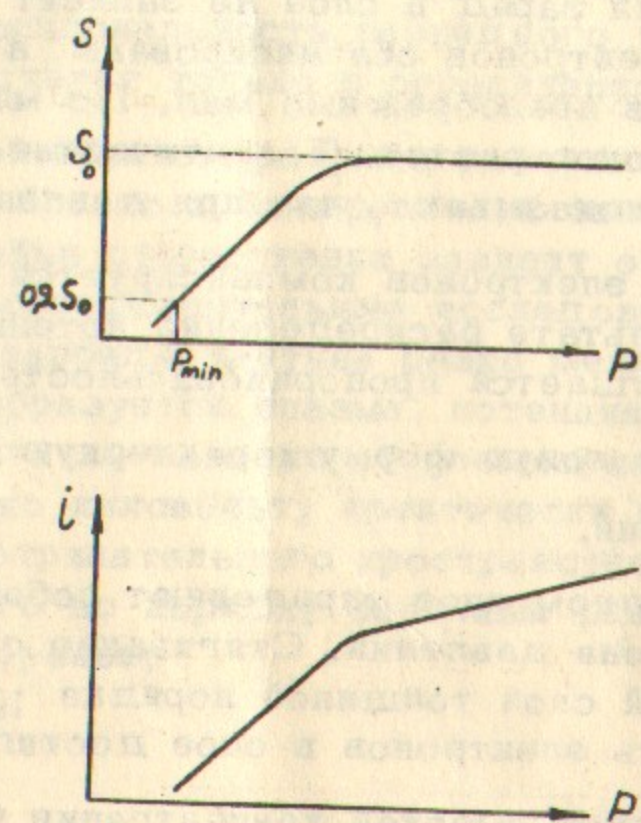


Рис.3. Типичные рабочие характеристики магниторазрядного насоса.

На рис. 3 показаны типичные рабочие характеристики магниторазрядного насоса - зависимости скорости откачки и разрядного тока от давления. Как видно, для полного описания свойств насоса достаточно трех величин: средняя скорость откачки на горизонтальном участке характеристики, средняя интенсивность насоса (отношение i/p) в этом диапазоне давлений и минималь-

ное рабочее давление. Под минимальным рабочим давлением мы будем понимать давление, при котором скорость откачки уменьшается до 20% своего среднего значения. Необходимо подчеркнуть разницу между минимальным рабочим давлением насоса и предельным вакуумом системы. Предельный вакуум - это наименьшее давление, которое может быть достигнуто при откачке какого-то конкретного объема; его величина зависит не только от параметров насоса, но и от скорости выделения газа в объеме и может быть как больше, так и меньше минимального рабочего давления. Величина минимального рабочего давления определяется по характеристике $i/p = f(p)$ /8/.

Для расчета скорости откачки и минимального рабочего давления были предложены эмпирические формулы /9/, проверенные экспериментально в широком диапазоне изменения параметров /13/: магнитное поле - от 500 до 12000 э, анодное напряжение - от 1000 до 10000 в, диаметр ячейки - от 0,15 до 5,1 см, отношение толщины анода к расстоянию между катодами - от 0,2 до 0,9, скорость откачки - от 0,03 до 3 л/сек на 1 ячейку, минимальное давление - от $1 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ тор.

$$S = 2,5 \cdot 10^{-6} \alpha U_a^{1/2} \left(H\phi - \frac{3,6 \cdot 10^5}{H\phi} \right) / (1 - e^{-2,5\phi}) \text{ л/сек} \quad (1)$$

$$P_{\min} = \frac{5 \cdot 10^4}{U_a \phi^3 \left(H\phi - \frac{3,6 \cdot 10^5}{H\phi} \right)^3} \text{ тор} \quad (2)$$

Погрешность расчета по формуле /1/ составляет $\pm 20\%$, а по формуле /2/ - 0,5 порядка величины.

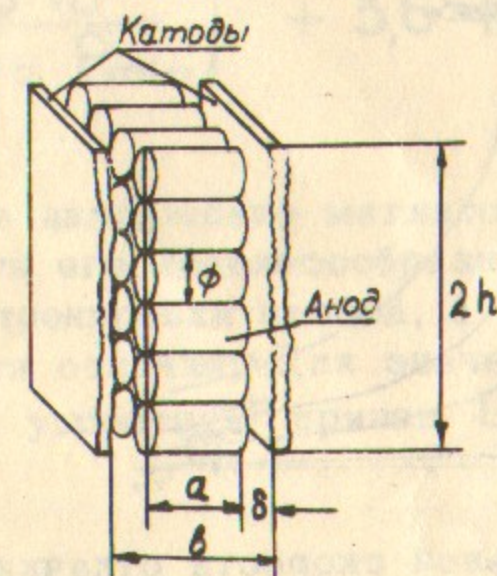


Рис.4. Электродная структура магниторазрядного насоса и ее характерные размеры.

Реальный магниторазрядный насос представляет собой совокупность большого числа ячеек Пеннинга, соединенных параллельно между собой (см. рис.4). Скорость откачки, приходящаяся на 1 см² боковой поверхности такого насоса, равна:

$$S_0 = 3.2 \cdot 10^{-6} \frac{\alpha U_a^{1/2}}{\phi^2} \eta (H\phi - \frac{3.6 \cdot 10^5}{H\phi}) (1 - e^{-2.5\phi}) \quad (3)$$

л/сек·см²

где U_a - анодное напряжение, в

H - напряженность магнитного поля, э

α - толщина анода, см,

ϕ - диаметр ячейки, см,

η - коэффициент заполнения; отношение суммарной площади ячеек к боковой поверхности анода.

Анализ уравнений /2/ и /3/ показывает, что зависимость $S_0(\phi)$

имеет максимум, соответствующий минимальному давлению порядка $(1 \div 10) \cdot 10^{-8}$ тор (рис. 5). Это означает, что в большинстве практически интересных случаев улучшение вакуума может быть достигнуто только за счет снижения удельной скорости откачки, то есть увеличения габаритов насоса. Поэтому при выборе минимального рабочего давления необходимо очень внимательно анализировать требования к вакуумной системе и условия её работы. Как правило, нормальная работа системы обеспечивается, если минимальное давление насоса в 5 - 10 раз меньше рабочего давления в системе.

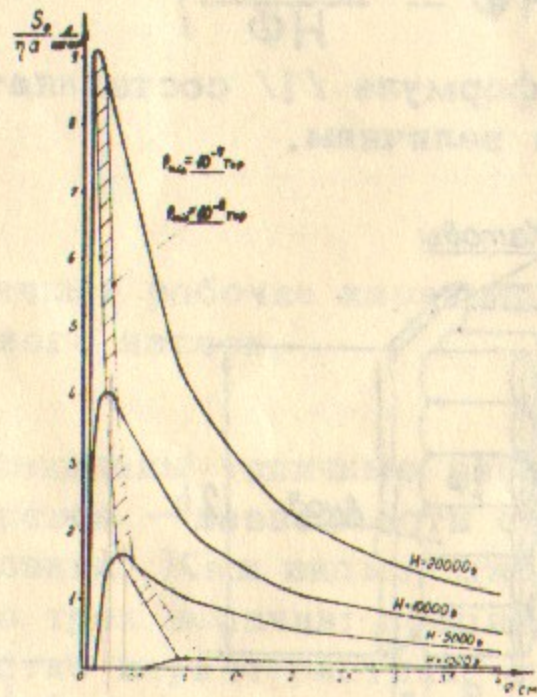


Рис.5. Зависимость удельной скорости откачки от диаметра ячейки при разных напряженностях магнитного поля $U_a = 5$ кв.

Удельная скорость откачки многоячейкового анода может оказаться значительно меньше рассчитанной по формуле /3/ из-за перепада давлений в щели между катодом и анодом. Эффективная скорость откачки с учетом этого перепада равна /10/:

$$S_{эфф} = S_0 \frac{\text{th} \left[\frac{h}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{7.85} \right]}{\frac{h}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{7.85}} \quad (4)$$

где δ - зазор между катодом и анодом, см

h - длина пути откачиваемого газа в насосе, см.

(h - ширине катода, если газ поступает в насос только с одной стороны; если же доступ газа в щель между катодом и анодом открыт с двух сторон, как это показано на рис. 4, величина h равна 1/2 ширины катода).

Целью расчета магниторазрядного насоса является определение его основных размеров (диаметр ячейки, толщина анода, расстояние между катодами, ширина и длина насоса) и выбор анодного напряжения по заданным значениям напряженности магнитного поля, рабочего давления в системе, требуемой скорости откачки.

Прежде всего необходимо выбрать минимальное рабочее давление насоса. После этого диаметр ячейки находится из соотношения /2/:

$$\phi = \frac{1}{H} \left[H \left(\frac{5 \cdot 10^4}{U_a \cdot P_{min}} \right)^{1/3} + 3.6 \cdot 10^5 \right]^{1/2} \quad \text{см} \quad (5)$$

Оптимальное анодное напряжение магниторазрядного насоса равно 3-6 кв; увеличивать его нецелесообразно из-за усложнения изоляции и трудности тренировки насоса, а снижать невыгодно из-за уменьшения скорости откачки. Для значений $P_{min} 10^{-10}$ тор формулу /5/ можно упростить; приняв $U_a = 5$ кв, получим:

$$\phi \approx \frac{1,47}{H^{1/2} \cdot p_{\min}^{1/6}} \text{ см} \quad (5a)$$

Ячейки могут иметь любую правильную форму - от круга до квадрата. Для некруглой ячейки уравнение (5) определяет диаметр вписанного в нее цилиндра.

Выбор минимального рабочего давления по существу определяет собой и наибольшую удельную скорость откачки, которую можно получить при заданной напряженности магнитного поля. Соответствующие зависимости приведены на рис. 6. Как видно, максимальная скорость откачки возрастает с магнитным полем приблизительно как $H^{3/2}$. Уменьшение минимального давления на порядок приводит к снижению скорости откачки примерно на 15 - 20%.

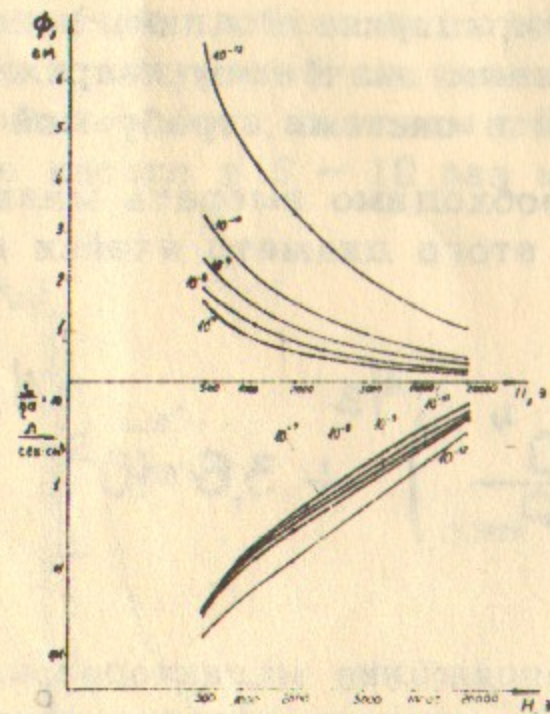


Рис. 6. Зависимость удельной скорости откачки и оптимального диаметра ячейки от напряженности магнитного поля при разных значениях минимального рабочего давления $U_a = 5$ кв.

Следующий этап расчета - определение толщины анода и зазора между катодом и анодом. Если расстояние между катодами насоса ничем не ограничивается, толщину анода следует выбирать максимально возможной:

$$\frac{a}{\phi} = 3 \div 3,5 \text{ } 1,5 \div 2,0 \quad (6)$$

Дальнейшее увеличение толщины анода затрудняет зажигание разряда, особенно при давлениях 10^{-8} тор и ниже. Вычислив из уравнения (3) удельную скорость откачки, можно найти ширину зазора между катодом и анодом из условия:

$$\frac{h}{\delta} \sqrt{S_0} \leq 5, \quad (7)$$

при выполнении которого перепад давлений в щели не превышает 10%.

К сожалению, максимально возможное расстояние между катодами и ширина катода почти всегда заданы заранее величиной магнитного зазора либо размерами откачиваемой полости (для встроенных насосов). В этом случае зависимость скорости откачки от толщины анода, как видно из уравнения (4), имеет максимум:

$$S_{\text{эфф}} = \alpha a \frac{t h x}{x} ; \quad (8)$$

где $x = \frac{2h}{b-a} \cdot \frac{\sqrt{\alpha a}}{7,85}$

$\alpha = \frac{S_0}{a}$ - удельная скорость откачки, приведенная к 1 см толщины анода, л/сек · см² · см.

b - расстояние между катодами, см.

Из анализа уравнения (8) следует, что толщина анода, соответствующая максимальной скорости откачки, всегда удовлетворяет условию:

$$a_{\text{опт}} \geq \frac{1}{3} b \quad (9)$$

В предельном случае, когда при $a = b/3$ параметр $x \geq 2$, оптимальная толщина анода равна одной трети расстояния между катодами. Для щелей с большой проводимостью (при $a = b/3$ па-

раметр $X < 2$) оптимальная толщина анода определяется по максимуму скорости откачки подстановкой в уравнение /8/ нескольких значений величины Δ . При вычислениях удобно пользоваться графиком функции thx/x , приведенным на рис.7.

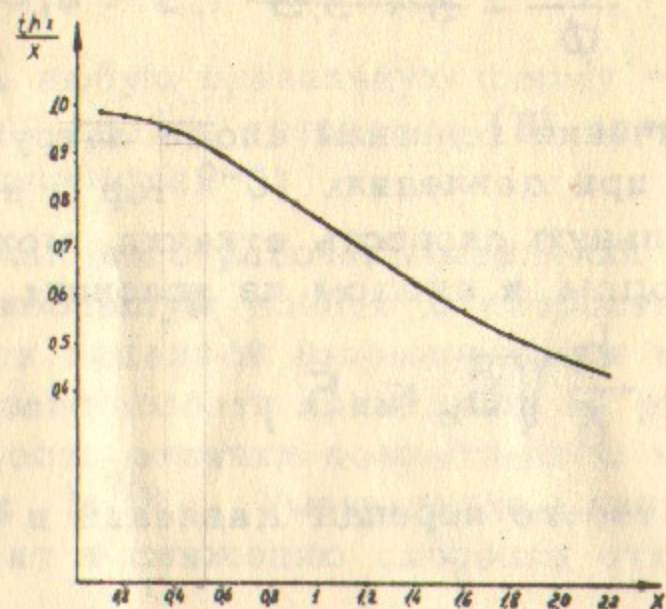


Рис.7. Вспомогательный график для расчёта толщины анода.

В заключение расчёта по удельной скорости откачки определяется полная площадь насоса. Описанная методика позволяет получить основные исходные данные для проектирования насоса с заданными параметрами. Однако для окончательного выбора конструкции необходимо учесть еще ряд факторов: состав откачиваемого газа, нагрев электродов выделяющейся в разряде мощностью, снижение сопротивления изоляции в процессе работы насоса, тепловое расширение электродов и т.п. Рассмотрим влияние этих факторов на конструкцию магниторазрядного насоса.

Требования к составу остаточной атмосферы в вакуумной системе определяют собой выбор двух- или трёхэлектродной конструкции насоса. До сих пор мы рассматривали только двухэлектродные системы, в которых инертные газы откачиваются за счёт "вбивания" быстрых ионов в катод. При длительной работе насоса поверхностные слои катода распыляются, связанный в них газ выделяется и возникает обратный поток инертного газа. Поэтому эффективная скорость откачки аргона в двухэлектродных насосах составляет 1-3% скорости откачки по активным газам

(окись углерода, азот, пары воды и т.д.). В трёхэлектродном насосе катоды выполнены в виде решётки, в которой бомбардируемая поверхность расположена параллельно оси разряда (рис.8). При этом значительная часть ионов падает на катод под малыми углами, нейтрализуется и отражается на поверхность третьего электрода, где прочно "замуровывается" налетающими сверху атомами титана. Поскольку на третий электрод не попадают ни ионы, ни электроны, газ на нём связывается необратимо и скорость откачки аргона в трёхэлектродных насосах увеличивается до 20%. Таким образом, если предельный вакуум системы, откачиваемой двухэлектродным насосом, определяется натеканием атмосферного воздуха, то в остаточном газе будет содержаться от 20 до 50% аргона. Применение трёхэлектродного насоса позволяет уменьшить эту цифру до 3-5%.

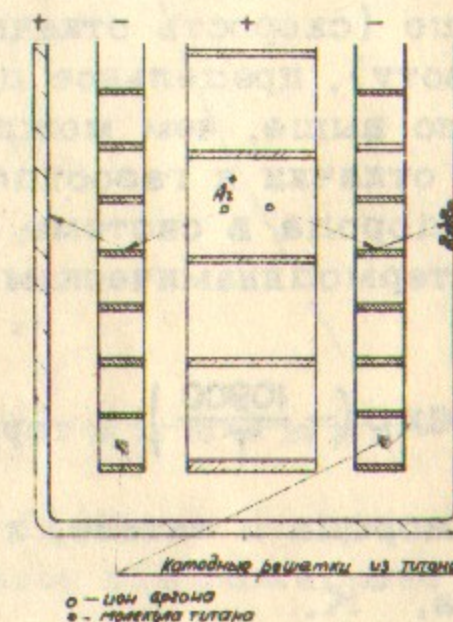


Рис.8. Схематическое изображение трёхэлектродного насоса.

Конструктивно трёхэлектродные насосы удобно оформлять так, чтобы третьим электродом служил металлический корпус вакуумной системы (рис.8). В этом случае анод и корпус заземляются, а высокое напряжение (отрицательное) подаётся на катоды. Толщина катодной решётки в трёхэлектродном насосе выбирается равной 0,3-0,5 см; отверстие в катоде - произвольной формы диаметром в 3-4 раза меньше анодной ячейки. Зазор

между катодом и третьим электродом должен быть минимальным: его величина ограничивается только условиями электрической прочности - 0,2 - 0,5 см. Остальные размеры трехэлектродного насоса рассчитываются по аналогии с двухэлектродным, но в формулах /4/, /7/ и /8/ зазор между катодом и анодом берётся на 20-30% больше фактического, чтобы учесть поступление газа через щель между катодом и третьим электродом:

$$\frac{h}{\delta} \sqrt{S_0} \leq 6,5 \quad /7a/$$

$$X = \frac{2h}{b-a} \cdot \frac{\sqrt{a}}{10} \quad /8a/$$

К изменению состава остаточной атмосферы может привести и выделение водорода из титановых катодов, если их температура превышает 100-150°C. Хотя магниторазрядный насос откачивает водород очень хорошо (скорость откачки по водороду в 2-3 раза больше, чем по азоту), предельное давление водорода может оказаться значительно выше, чем можно было бы ожидать из сопоставления скоростей откачки и газоотделения. Дело в том, что предельное давление водорода в системе с магниторазрядным насосом определяется термодинамическим равновесием водорода с титаном:

$$P_{H_2} = 7,65 \cdot 10^3 C^2 \exp\left(-\frac{10900}{T}\right) \text{ тор,} \quad /10/$$

где C - концентрация водорода в титане, лтор/г,
а T - температура титана, °К.

Если перед включением насос обезгаживается при температуре T_1 и давлении P_1 , то равновесное давление водорода будет:

$$P_{H_2} = P_1 \exp\left(\frac{10900}{T_1} - \frac{10900}{T}\right) \quad /10a/$$

На рис.9 приведена рассчитанная по этому уравнению зависимость предельного давления водорода от температуры катода для насоса, прогретого при 350°C в вакууме ($P_1 = 10^{-6}$ тор).

Мощность, выделяющаяся в разряде, прямо пропорциональна давлению. С достаточной для проектирования насоса точностью её можно оценить из соотношения:

$$N = (10 + 3C) S_0 \rho U_0 \text{ вт/см}^2, \quad /11/$$

где S_0 - удельная скорость откачки, л/сек.см²,

ρ - давление газа, тор.

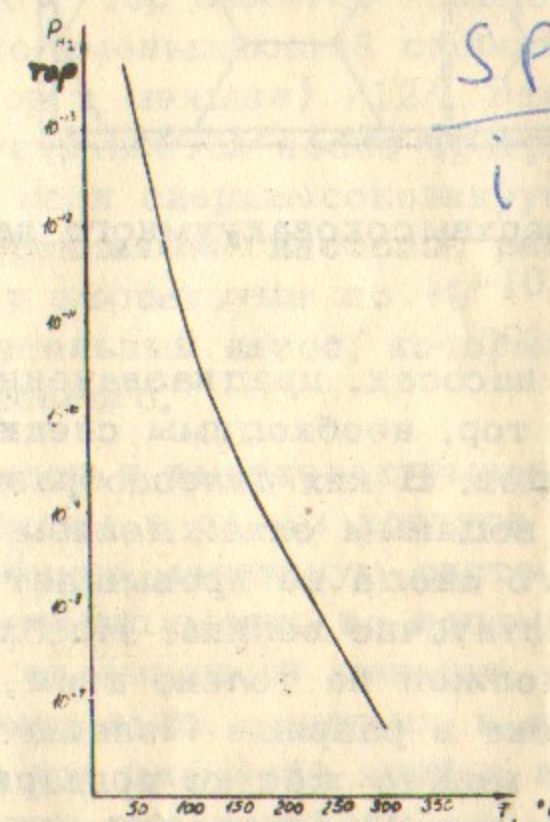


Рис.9. Зависимость давления водорода от температуры титана; предварительное обезгаживание при 350°C и давлении 10⁻⁶ тор.

Легко видеть, что при давлении 10⁻⁷ тор и ниже удельная нагрузка на электроды не превышает 0,01 вт/см² и не может привести к заметному нагреву насоса. Поэтому при конструировании насосов для получения сверхвысокого вакуума не нужно беспокоиться об охлаждении системы. Это позволяет использовать "сотовые" аноды (рис.10) с очень высоким коэффициентом заполнения (0,87-0,99), сваренные из немагнитной ленточной стали 1X18H9T толщиной 0,1-0,2 мм, которая является наиболее удобным конструкционным высоковакуумным материалом, но обладает очень низкой теплопроводностью. Конструкция сверхвысоково-вакуумного насоса должна допускать прогрев корпуса и элект-

тродной системы после сборки при $400-500^{\circ}\text{C}$ в вакууме.

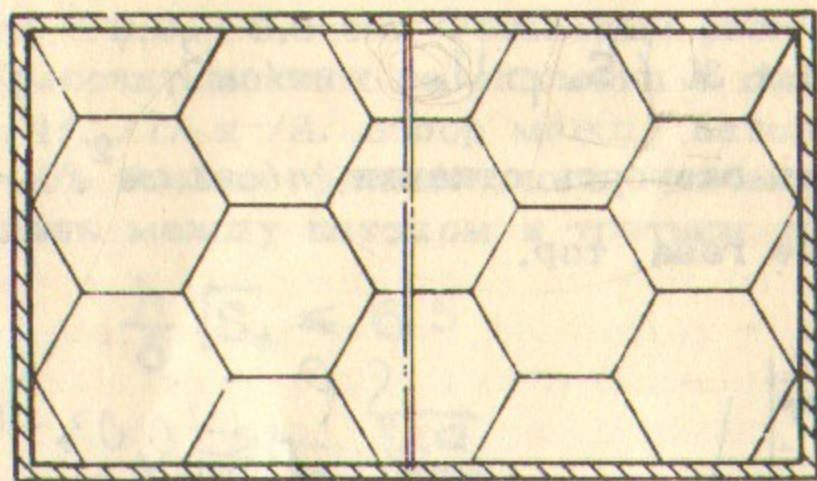


Рис.10. Сотовый анод сверхвысоковакуумного насоса.

В низковакуумных насосах, предназначенных для работы при давлении выше 10^{-6} тор, необходимы специальные меры для отвода тепла от электродов. В них целесообразно применять массивные медные аноды с водяным охлаждением (рис.11). Коэффициент заполнения такого анода не превышает $0,5-0,6$, зато теплопроводность его достаточно велика. Необходимо подчеркнуть, что охлаждаться должен не только анод, но и катод, так как ионная компонента тока в разряде Пеннинга составляет $30-50\%$ /11/. С этой целью можно жёстко приварить катоды к корпусу, как это показано на рис.11 (трёхэлектродные системы на низком вакууме, как правило, не нужны). Снижение коэффициента заполнения в низковакуумных насосах можно компенсировать уменьшением диаметра ячейки до оптимальной величины (см. рис.6), так как эти насосы работают в системах с предельным вакуумом не лучше $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$ тор.

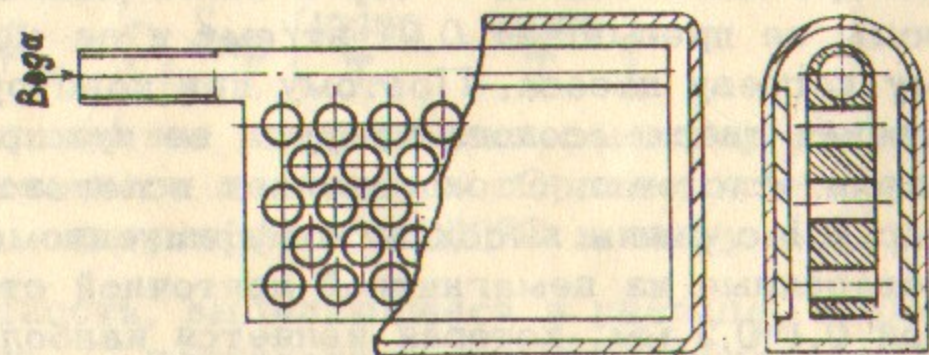


Рис.11. Схематическое изображение охлаждаемого низковакуумного насоса.

В сверхвысоковакуумных системах с предельным давлением 10^{-9} тор и ниже целесообразно использовать двухступенчатую откачку: низковакуумный насос, работающий во время течеиспытания и нагрева, с рабочим диапазоном давлений от 10^{-2} до 10^{-7} тор и высоковакуумный насос, который начинает работать после обезгаживания при давлении не выше $1 \cdot 10^{-6}$ тор. Основным аргументом в пользу такой отдельной откачки служит явление насыщения магнитноразрядного насоса: после $5-10$ часов работы при давлении $10^{-6} - 10^{-5}$ тор заметно возрастает обратный поток газа из насоса, резко уменьшающий скорость откачки при низких давлениях (10^{-8} тор и меньше) /12/. Эффект насыщения обратим и полностью устраняется после прогрева насоса в высоком вакууме. Поэтому если сверхвысоковакуумная система откачивается одним "универсальным" насосом, работающим во всём диапазоне давлений от форвакуума до 10^{-10} тор, она должна иметь небольшой дополнительный насос, который включается на время обезгаживания основного.

Низковакуумная и высоковакуумная части двойного насоса могут быть размещены в одном корпусе с отдельными вводами питания и иметь общую магнитную систему. В этом случае не только отпадает необходимость во вспомогательном насосе, но и общие габариты оказываются меньше, чем для "универсального" насоса. Действительно, выигрыш в коэффициенте заполнения позволяет при том же диаметре ячейки вдвое увеличить удельную скорость откачки высоковакуумного насоса по сравнению с универсальным, а удельная скорость откачки низковакуумного насоса при одинаковых коэффициентах заполнения будет в $1,5-2$ раза больше, чем в универсальном насосе, из-за уменьшения диаметра ячейки.

В заключение следует остановиться на конструкции крепления высоковольтного электрода к корпусу или заземленному электроду. Крепящие изоляторы лучше всего изготавливать из высокоглинозёмистой керамики (22ХС, ВГ-4 и т.п.), обладающей малым газоотделением, хорошей термостойкостью, высокой электрической и механической прочностью. При конструировании крепящих изоляторов возникает две проблемы: сохранение высокого поверхностного сопротивления при длительной работе насоса и компенсация теплового расширения электродов.

Сопротивление изоляции может уменьшаться со временем из-за напыления титана на рабочую поверхность изолятора. Желательно, чтобы сопротивление изоляции между катодом и анодом было больше 10^{10} ом, так как в противном случае становится невозможным измерение давления по разрядному току. Уменьшение сопротивления изоляции ниже 10^8 ом недопустимо, так как оно приводит к сильному разогреву изоляторов и выходу насоса из строя. Для защиты поверхности изолятора от напыления титана используются различного типа экраны и профилирование поверхности изолятора.

Проблема компенсации теплового расширения вызвана тем, что при нагреве электродной системы катоды удлиняются меньше, чем анод (коэффициент линейного расширения меди и нержавеющей стали - $16 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, а титана - $9 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$). На длине 25 см эта разница составляет заметную величину: 0,175 мм на каждые 100°C . Поэтому конструкция крепления должна обеспечивать высоковольтному электроду возможность свободного перемещения без нарушения центровки электродов друг относительно друга.

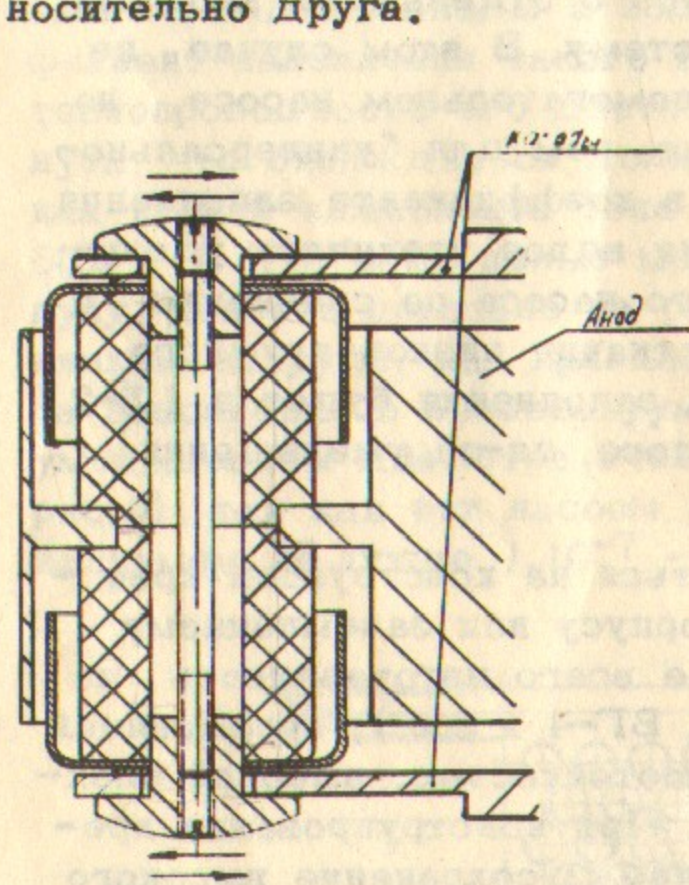


Рис.12. Крепление катода к заземленному аноду.

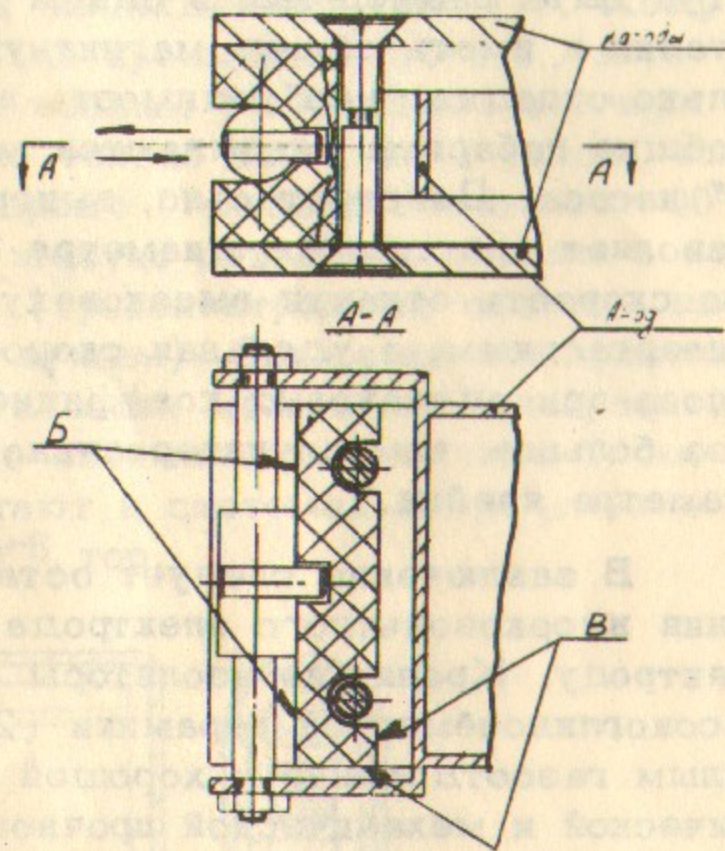


Рис.13. Крепление анода к заземленному катоду.

Примерные конструкции крепления высоковольтного электрода изображены на рис.12 и 13. На этих рисунках стрелками показаны относительные перемещения деталей при нагреве и охлаждении. В конструкции рис.12 экранировка изолятора от запыления титаном осуществляется поверхностями самого изолятора (В), а рабочая поверхность (Б) - профилирована.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.А.Карпов и др. ПТЭ, № 2, 5, 1964 г.
2. Г.В.Смирницкая, Э.М.Рейхрудель. ЖТФ, 29, 153, 1959г.
3. Э.Х.Исакаев, Э.М.Рейхрудель. ЖТФ, 36, 4, 653, 1966 г.
4. R.L. Jepsen . J.A.P., 32, 12, 2619, 1961г.
5. Э.М.Рейхрудель и др. ЖТФ, 22, 12, 1945, 1952 г.
6. W. Knauer J.A.P., 33, 6, 2093, 1962 г.
7. Ю.С.Попов. ЖТФ, 37, 1, 117, 1967 г.
8. S.L.Rutherford. Trans 10th Nat. Vac. Symp., 185, 1963г.
9. Е.Д.Бендер, М.Д.Малев. "Элементы расчета магниторазрядного насоса". В печати.
10. Г.А.Васильев. ПТЭ, № 1, 147, 1965 г.
11. Г.В.Смирницкая, Э.М.Рейхрудель. ЖТФ, 36, 1226, 1966 г.
12. В. Аубгу Extract du BIST №125, апр. 1968г.
13. Е.Д.Бендер, Г.А.Блинов, М.Д.Малев. "Исследование магниторазрядного насоса в сильном магнитном поле". В печати.

1. Ю.А. Косовичев, ИТЭ, № 2, 3, 1959 г.

2. Г.В. Смирнов, Э.М. Розенфельд, ЖТФ, 28, 157, 1959 г.

3. Э.А. Исмаилов, Э.М. Розенфельд, ЖТФ, 33, 4, 661, 1963 г.

4. R.L. Jorjani, J.R.P., 32, 12, 2618, 1961 г.

5. Э.М. Розенфельд к дис. ЖТФ, 25, 12, 1948, 1961 г.

6. W. Koster, J.R.P., 33, 6, 3002, 1962 г.

7. Э.С. Павлов, ЖТФ, 35, 19, 1967 г.

8. S.L. Rutherford, Trans. 10th Nat. Acc. Symp., 185, 1953 г.

9. В.Д. Бандер, М.Д. Малев, "Задачи теории магнетронного течения", В печати.

10. Г.А. Васильев, ИТЭ, № 1, 147, 1958 г.

11. Г.В. Смирнов, Э.М. Розенфельд, ЖТФ, 26, 1926, 1958 г.

12. B. Aubry, Etude de la BIST, N°26, apr. 1968.

13. В.Д. Бандер, Г.А. Васильев, М.Д. Малев, "Исследования магнетронного течения в сильном магнитном поле", В печати.

Ответственный за выпуск Малев М.Д.
 Подписано к печати 20.2.69
 Усл. печ. л., тираж 150 экз.
 Заказ № 280, бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.