



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. академика С. И. ВАВИЛОВА

Е. И. КОНТОР

**ГЕТТЕРНЫЕ
И ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ
НАСОСЫ**

МАШИНОСТРОЕНИЕ
1977

ЗАДАЧНИК
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КАВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

УДК 621.527.8:533.581 (047.3)

Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы, М., "Машиностроение", 1977, 64 с.

В брошюре-лекции изложены принципы действия и основные характеристики испарительных геттерных и ионно-геттерных насосов.

Рассмотрены наиболее распространенные типы насосов с термическим испарением геттера, магнитных электроразрядных насосов и комбинированных насосов.

Описаны методы расчета и проектирования, конструктивно-технологические решения и важнейшие параметры насосов, особенности их применения и эксплуатации.

Табл. 8, илл. 22, список лит. 11 назв.

Редакционно-методический совет:

Готов Н. И., Ерюхин А. В., Плисковский В. Я. (рецензент), Розанов Л. Н., Садиков Л. Г. (ответственный за выпуск), Саксаганский Г. Л. (председатель, научный редактор), Цейтлин А. Б.

ВВЕДЕНИЕ

Испарительные геттерные и ионно-геттерные насосы различных типов в настоящее время наиболее распространенный и эффективный класс безмасляных средств высоковакуумной откачки. К их числу относятся насосы с термическим распылением геттера из твердой и жидкой фаз, работающие в диапазоне давлений $10^0 - 10^{-11}$ Па ($10^{-2} - 10^{-13}$ мм рт. ст.), магнитные электроразрядные насосы, работающие в диапазоне $10^0 - 10^{-9}$ Па ($10^{-2} - 10^{-11}$ мм рт. ст.) и комбинированные насосы. Последние представляют собой модули испарительного и магниторазрядного типов, размещенные в одном корпусе, и имеют в совокупности значительно лучшие технические характеристики, чем отдельно взятые испарительные и магниторазрядные насосы тех же размеров.

Основу процесса вакуумной откачки рассматриваемыми геттерными и ионно-геттерными насосами составляет сорбция газа атомами распыляемого геттера. В ионно-геттерных насосах, кроме того, осуществляется ионизация газовых молекул или атомов с их последующим ускорением электрическим полем и внедрением в пленки напыленного геттера. Различают насосы с термическим и ионным распылением геттера. В первом случае геттер нагревают до высоких температур, обеспечивающих достаточную скорость его сублимации (в твердофазных испарителях) или испарения (в жидкофазных испарителях). Во втором случае геттер распыляется под воздействием бомбардировки

ионами с энергией в несколько кэВ, образующимися в газовом разряде в скрещенном электрическом и магнитном полях (магнитные электроразрядные насосы).

Свойство напыленных металлических пленок связывать газовые молекулы известно уже около 100 лет (опыты Фитцджеральда с Mg , 1883 г.). В 1907 г. Содди обнаружил высокую сорбционную активность паров и пленок щелочноземельных металлов; аналогичные результаты получил Ленгмюр в экспериментах с W (1915 г.).

В 1919 г. запатентован метод улучшения вакуума при механическом напылении порошков Zr и Th .

После появления в 1913–1915 гг. диффузионных насосов, экономных и простых в эксплуатации, развитие геттерных насосов резко замедлилось и вплоть до середины пятидесятых годов не было создано ни одного конкурентоспособного типа промышленных геттерных насосов. Возрождение интереса к ним и последующий быстрый прогресс в их развитии со второй половины 50-х годов связан, в основном, с потребностями экспериментальной техники в ядерной физике, физике элементарных частиц и физике плазмы.

Начало истории магнитных электроразрядных (магниторазрядных) насосов положили работы Пеннинга по физике высоковольтного разряда в магнитном поле (1937 г.). Через два года электродная система "кольцевой анод – два дисковых катода", помещенная в магнитное поле, была запатентована им в качестве вакуумного насоса ("откачная ячейка Пеннинга") и явилась прототипом современных магнитных электроразрядных насосов. Промышленное значение магниторазрядные насосы получили после опубликования работ Холла (1958 г.). Холл создал насос с предельным остаточным давлением 10^{-8} Па (10^{-10} мм рт.ст.) и быстротой действия около 5 л/с. Им же была выдвинута идея создания магниторазрядных насосов с быстротой действия до 10^4 л/с на основе многосекционных электродных систем, помещенных в единую магнитную цепь.

Первые отечественные геттерные и ионно-геттерные насосы промышленного типа разработаны коллективом специалистов под руководством академика С. А. Векшинского и профессора М. И. Меньшикова. Экспериментальные образцы с экстремальными параметрами и специализированные типы таких насосов разработаны также в ряде лабораторий и исследовательских институтов и опубликованы в работах Е. В. Глушаченкова, В. В. Рябова, А. Г. Миш-

кина, Г. Л. Саксаганского, М. Д. Малева, М. Л. Любимова, Ю. М. Пустовойта, В. Г. Рогозинского и в многих других работах.

К настоящему времени геттерные и ионно-геттерные насосы выпускаются в массовом масштабе как в Советском Союзе, так и за рубежом. Число разработанных модификаций таких насосов составляет несколько десятков; им посвящено более 600 публикаций.

В настоящей брошюре рассмотрен лишь ограниченный круг типов и модификаций этих насосов с преимущественной ориентацией на отечественные разработки промышленного и полупромышленного типов.

Брошюра рассчитана на инженерно-технических работников, знакомых с основами вакуумной техники и эксплуатирующих геттерные и ионно-геттерные насосы или применяющих эти насосы в своих разработках.

1. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

1. Сорбционные характеристики напыленных металлических пленок

Основным фактором при выборе геттерных материалов является сорбционная активность их паров и пленок. Один из физических показателей этой активности — теплота сорбций E , определяющая прочность связи сорбированных частиц газа с активными центрами и зависящая от структуры электронной оболочки атомов геттера, — колеблется, как видно из приведенных ниже данных, в очень широких пределах (см. табл. 1).

Малое значение теплоты сорбции инертных газов, характерное для геттерных материалов, делает невозможной эффективную откачку этих газов испарительными насосами.

Кроме высокой сорбционной активности, к геттерным материалам предъявляется ряд других требований. Геттер должен легко испаряться при не слишком высоких температурах, чтобы не происходило испарения и других материалов вакуумной системы, но и не слишком низкой, чтобы можно было производить

Таблица 1

Теплота сорбции газов на пленках W при комнатной температуре для малых степеней заполнения поверхности

Газ	H ₂	CO	N ₂	O ₂	CO ₂	Ar	Kr	Xe
E, $\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	46	100	85	194	110	2	4	8

прогрев для обезгаживания системы. При этом упругость паров геттера не должна превышать $10^0 - 10^{-7}$ Па ($10^{-2} - 10^{-3}$ мм рт. ст.). Он должен быть активным в широком интервале температур окружающей среды. Образующиеся в геттере продукты реакции должны быть пористыми. Это необходимо для того, чтобы взаимодействие с газом не ограничивалось только поверхностным слоем. Образующиеся химические соединения должны быть устойчивыми, чтобы поглощенный при температуре окружающей среды газ не выделялся во время работы насоса.

Наибольшее распространение в геттерных насосах получил Ti. Используются также Zr, Ta, Ba и, значительно реже, Mo, Mg, Hf, Er, Y. Запыляемые атомами геттера стенки насоса или специальные вкладыши-конденсаторы образуют сорбирующие поверхности, в большинстве случаев принудительно охлаждаемые потоком воздуха, водой, жидким азотом или водородом.

Сорбционные характеристики геттерных пленок в сильной степени зависят от их температуры и условий образования. Поглощение большинства газов, присутствующих в вакуумных системах (N₂, O₂, CO, CO₂; пары H₂O), при комнатной температуре осуществляется путем хемосорбции и растворения. Инертные газы и углеводороды напыленными пленками металла практически не поглощаются, их удаляют вспомогательным пароструйным насосом или при помощи ионной откачки. При вспомогательной откачке не удается полностью освободиться от углеводородов, так как они (например, CH₄) синтезируются на поверхности пленки, играющей роль катализатора. Поэтому присутствие углеводородов в составе остаточных газов не позволяет получить остаточное давление меньше $10^{-7} - 10^{-9}$ Па ($10^{-9} - 10^{-11}$ мм рт. ст.).

При напылении активных металлических пленок (особенно титана) на охлаждаемые (< 77 К) поверхности равновесные давления N_2 и других газов значительно снижаются, практически прекращается образование CH_4 , что позволяет получить остаточное давление 10^{-9} – 10^{-11} Па (10^{-11} – 10^{-13} мм рт. ст.). Значительное повышение скорости поглощения газов при этой температуре объясняется также увеличением физической адсорбции.

Распыление геттера в насосе осуществляется путем термического испарения как из твердой фазы методом сублимации (путем омического нагрева твердого распыляемого материала до температуры, несколько меньшей $T_{\text{плвл}}$, или излучением с накаливаемой вольфрамовой спирали, или электронной бомбардировкой), так и из жидкой фазы (нагревом при контакте с накаливаемой графитовой поверхностью или электронной бомбардировкой), а также путем дугового разряда.

Метод сублимации является наиболее распространенным, поскольку испарение при этом происходит значительно быстрее, чем при ионной бомбардировке и контролировать его проще, чем испарение из жидкой фазы и при дуговом разряде.

Таблица 2

Быстрота откачки 1 см² титановой пленки

Режим напыления	Температура пленки, К	$S_0, л/с \cdot см^2$	
		N_2	N_2
Непрерывный	77	23	10
	293	4	5
Периодический	77	26	7
	293	15	1

Представление о влиянии температуры и условий образования геттерных пленок на их сорбционные характеристики дают приводимые в табл. 2 средние значения скорости откачки N_2 и N_2 пленками титана при малой степени заполнения поверхности.

2. Испарители

Испаритель геттерного металла является основным элементом геттерных насосов. Для оценки испарителей используются следующие характеристики: энергетическая эффективность (подводимая к испарителю мощность на единицу скорости испарения геттера); коэффициент использования геттера (отношение массы испаренного геттера к моменту выхода испарителя из строя к его начальной массе); скорость испарения геттера и диапазон ее регулирования; предельно допустимое давление газовой среды при включении испарителя.

В большинстве случаев лучистый поток с поверхности испарителя дает наибольший вклад в энергозатраты на испарение геттера. Величина этого потока на единицу скорости испарения геттера быстро падает с ростом температуры последнего. Поэтому при прочих равных условиях энергетически выгодна эксплуатация испарительных насосов при максимальной температуре геттера.

Испарение геттера можно осуществлять при температуре ниже точки плавления (сублимация) или с поверхности расплава. Основные характеристики наиболее распространенных испарителей обоих типов представлены в табл. 3.

В отечественных геттерных насосах наибольшее распространение получили прямонакальные испарители. Испаритель такого типа представляет собой отрезок ("шпильку") биметаллической проволоки с молибденовым керном диаметром $d = 0,3 \div 2$ мм, на который ионидным способом осажден слой титана толщиной $\delta = 0,5d$; рабочий ток испарителей до 200 А; температура геттера - до 1150° С. В геттерных насосах устанавливается от одной до шести таких прямых или ψ -образных шпилек, содержащих от 1 до 17 г распыляемого титана. Скорость испарения регулируется подводимой мощностью; максимальный ресурс одной шпильки 600 ч.

Прямонакальные испарители отличаются предельной простотой конструкции и схемы электропитания. Их недостатки - ограни-

Характеристики промышленных испарителей титана для
геттерных насосов

Тип испарителя	Характеристики	Энергетическая эффективность, Вт/(мг/с)	Коэффициент использования геттера	Скорость испарения		Максимальное давление газа при включении Па (мм рт.ст.)
				Удельная мг/(см ² ·с)	Полная, мг/с	
Твердофазные	Прямокальный биметаллический Косвенного нагрева с лучистым нагревом Дуговой	10 ³ - 10 ⁵	0,35 - 0,4	0 - 10 ⁻²	0 - 1	1,3 · 10 ⁻² (1 · 10 ⁻⁴)
		10 ³ - 10 ⁵	0,6 - 0,7	0 - 10 ⁻²	0 - 1	1,3 · 10 ⁻² (1 · 10 ⁻⁴)
		10 ² - 10 ³	0,85 - 0,9	-	3 - 20	6,7 (5 · 10 ⁻²)
Жидкофазные	Электронно-лучевой	10 ² - 10 ⁵	0,8 - 0,95	0 - 10	0 - 30	10 ⁻² (1 · 10 ⁻⁴)

ченный ресурс и относительно малый коэффициент использования геттера. Несколько больший коэффициент использования геттера имеют испарители косвенного нагрева с лучистым нагревом геттера.

Промышленный титановый испаритель с лучистым нагревом выполнен в виде сферической оболочки диаметром 32 мм, во внутренней полости которой установлен проволочный нагреватель. Скорость испарения ($3 \cdot 10^{-3}$)–0,15 мг/с; начальная масса титана 35 г; максимальная потребляемая мощность 750 Вт. Толщина оболочки обычно не превышает 5 мм, что лимитирует общую массу геттера и ресурс испарителя. Коэффициент использования геттера ограничен местными прогарамии оболочки.

Максимальное давление газа при включении титановых испарителей рассматриваемых типов не должно превышать 10^{-2} Па (10⁴ мм рт.ст.). При более высоких давлениях на поверхности геттера образуются слои химических соединений титана с откачиваемыми газами, резко снижающие скорость испарения и ухудшающие сорбционные характеристики насоса.

При создании высокопроизводительных геттерных насосов преимущественное применение получили электронно-лучевые и дуговые испарители титана.

Электронно-лучевой испаритель представляет собой электронную пушку с вольфрамовым катодом и испаряемую мишень – анод, помещенные в поперечное магнитное поле (рис.1). Между пушкой и мишенью приложено ускоряющее напряжение в несколько киловольт. В зависимости от размера мишени (торец

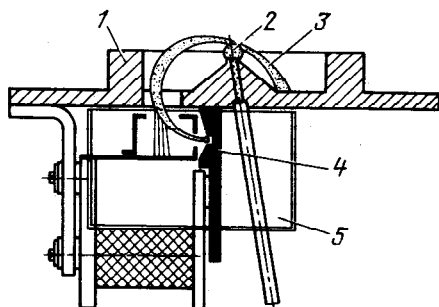


Рис. 1. Схема электронно-лучевого испарителя проволоочного титана:
1 - тигель испарителя; 2-испаряемый металл; 3 - электронный луч; 4 - электронная пушка; 5 - магнитная система

проволоки диаметром 1–2 мм, как показано на рис. 1 или стержня диаметром 10–20 мм) и мощности электронного пучка максимальная скорость испарения титана может достигать ~25 мг/с. Наличие поперечного магнитного поля, поворачивающего пучок электронов примерно на 270° , позволяет разместить электронную пушку вне зоны распыления титана.

Эксплуатационная надежность и срок службы электронно-лучевых испарителей лимитируются ресурсом термоэлектронного эмиттера и запасом геттера в механизме его подачи в зону расплава; в типовых испарителях ресурс составляет несколько тысяч часов.

В дуговых испарителях источником распыляемого геттера служит катодное пятно дуги постоянного тока. Плотность тока в пятне достигает $10^6 - 10^7$ А/см². Дуга горит в парах испаряемого титана, что позволяет поддерживать ее горение вплоть до давлений $10^{-6} - 10^{-7}$ Па ($10^{-8} - 10^{-9}$ мм рт.ст.). Катодное пятно хаотично перемещается по поверхности испарения охлаждаемого водой катода, вследствие чего титан испаряется равномерно, и катод имеет сравнительно низкую температуру. Возбуждение дуги производится кратковременным замыканием катода с анодом (стенками насоса) подвижным молибденовым электродом или другим способом. Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока с $U = 30 \div 50$ В и током $I = 120 \div 180$ А, при $U_{\text{рабоч.}} \approx 20$ В.

Конструктивно катод представляет собой экранированный диск из титана, лежащий на изолированной от корпуса и охлаждаемой водой медной подложке. Экран изолирован от катода и корпуса насоса (находится под нулевым потенциалом). Он служит для предотвращения попадания катодного пятна на боковые поверхности титанового диска.

Предельное давление при запуске насоса – 6,7 Па ($5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). Включение насоса при больших давлениях приводит к образованию неподвижных анодных пятен, способных проплавить стенку насоса.

Во время работы испарителя из-за теплого и фотостимулированного газовыделения, происходящего в результате нагрева напыленного слоя титана и катода, а также фотодесорбции (дуга – источник ультрафиолетового излучения), получить давление ниже $1 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.) при больших газовых нагрузках затруднительно. При этом определяющей компонентой является H_2 . Кроме того, на поверхности пленки титана образуется газ CH_4 , не поглощаемый пленкой Ti при комнатной температуре.

Однако содержание CH_4 в газовой среде резко уменьшается в результате диссоциации его молекул в плазме дугового разряда. По тем же причинам во время работы дугового испарителя в откачиваемой камере наблюдаются значительные (более чем на порядок) колебания давления.

Поэтому дуговые геттерные насосы рекомендуется эксплуатировать в режиме циклического включения испарителей. В промежутках между распылением остаточное давление падает до 10^{-6} – 10^{-7} Па (10^{-8} – 10^{-9} мм рт. ст.).

Из-за ограничения минимальной величины скорости испарения дуговые испарители целесообразно использовать в вакуумных системах с большими газовыми нагрузками.

3. Конструктивные и эксплуатационные характеристики испарительных геттерных насосов

Технико-экономические и эксплуатационные характеристики геттерных насосов определяются типом примененного испарителя и компоновочной схемой насоса.

Верхний предел рабочих давлений зависит от выбранного испарителя (см. табл. 3). Как уже отмечалось, верхний предел лимитируется образованием окислов, нитридов и карбидов на поверхности распыляемого геттера, условиями устойчивой работы термоэлектронных эмиттеров и формированием малоподвижных анодных пятен при включении дуговых испарителей.

Равновесное давление газов над поверхностью геттера и синтез метана ограничивают предельное остаточное давление геттерных насосов. При охлаждении геттерных пленок жидким азотом предельное остаточное давление падает до 10^{-10} – 10^{-11} Па (10^{-12} – 10^{-13} мм рт.ст.), одновременно возрастает коэффициент прилипания и коэффициент захвата в насосе.

В оптимально спроектированном насосе коэффициент захвата на любом этапе эксплуатации должен иметь максимально возможное значение, а степень насыщения пленки геттера во всех зонах сорбирующей поверхности должна быть одинаковой. В противном случае геттерный насос используется неэффективно.

Из изложенного выше можно сформулировать оптимальные условия работы насосов поверхностного действия, в том числе испарительных: откачиваемый газ должен постоянно и равномерно поглощаться на всей сорбирующей поверхности работающего насоса. Поэтому при конструировании таких насосов распределять мас-

су сорбента, выбирать величину и форму поверхности с поглотителем необходимо с учетом картины распределения газовых потоков в насосе. Большинство конструкций промышленных геттерных насосов не соответствует пока критериям оптимальности. Этим критериям в той или иной степени отвечают лишь некоторые из компоновочных схем, в частности, насос с квазиточечным испарителем геттера, расположенным в центре входного отверстия.

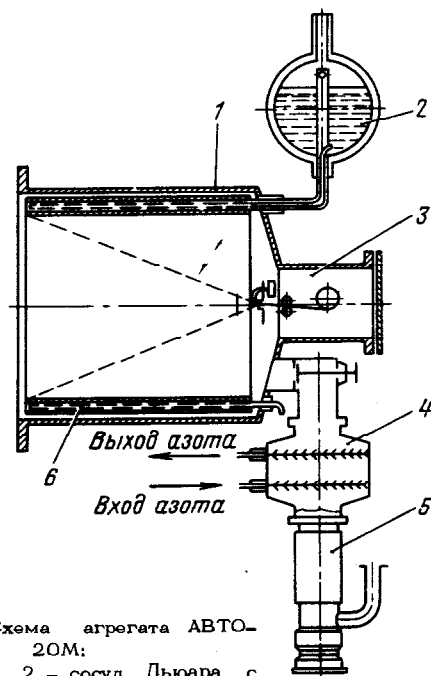


Рис. 2. Схема агрегата АВТО-20М:

1 - корпус; 2 - сосуд Дьюара с жидким азотом; 3 - испаритель титана; 4 - азотная ловушка; 5 - паромасляный насос Н-5С-М; 6 - охлаждаемый жидким азотом коллектор титана

При конструировании испарительных насосов также следует учитывать следующие их особенности: необходима надежная защита откачиваемой камеры от запыления испаряемым геттером; защитные экраны должны иметь минимально возможную площадь; также минимальной должна быть протяженность сварных швов, работающих в режиме циклического теплового нагружения (прогрев при обезгаживании и последующее охлаждение жидким

азотом); по этой же причине нежелательно конструктивное совмещение собственно насоса и теплоизолирующих вакуумных промежутков для охлаждаемых жидким азотом вкладышей-конденсаторов; и наконец, насос должен допускать произвольную ориентацию в пространстве.

На рис.2 показана компоновочная схема одной из первых модификаций испарительных геттерных насосов – агрегата АВТО-20М. В агрегате использован электронно-лучевой жидкофазный испаритель с периодической подачей в зону расплава титановой проволоки диаметром 1,5 мм. Распыляемый титан конденсируется на поверхности охлаждаемого жидким азотом вкладыша. Для откачки инертных газов используется паромасляный диффузионный насос с азотной ловушкой. Предельное остаточное давление, создаваемое агрегатом, менее 10^{-10} Па (10^{-12} мм рт. ст.); быстрота действия как функция давления показана на рис.3.

На рис. 4 показана конструктивная схема геттерного насоса из серии НИБ, при разработке которой сделана попытка более полно учесть сформулированные выше особенности и критерии оптимизации; в табл. 4 даны основные характеристики насосов этой серии.

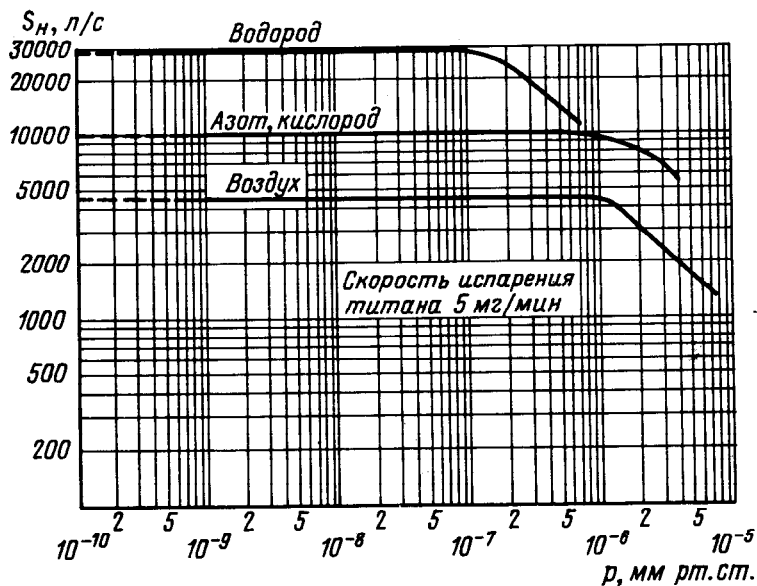


Рис. 3. Зависимость быстроты действия агрегата АВТО-20М от давления

Таблица 4

Основные характеристики испарительных насосов серии НИБ

Характеристики		Тип насоса				
		НИБ-1	НИБ-2	НИБ-10	НИБ-20	НИБ-50
Быстродействие при охлаждении, л/с	по азоту	1·10 ³	2·10 ³	6·10 ³	1·10 ⁴	2,5·10 ⁴
	по водороду	2·10 ³	4·10 ³	2·10 ⁴	4·10 ⁴	8·10 ⁴
Количество автономных испарителей в блоке	по азоту	1,5·10 ³	3·10 ³	1·10 ⁴	2·10 ⁴	5·10 ⁴
	по водороду	3·10 ³	8·10 ³	4·10 ⁴	8·10 ⁴	1,6·10 ⁵
Максимальная скорость испарения при включении одного испарителя, Г/с	2	2	4	7	7	7
	30	1·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴
Номинальный ток, А	8	30	30	100	100	100
	160	10	170	300	300	300
Начальная масса титана в блоке, г	-	11	20	75	130	130
	160	260	500	800	1200	1200
Объем накопителя жидкого азота, л	В*	В	Г	Г	Г	Г
	335	590	900	900	1425	1875
Диаметр входного отверстия, мм	270	470	700	840	1100	1600
	270	270	840	1100	1600	2000
Габаритные размеры при установленном накопителе жидкого азота, мм	диаметр	470	700	840	1100	1600
	высота	270	270	840	1100	1600

* В - насос вертикального исполнения;

* Г - насос горизонтального исполнения

Испарительные геттерные насосы серии НИБ с предельным остаточным давлением $< 5 \cdot 10^{-9}$ Па ($\sim 5 \cdot 10^{-11}$ мм рт. ст.) и быстротой действия до $2 \cdot 10^5$ л/с (по H_2) предназначены преимущественно для откачки водорода в ускорительных и термоядерных установках. В этих насосах блок прямонакальных биметаллических испарителей титана с автономным электропитанием каждого испарителя установлен на жесткой опоре по оси

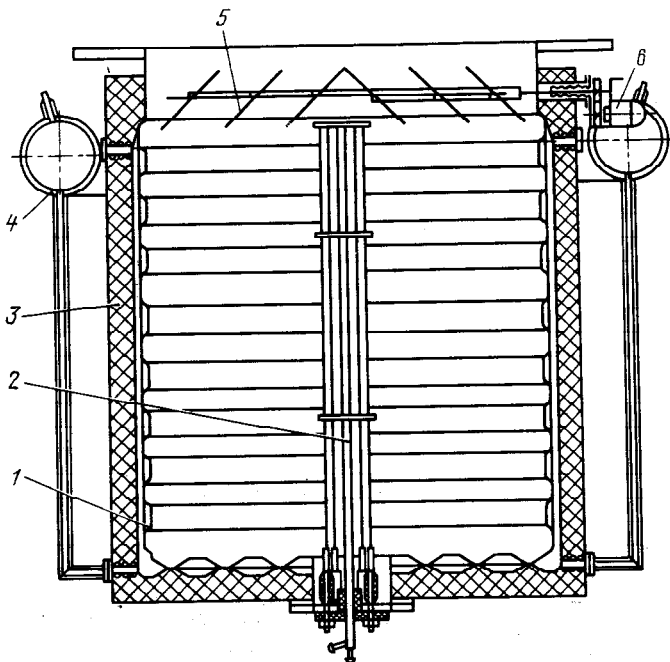


Рис. 4. Схема насоса НИБ-10:

1 - корпус; 2 - блок испарителей; 3 - теплоизолирующая оболочка; 4 - накопитель жидкого азота; 5 - поворотный экран - жалюзи; 6 - электромеханическое устройство поворота жалюзи

тонкостенного корпуса из нержавеющей стали. В корпусе выполнена продольная и поперечная гофрировка, обеспечивающая его механическую устойчивость; он окружен дьюаром с накопителем жидкого азота. На внешней поверхности корпуса размещен омический нагреватель для высокотемпературной тренировки насоса и змеевик водяного охлаждения. Во входном отверстии установлен поворотный экран-жалюзи. В режиме испарения жалюзи устанавливаются под углом 45° к продольной оси насоса, образуя ловушку для паров титана. После выключения испарителей жалю-

Основные характеристики испарительных геттерных насосов на основе дуговых испарителей

Таблица 5

Характеристики	Тип агрегата				ЭСВН
	АВЭД-2/260М	АВЭД-25/630М	АВЭД-40/800	ВЭД-1	
Быстрота по воздействию, ху 10 ⁻³ л/с по азоту по водороду	-	16	28	30	10
	2	25	40	50	20
	-	41	80	80	40
Предельное остаточное давление, Па (мм рт. ст.)	1,3·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻⁵	6,7·10 ⁻⁶
	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁸
	3,5·10 ⁻³	3,5·10 ⁻³	3,5·10 ⁻³	3,5·10 ⁻³	3,5·10 ⁻³ 1,6·10 ⁻²
Скорость испарения титана, г/с					
Ресурс в режиме непрерывного испарения, ч	400	400	400	320	75-350
	260	630	800	900	500
Диаметр входного отверстия, мм					
Габаритные размеры	площадь в плане, мм ²	900х1900	1050х2245	1920х2450	1100х1100
	высота, мм	885	1870	1800	1850

зи устанавливаются параллельно оси, снижая сопротивление экрану и существенно увеличивая коэффициент захвата насоса.

В табл. 5 приведены основные характеристики насосов на основе дуговых испарителей. Для откачки инертных газов совместно с этими насосами используются паромасляные диффузионные агрегаты.

Применение испарительных геттерных насосов малоэффективно при откачке продуктов органического происхождения и инертных газов; в диапазоне давлений 10^{-3} – 10^{-7} Па (10^{-5} – 10^{-3} мм рт.ст) эти насосы имеют ограниченный ресурс.

II. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

1. Сорбция газов при электрическом разряде

При возбуждении в разреженном газе электрического тока картина движения газовых молекул существенно изменяется. В результате соударения с электронами молекулы могут диссоциировать, образуя химически очень активные атомы. Диссоциация сложных молекул в электрическом разряде особенно существенна при наличии частиц органических веществ, которые могли бы отравлять пленку геттера. Электронный удар способен также привести к возбуждению молекул и их ионизации с образованием преимущественно положительных ионов.

Механизмы откачки диссоциированных, ионизированных и возбужденных молекул весьма различны.

Под действием электрического поля положительные ионы с ускорением движутся к отрицательно заряженным электродам и бомбардируют их поверхность. При этом часть ионов проникает на некоторую глубину бомбардируемой поверхности; другие ионы постепенно разрушают эти поверхности ("катодное распыление"). Незаряженные нейтральные частицы, имеющие высокие скорости, также вызывают распыление. Ионы газа, проникшие в глубь бомбардируемых поверхностей, способны удерживаться последними. Концентрация внедренных частиц зависит от температуры, материала электродов, давления газа в объеме. Это относится и к инертным газам.

Распыляемый в результате ионной бомбардировки материал катода (в насосах – геттерный материал) осаждается на нераспыляемые поверхности, при этом происходит его взаимодействие с газом.

Разнообразные явления в газовом разряде делают механизм электрического поглощения газа весьма сложным. Поглощение инертных газов не может быть объяснено только внедрением их ионов в материал бомбардируемой поверхности. Заметную роль играет "замуровывание" незаряженных частиц газа распыляемым металлом.

В 50-х годах электрическое поглощение было использовано при создании испарительных ионно-геттерных насосов. В этих насосах сорбция термически распыляемым геттером сочетается с электрической откачкой газов, не взаимодействующих с геттером. Ионизация газа используется также для расщепления сложных молекул (пары H_2O , CH_4 , тяжелые углеводороды).

Электрическая (ионная) откачка в испарительных ионно-геттерных насосах производится ионизацией откачиваемого газа при соударении с электронами, эмиттируемыми накаливаемым катодом. Образующиеся положительные ионы, ускоренные электрическим полем между анодной сеткой (насосы типа ГИН) или между центральным анодным стержнем (насосы типа "Орбитрон") и корпусом насоса, внедряются в покрывающий стенки насоса слой напыленного геттера и "замуровываются" его свежими слоями. Системы ионизатора и испарителя в этих насосах функционируют чаще всего раздельно.

В первом испарительно-геттерном насосе (1954 г.) испарение осуществлялось при контакте периодически подаваемой титановой проволоки с разогретым электронной бомбардировкой до $2000^\circ C$ графитовым штабиком. Источником электронов являлся концентричный штабик вольфрамовый катод. Испаряемый титан конденсировался на охлаждаемых водой стенках насоса, образуя газопоглощающую поверхность. Ионизатор состоял из двух концентрических цилиндрических сеток, находящихся под положительным по отношению к катоду испарителя потенциалом. Электроны, колеблясь между сетками, ионизировали газ. Быстрота действия насоса была $2 \cdot 10^3$ л/с и предельное остаточное давление — около $1 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.), давление запуска — не выше $5 \cdot 10^{-2}$ Па ($4 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.).

Сходную конструкцию имели отечественные насосы серии СИН, выпущенные сравнительно небольшой партией. Наибольшее распространение в СССР получили насосы на основе прямонакальных биметаллических испарителей (ГИН).

2. Насосы типа ГИН

Испарительные ионно-геттерные насосы типа ГИН (см. табл. 6) позволяют получать остаточное давление менее 10^{-7} Па (10^{-9} мм рт.ст.); давление запуска — не выше $1 \cdot 10^{-1}$ Па (10^{-3} мм рт.ст.). Насосы могут прогреваться до 500°C и представляют собой цилиндрический корпус из нержавеющей стали с рубашкой водяного охлаждения. На одном из торцевых фланцев корпуса смонтирована электродная система (насосы с быстрой откачки менее 1 л/с неразборные и без водяного охлаждения). Для предварительной откачки имеется боковой патрубков.

Электродная система насоса ГИН-05М1 (рис.5) состоит из двух прямонакальных испарителей и ионизатора, состоящего из вольфрамового катода $\phi 0,5$ мм и анодной сетки. Коллектором ионов являются стенки корпуса. Анодная сетка из молибденовой проволоки диаметром 0,8 мм выполняет две функции: прямонакального нагревателя при обезгаживании насоса, что упрощает эксплуатацию насоса и позволяет более эффективно использовать подводимую для нагрева энергию и анода ионизатора во время работы насоса. При этом на сетку относительно катода подается положительное напряжение до 1200 В.

Каждый испаритель представляет собой V -образную биметаллическую шпильку диаметром 2 мм с эффективным запасом титана в количестве 3 г. Испарители работают поочередно. При подводимой мощности 200 (240) Вт скорость испарения титана достигает 5 (15) мг/ч, при этом срок службы испарителей составляет соответственно 1500 или 500 ч. Поверхность конденсации титана равна $0,168 \text{ м}^2$ при высоте насоса 0,354 м.

Для улучшения откачки инертных газов к ГИН'ам можно подключать пароструйный насос, при этом масс-спектрометрический анализ остаточных газов не обнаруживает в откачиваемом объеме следов рабочей жидкости или продуктов ее разложения. По-видимому, это объясняется термическим разложением масла с последующим поглощением продуктов разложения.

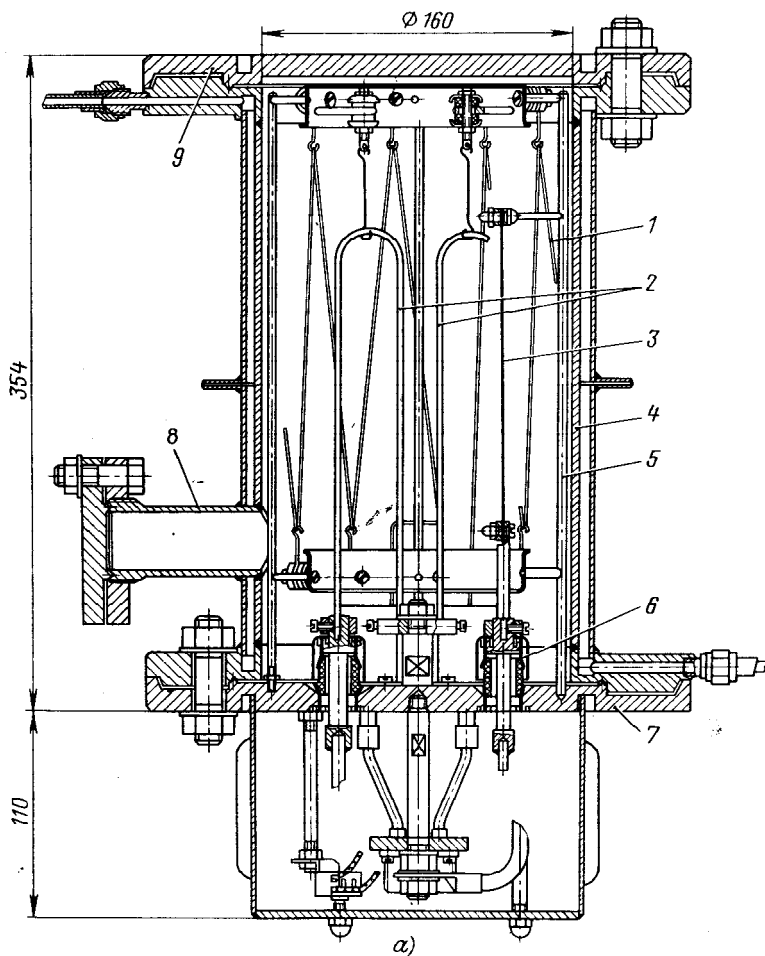
Аналогичные по устройству насосы ГИН-2 и ГИН-5 имеют соответственно большую поверхность запыления ($0,458$ и $1,18 \text{ м}^2$ при высоте охлаждаемой поверхности $0,6$ и $0,75$ м) с тремя и шестью прямонакальными испарителями диаметром 3 мм и длиной $0,95$ м при эффективном запасе титана в количестве 50 и 100 г, что обеспечивает при скорости испарения соответственно 50 и 100 мг/ч непрерывную работу насосов в течение 1000 ч

Таблица 6

Основные характеристики испарительных ионно-геттерных насосов серии ГИН

Характеристики	Тип насоса			
	ГИН-0005P	ГИН-05M1	ГИН-2	ГИН-5
Быстрота действия, л/с	- 5 20	600 450 1500	2400 1800 6000	5000 4500 20000
Ресурс испарителей при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ Па ($3 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.), ч	600	1500	3000	3000
Запас титана в насосе, г	-	6	50	100
Диаметр входного отверстия, мм	-	160	260	500
Потребляемая мощность, кВт	0,13	0,85	3,5	3,5
Расход охлаждающей воды, л/ч	-	300	600	600
Габариты	Ø85	364·280	510·420	770·680
	203	464	882	1100

при давлении $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.). При давлении ниже $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.) скорость испарения может быть снижена до 10 и 30 мг/ч без уменьшения номинальной быстроты откачки, при этом срок службы возрастает до 3000 ч. Конструкция ГИН'ов допускает периодическую разработку их для смены шпилек испарителя и для очистки запыленных поверхностей.



Типичные зависимости быстроты откачки от давления и спектр остаточных газов показаны на рис.6 и 7. Газ CH_4 синтезируется в насосе; пик с массовым числом 28 соответствует газу CO .

Недостатком ГИН-ов, кроме малой быстроты откачки инертных газов, является их чувствительность к прорыву атмосферного воздуха в работающий насос и ограниченный запас титана.

ГИН-ы со средней и большой быстротой откачки рационально использовать (при совместной работе со вспомогательным насо-

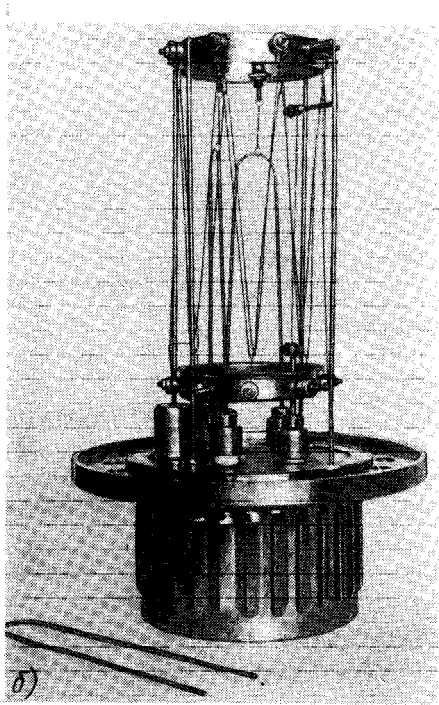


Рис. 5. Насос ГИН-05М:
а - схема насоса: 1 - анод; 2 - испаритель; 3 - катод;
4 - корпус; 5 - монтажный каркас электродной системы; 6 -
токоввод; 7 - фланец цоколя; 8 - выпускной патрубок; 9 -
заглушка б - электродная система

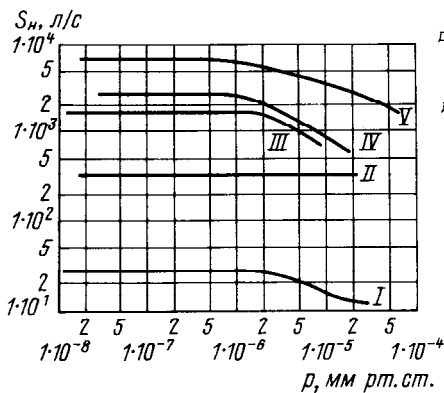
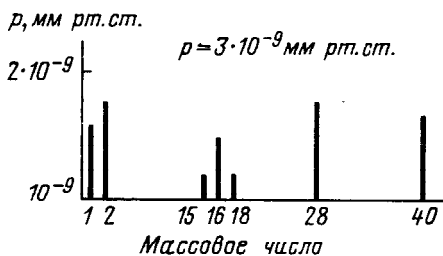


Рис. 6. Зависимость быстроты действия насоса ГИН-2 от давления:

I - аргон; II - метан; III - воздух; IV - азот; V - водород

Рис. 7. Спектр остаточных газов в насосе ГИН-2



сом) для откачки ЭВП, в вакуумной металлургии, в технике эксперимента и т.п.

Насосы с быстротой откачки менее 2 л/с, например, с испарителями E^* предпочтительнее использовать для постоянной откачки ЭВП.

3. Насосы орбитронного типа

Испарительные ионно-геттерные насосы орбитронного типа (электростатические) имеют большую быстроту откачки инертных газов. Это достигнуто увеличением длины пробега электронов в радиальном электростатическом поле и эффективности ионизации откачиваемого газа. Схема действия ионизатора такого насоса показана на рис. 8. Электроны инжектируются одним (3) или несколькими прямонакальными вольфрамовыми катодами с достаточным угловым моментом, чтобы миновать центральный стержневой анод (1) и двигаться по спиральным орбитам (4) вдоль не-

го. Более широкий, чем вольфрамовая нить катода, танталовый токоподвод одновременно экранирует катод. Положение и форма катода подобраны так, что осевая и радиальная симметрия электрического поля системы нарушена. Небольшое положительное напряжение смещения на катоде (от 50 до 250 В) предотвращает попадание электронов на сетку или стенку насоса (2), являющуюся одновременно коллектором с напыленным слоем титана.

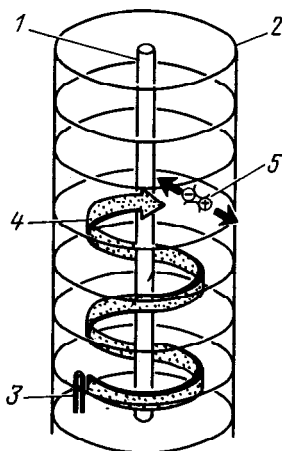


Рис. 8. Схема ионизатора насоса орбитального типа:
 1 - стержневой анод; 2 - сетка (стенка корпуса насоса); 3 - катод; 4 - траектория электронов; 5 - акт ионизации

Поэтому электроны двигаются по орбитам со скоростью, имеющей осевую, радиальную и тангенциальную составляющие, до тех пор, пока не ударятся о центральный стержень (1). Электроны, инжектированные с достаточным угловым моментом, чтобы миновать катод, могут удариться о стержень анода. Электроны же, обладающие большим угловым моментом, будут продолжать двигаться по спиральным орбитам (4) от одного конца стержня к другому. При этом составляющая их скорости в осевом направлении будет менять свой знак. Попадание электронов на центральный стержень, имеющий малое поперечное сечение, затруднено. Поэтому электроны движутся по орбитам достаточно долго, вследствие чего и эффективность ионизации газа резко возрастает. Образовавшиеся ионы попадают на коллектор в слой с напыляемым титаном, где происходит их химическое связывание с геттером, или же вне-

дряются в глубь этого слоя и "замуровываются" вновь напыляемыми слоями.

Источником титана в таких насосах является анодный стержень или закрепленные на вольфрамовом стержне ($\phi 0,3-0,5$ мм) титановые цилиндры ($\phi 8-35$ мм), либо, наконец, титановый сублиматор с внутренним нагревателем.

Количество и распределение цилиндров на центральном стержне определяется необходимостью более эффективного "замуровывания" на стенках насоса ионов откачиваемого газа. В зависимости от размеров насоса на анодный стержень подается напряжение от 4 до 40 кВ.

При работе насоса большая часть инжектируемых катодом электронов, траектории которых проходят вблизи стержневого анода, попадает на титановые цилиндры, а не на вольфрамовый стержень, поскольку они имеют больший диаметр и отбирают электроны со сравнительно большим угловым моментом. При этом цилиндры равномерно нагреваются до температуры сублимации титана (порядка 1150°C). Вольфрамовый стержень нагревается незначительно, в основном, вследствие теплопроводности.

Существует много конструкций электростатических ионно-геттерных насосов. У большинства из них запыляемый во время работы цилиндрический корпус из нержавеющей стали имеет водяное охлаждение; маломощные насосы охлаждаются потоком воздуха.

В насосах с подогреваемым титановым сублиматором применяется от одной до четырех описанных ионизационных систем. Ионизационные системы и сублиматор закрыты со стороны входного патрубка экраном, предотвращающим попадание в откачиваемый объем распыленного титана и теплового излучения.

Быстрота действия подобных насосов ограничивается, в основном, проводимостью входного сечения. Так, быстрота действия при давлении ниже 10^{-4} Па (10^{-6} мм рт.ст.) для насоса с диаметром входного сечения $d = 0,1$ м составляет: для H_2 - 900 л/с, N_2 - 500 л/с, воздуха - 300 л/с, Ar - 7 л/с; при $d = 0,3$ м быстрота действия H_2 - 9000 л/с, N_2 - 6000 л/с, воздуха - 4500 л/с, Ar - 105 л/с; при $d = 0,6$ м быстрота откачки воздуха составляет 30000 л/с.

Малая по сравнению с N_2 быстрота откачки воздуха объясняется наличием Ar .

Электростатические насосы могут работать от источников постоянного и переменного токов. Во втором случае быстрота от-

качки активных газов снижается незначительно, хотя для инертных газов она уменьшается вдвое. Однако при питании насоса переменным током упрощается и удешевляется конструкция блока питания.

Предельное остаточное давление, получаемое такими насосами, $6,7 \cdot 10^{-8}$ — $6,7 \cdot 10^{-9}$ Па ($5 \cdot 10^{-10}$ — $5 \cdot 10^{-11}$ мм рт.ст.). Установка в насосе охлаждаемого жидким азотом коллектора T_c позволяет получить давление порядка 10^{-10} — 10^{-11} Па (10^{-12} — 10^{-13} мм рт.ст.). Такую конструкцию, в частности, имеет отечественный насос СОН-А-1 ($S_n = 500$ л/с) (рис. 9). Ресурс насосов орбитронного типа составляет 300–2000 ч. Эти насосы рекомендуются использовать для откачки больших количеств активных газов и

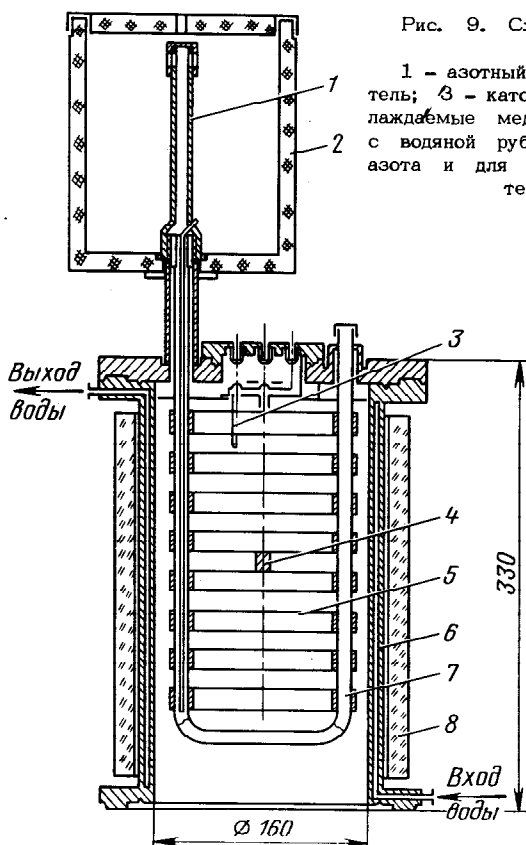


Рис. 9. Схема орбитронного насоса СОН-А-1:

- 1 — азотный питатель; 2 — азотный накопитель; 3 — катод; 4 — анод-испаритель; 5 — охлаждаемые медные кольца; 6 — корпус насоса с водяной рубашкой; 7 — трубка для жидкого азота и для размещения нагревателя; 8 — теплоизоляционный экран

смесей активных газов с инертными. Применять их для откачки инертных газов нецелесообразно из-за плохого использования сорбционной способности геттерной пленки.

III. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ НАСОСЫ

1. Механизм действия и основные характеристики

Распыление геттерного материала (как правило Ti , а также Ta , Mg и др.) в магнитных электроразрядных насосах происходит под действием ионов откачиваемого газа, бомбардирующих катодные пластины. Ионизация газовых молекул осуществляется при взаимодействии нейтрального газа с плазмой пеннинговского разряда в полости анодных ячеек. Анодные ячейки могут иметь в сечении круглую, квадратную, прямоугольную или правильную многоугольную форму. Число ячеек в мощных насосах достигает несколько тысяч, магнитное поле в них перпендикулярно плоскости катодов (рис.10,а).

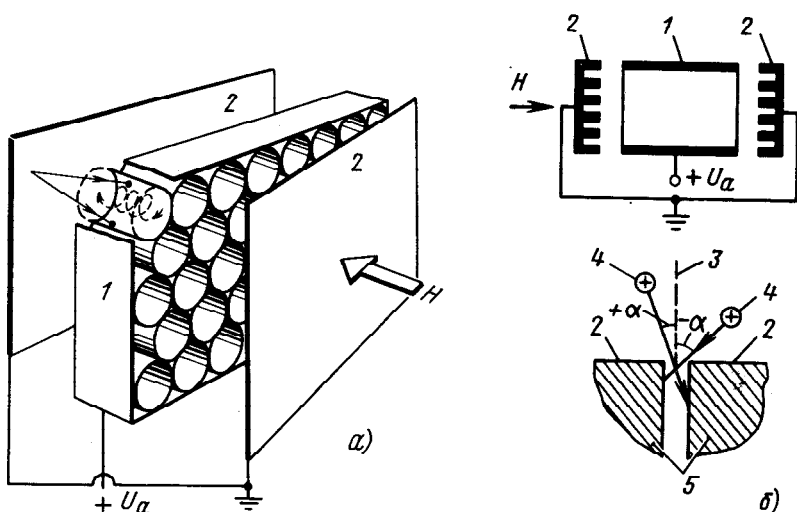


Рис. 10. Схемы диодного насоса:
 а - с плоскими; б - с ребристыми катодами; 1 - анод;
 2 - катод; 3 - ось ячейки; 4 - ион; 5 - стенки щели

Зажигание разряда происходит при подаче постоянного напряжения в несколько киловольт между анодом и катодами. Свободные электроны, всегда имеющиеся в разрядном промежутке, начинают совершать сложное колебательное движение между катодами, вызывая возбуждение и ионизацию газовых молекул и появление вторичных электронов. В результате этого процесса в полости анодных ячеек формируется стабильный пространственный заряд с электронной концентрацией $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$, поддерживающий самостоятельный газовый разряд вплоть до давлений $10^{-9} - 10^{-11}$ Па ($10^{-11} - 10^{-13}$ мм рт.ст.).

Образовавшиеся в результате ионизации газа положительные ионы ускоряются аксиальным электрическим полем и бомбардируют катоды, вызывая их интенсивное распыление. В среднем один падающий ион выбивает один атом Ti . Большая часть распыленных атомов осаждается на поверхности анода, образуя непрерывно обновляемую пленку. Эта пленка сорбирует активные газы и "замуровывает" атомы адсорбата.

По современным представлениям откачка газов магниторазрядным насосом является результатом двух основных механизмов поглощения. Один из них — хемосорбция газов распыленным геттером; второй — растворение газов в катодах и пленках распыленного катодного материала.

Существует ряд гипотез, согласно которым возбужденные нейтральные атомы адсорбируются на поверхности анода и запыляются материалом катодов; быстрые нейтральные частицы, образовавшиеся из ионов путем перезарядки, внедряются в анод и запыляются материалом катодов; поток атомов распыляемого катода действует подобно рабочему веществу диффузионного насоса и выталкивает газ из межэлектродного пространства с последующим "замуровыванием" его на аноде; ионы газа приобретают кинетическую энергию, достаточную для попадания на анод за счет колебаний пространственного заряда.

Большинство атмосферных газов химически активны (N_2, O_2, CO, CO_2 , пары H_2O, H_2 , легкие углеводороды) и за исключением H_2 откачиваются путем хемосорбции, образуя термически устойчивые окислы, нитриды и карбиды Ti (например, окись Ti устойчивая до $1500^\circ C$, нитрид Ti — до $3000^\circ C$; карбид Ti плавится при $3140^\circ C$). Поэтому поглощение этих газов в насосе имеет необратимый характер.

Молекулы газа, не взаимодействующие с титаном (углеводороды, пары воды, тяжелые сложные молекулы) в разряде диссо-

цируют на более простые компоненты, которые в свою очередь, ионизируются и откачиваются. Образующиеся при диссоциации отрицательные ионы идут непосредственно на анод. Тяжелые многокомпонентные ионы распадаются также при ударе о поверхность катодов.

Углерод, образующийся при диссоциации сложных молекул, отлагается на внутренних поверхностях насоса. На аноде атомы углерода образуют карбид Ti , имеющий низкий коэффициент распыления. Этим объясняется уменьшение быстроты действия магнито-разрядных насосов при попадании паров масла или продуктов его разложения. Особенно опасно осаждение свободного углерода на поверхности изоляторов, приводящее к омическому разогреву изоляторов, пробую и, в конечном итоге, выходу насоса из строя.

Пеннинговский разряд имеет высокую эффективность ионизации остаточных газов. Так, на поглощение атома азота требуется всего один электрон, протекающий во внешней цепи, на один атом кислорода — два таких электрона. Кроме того, в разряде генерируются диссоциированные и возбужденные атомы и молекулы, имеющие значительно большую химическую активность, чем стабильные молекулы газа.

Таблица 7

Относительные значения быстроты действия диодных магнито-разрядных насосов с титановыми катодами при откачке различных газов

Газ	Быстрота действия, %	Газ	Быстрота действия, %
Водород	270-300	Азот	98-100
Метан	270	Окись углерода	85-100
Дейтерий	190-210	Двуокись углерода	82-100
Аммиак	170	Кислород	55-57
Легкие углеводороды	90-160	Гелий	10-11
Этиловый эфир	135	Неон	4
Пары воды	100-130	Аргон, криптон	1-2
Сухой воздух*	100	Ксенон	1

* При точке росы ниже 228 К

Поскольку коэффициент распыления катодных материалов сильно зависит от массы падающих ионов, и откачиваемые газы имеют различную химическую активность, магниторазрядные насосы обладают значительной селективностью (см. табл. 7).

2. Откачка водорода

Откачка водорода магниторазрядными насосами имеет существенные и важные с практической точки зрения особенности. Его поглощение обусловлено двумя процессами - растворением нейтральных молекул H_2 титановыми катодами и внедрением ионов H^+ в тело катода с последующей диффузией вглубь. Распыление Ti атомарными ионами водорода весьма незначительно (коэффициент распыления для ионов H^+ с энергией 7 кэВ составляет всего 10^{-2} , что на два порядка меньше, чем для ионов Ar^+). Это обстоятельство весьма уменьшает скорость образования свежих пленок распыленного титана при работе насосов в атмосфере чистого водорода, в результате чего поверхностный слой катодов слабо очищается и оказывается насыщенным атомами примесей и загрязнений, внесенных при изготовлении, а также "замурованными" атомами инертных газов. Вследствие этого на поверхности катодов возникает диффузионный барьер, препятствующий сорбции нейтральных молекул H_2 . Поэтому при давлении, меньшем 10^{-6} - 10^{-7} Па (10^{-8} - 10^{-9} мм рт. ст.), быстрота действия магниторазрядных насосов резко падает, будучи ограниченной действием лишь ионной откачки.

Титан и водород хорошо реагируют друг с другом, образуя гидрид титана (TiH_2). Сорбционная емкость Ti по H_2 сильно зависит от структуры используемого геттера (компактный или пористый металл, порошок или свеженанесенная пленка.) Максимальное значение сорбционной емкости получено для рыхлой пленки, получаемой при распылении в атмосфере Ar . Наивысшая измеренная концентрация водорода в титане соответствует однако соединению со структурной формулой $TiH_{1,76}$, что позволяет рассматривать его как твердый раствор водорода в титане, а не химическое соединение.

Раствор водорода в титане имеет больший объем, чем сам титан, что приводит к образованию внутренних напряжений и трещин в местах максимальной концентрации H_2 , к расслоению катодов и, как следствие, к замыканию электродов и выходу насоса из строя. Это явление для насосов с круглыми или квадратными ячейками наблюдается после 200-250 ч откачки H_2 при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Па ($2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.).

Количество H_2 , поглещенного Ti , уменьшается с ростом температуры и падением давления. Минимальное давление, при котором водород удерживается в насосе в связанном состоянии, определяется давлением диссоциации гидрата титана. При комнатной температуре последнее составляет примерно 10^{-10} Па (10^{-12} мм рт.ст.). Поэтому при низких давлениях обратный поток H_2 , обусловленный тепловым воздействием, не осложняет работу насоса даже при близком к насыщению состоянии катодов. Однако при повышении давления энергия бомбардирующих ионов, рассеиваемая на катоде, способствует нежелательному увеличению его температуры. Давление диссоциации гидрата титана при $200^\circ C$ составляет примерно 10^{-2} Па (10^{-4} мм рт.ст.) и возрастает до 133 Па (1 мм рт.ст.) при $400^\circ C$.

Быстрота откачки H_2 при давлении $1,3 \cdot 10^{-5} - 6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.) близка к быстроте откачки N_2 .

В этом случае вероятность ионизации H_2 по сравнению с вероятностью ионизации N_2 более чем в два раза ниже, но все ионы H^+ сорбируются катодом, в то время как эффективность сорбции N_2 достигает лишь 30-50%.

Быстрота откачки H_2 возрастает, если увеличивать степень распыления Ti термическим способом, или путем распыления более тяжелыми ионами, например, Ar или N_2 . В этом случае стабильная откачка H_2 ведется преимущественно путем хемосорбции пленкой Ti , напыленной на анод. Заметная откачка H_2 может продолжаться и в течение некоторого времени после выключения разряда (адсорбция нейтральных атомов чистой поверхностью катодов).

При непрерывной откачке H_2 в диапазоне давлений $6,7 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) наблюдается постепенное увеличение быстроты откачки в 2-2,5 раза. Однако, при давлении, большем $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па ($1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.), эффективная быстрота откачки H_2 будет снижаться из-за тепловой десорбции ранее поглещенного H_2 в результате разогрева насоса.

Чтобы свести к минимуму разогрев катода при повышенном давлении, в работах Д.Г. Синглитона и К.М.Тарнера рекомендуется понижать рабочее напряжение на 40-60% или применять в насосах анодные ячейки прямоугольной формы с соотношением сторон 1:2.

Увеличение быстроты откачки H_2 в насосах с прямоугольными ячейками объясняется тем, что облако электронов вытягивается вдоль оси ячейки, и образующиеся в разряде ионы бомбардируют не узкую область катода под центром анодной ячейки, как это имеет место в круглых или квадратных ячейках, а вытянутую площадку. Такое перераспределение ионов ведет к уменьшению плотности ионного тока и снижает локальный разогрев катодов.

Другим способом повышения эффективности откачки при повышенных давлениях является импульсный напуск H_2 , что позволяет снизить среднее значение откачиваемого газового потока. Кроме того, при импульсном напуске H_2 быстрота откачки при длительной работе снижается медленнее, чем при постоянном напуске. Это объясняется меньшей насыщенностью H_2 поверхности катодов, так как в период между импульсами часть H_2 успевает диффундировать вглубь Ti и снижается его концентрация на поверхности.

3. Откачка инертных газов

Инертные газы не сорбируются и не растворяются в геттерном материале. Они могут удерживаться на поверхности только очень слабыми силами ван-дер-ваальсова взаимодействия. Для их откачки поэтому используется механизм электрического поглощения.

Основная часть атомов инертных газов после отражения и нейтрализации на катодах падает на анод, где замуровывается пленками геттера. Для устойчивого удержания на поверхности анода эти атомы должны иметь относительно высокую энергию. Поэтому для интенсификации их откачки необходимо, чтобы бомбардирующие катод ионы отражались от них с сохранением большей доли своей начальной энергии.

Часть первичных ионов внедряется также в поверхность катодов; в дальнейшем, однако, вследствие распыления катодов возможна их реэмиссия. Поскольку интенсивное распыление катодов напротив анодной ячейки охватывает только их центральную область, а примерно 10–20% их поверхности вообще не затрагивается процессом распыления, доля необратимо поглощенных катодами атомов инертных газов определяется именно этой поверхностью.

Несмотря на низкую быстроту действия магниторазрядных насосов по инертным газам, из-за малого содержания этих газов

в воздухе (Ar - 0,93%; He - $5 \cdot 10^{-4}$ %) при откачке большинства вакуумных систем ее вполне достаточно. При длительной откачке Ar в системах с магниторазрядными насосами возникают периодические колебания давления (так называемая "аргонная нестабильность"), в такт которым изменяется и разрядный ток. Эти колебания возникают вследствие реэмиссии внедренных атомов Ar и захватывают диапазон $2,6 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па ($2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.)

Аргонная нестабильность часто возникает и при длительной (несколько сот часов) откачке воздуха при давлении $\sim 10^{-3}$ Па (10^{-5} мм рт.ст.).

Как уже отмечалось, ионы Ar^+ вызывают интенсивное распыление катодов. Поэтому работа магниторазрядных насосов при давлении $\sim 10^{-7}$ Па (10^{-3} мм рт.ст.) приводит к быстрому очищению поверхностей с отрицательным потенциалом и уменьшает вероятность возникновения аргонной нестабильности. По этой же причине аргонная нестабильность нехарактерна для насосов, эксплуатируемых в широком диапазоне давлений.

На этом принципе основан метод эффективной очистки внутренней поверхности и катодов магниторазрядных насосов, а также металлических высоковакуумных систем ("аргонная обработка"). После аргонной обработки, состоящей в возбуждении разряда в среде аргона при давлении $10^{-1} - 10^{-2}$ Па ($10^{-3} - 10^{-4}$ мм рт.ст.), постоянном напуске и откачке его вспомогательным насосом, увеличивается быстрота действия магниторазрядных насосов и сокращается время достижения предельного остаточного давления.

Для увеличения быстроты действия по тяжелым инертным газам необходимо увеличивать мало распыляемую зону катодов. Один из способов реализации этого требования, позволяющий в два-три раза увеличить быстроту действия по Ar , состоит в применении ребристых катодов (1959 г., Джемсен и др.). В листовом катоде из титана толщиной 4 мм с интервалом в 1 мм были выфрезерованы канавки шириной 1,5 мм и глубиной 3 мм (рис.10,6). В этой конструкции, как видно из рисунка, ионы бомбардируют катоды под небольшим углом скольжения, что увеличивает коэффициент распыления. Одновременно значительно увеличена поверхность, где происходит интенсивное напыление, а ионная бомбардировка слаба или вообще отсутствует (стенки канавок, удаленные от основной зоны распыления). Та-

кие насосы, однако, нетехнологичны, а их ресурс примерно втрое ниже, чем у насосов с плоскими катодами одинаковой толщины.

Другим вариантом конструкции является трехэлектродная разрядная система (рис.11). Она состоит из заземленного анода и изолированного катода в виде решетки, собранной из титановых полосок или в виде титановой сетки с размерами ячеек меньше чем у анода. На катод подается отрицательное напряжение 5-7 кВ. Третьим электродом, выполняющим роль коллектора, являются либо специальные пластины, как это сделано в отечественном насосе типа ТРИОН-150, либо стенки заземленного корпуса насоса.

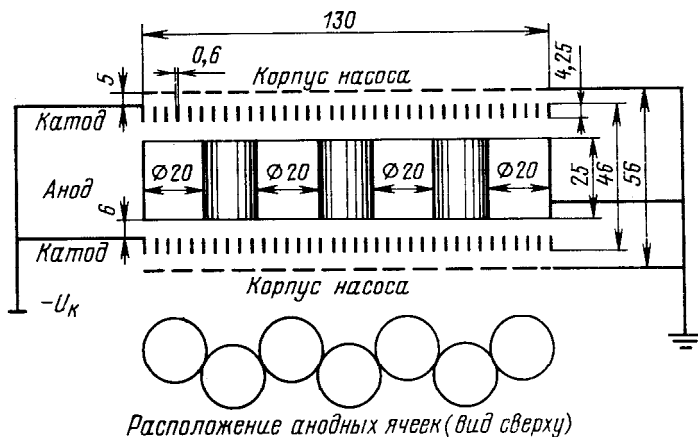


Рис. 11. Схема трехэлектродной разрядной системы

В триодном насосе, как и в насосе с ребристым катодом, значительная часть положительных ионов попадает на катод под большими углами, вызывая его интенсивное распыление. Часть ионов, благодаря полупрозрачной структуре катода, проходит мимо него, замедляется, изменяет свою траекторию и с меньшей энергией бомбардирует катод с обратной стороны. Другая часть прошедших ионов достигает стенки насоса с очень небольшой или нулевой энергией и "замуравывается" распыляемым с катода титаном.

Трехэлектродный насос имеет повышенную и стабильную быстроту действия по инертным газам (например быстрота действия по Ar составляет 25-30% от быстроты действия по

воздуху). Его дополнительным достоинством является облегченный запуск даже при давлении $\sim 10 \text{ Па}$ ($1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.).

Недостаток трехэлектродных насосов по сравнению с диодными состоит в большем разогреве термически изолированных катодов, сопровождающемся значительным газовыделением.

В дифференциальном диодном насосе, также имеющем повышенную быстроту действия по инертным газам, один из катодов выполнен из более легко распыляемого чем титан материала, например, из *Ti* (рис. 12). Быстро распыляемый материал,

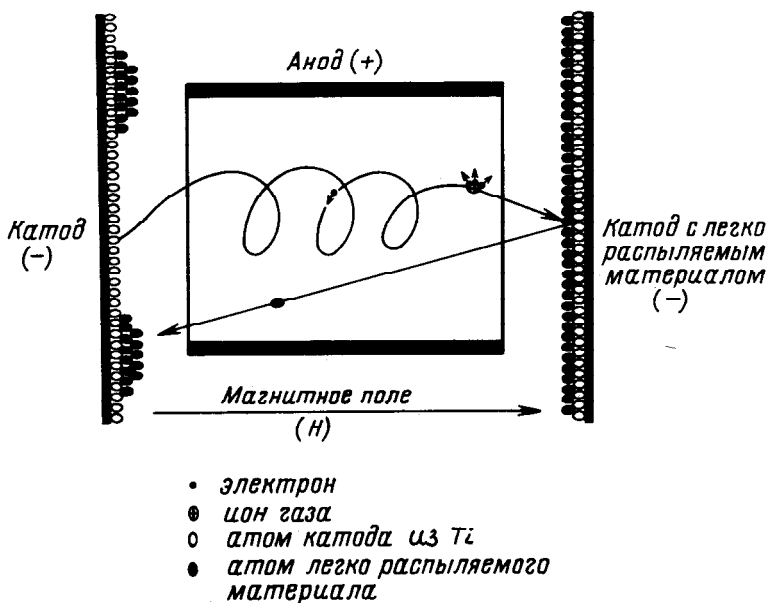


Рис. 12. Схема разрядной ячейки дифференциального насоса

осаждаясь на катоде из титана значительно эффективнее "замуровывает" внедрившиеся в катод ионы и препятствует их реэмиссии под действием ионной бомбардировки. Такой насос стабильно откачивает инертные газы до исчерпания ресурса катодов; его быстрота действия по *Ar* достигает 25–30% от номинальной быстроты действия по воздуху.

Повышенной эффективностью откачки инертных газов обладают также разрядные ячейки магнетронного типа.

4. Основы расчета и конструктивные особенности

Несмотря на достигнутый за последнее десятилетие прогресс в построении физической и математической модели разрядного насоса, полная теория и базирующаяся на ней методика расчета таких насосов пока еще не созданы. Существующие методы носят преимущественно эмпирический характер [1, 8].

Основным фактором, определяющим вакуумные параметры магнито-разрядных насосов, является скорость распыления катодного материала. Она зависит от энергии и потока бомбардирующих катод ионов. Энергия ионов определяется подводимой к электродной системе мощностью, а поток ионов – молекулярной концентрацией откачиваемого газа и интенсивностью разряда (отношением тока разряда к давлению). Как показывает теория и эксперимент, интенсивность разряда остается постоянной в широком диапазоне давлений (рис. 13). Поэтому при понижении

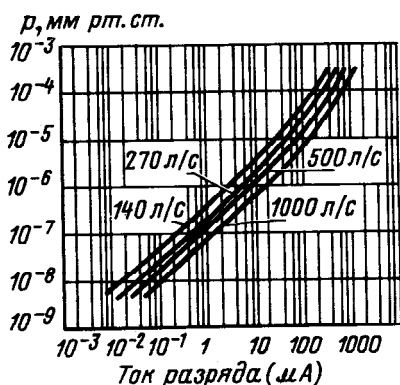


Рис. 13. Зависимость тока разряда от давления в магнито-разрядных насосах различной производительности

давления пропорционально падает разрядный ток и соответственно уменьшается поток ионов, что приводит к уменьшению производительности насоса.

При конструировании насоса геометрические размеры анодной ячейки и значения напряженности магнитного и электрического полей должны быть связаны оптимальным образом, чтобы обеспечить максимальную интенсивность разряда. Для ячейки кругового сечения диаметром d , эта взаимосвязь выражается следующей приближенной формулой:

$$(Bd)_{\text{опт}} = 3,06 \cdot 10^{-5} \mu^{0,5},$$

где B – магнитная индукция, Т; U – анодное напряжение, В; d – диаметр анодной ячейки, м.

При конструировании реального насоса, состоящего из большого числа ячеек, необходимо обеспечить максимальную вакуумную проводимость зазора между анодом и катодами, чтобы наиболее эффективно использовать все ячейки, и одновременно иметь магнитную систему с минимальной массой. Поскольку эти два требования взаимно противоречивы, попытка компромиссного решения приводит к ограничению числа разрядных ячеек в одной электродной системе.

Для расчета основных параметров насоса можно воспользоваться следующими приближенными эмпирическими формулами:

$$S_{\text{Я}N_2} = 172,56 \cdot 10^5 l d^2 B p^{0,2} \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^4 p}{1,33 + 4 \cdot 10^4 p} \right)$$

$$\text{или } S_{\text{Я}N_2} = 3,125 \cdot 10^4 l U^{0,5} \left(H d - \frac{2,304 \cdot 10^5}{H d} \right) (1 - e^{-250d})$$

$$\text{или } S_{\text{Я}N_2} \approx 1,5 \cdot 10^7 B^2 d^2 l,$$

где $S_{\text{Я}N_2}$ – быстрота действия по N_2 одной разрядной ячейки Пеннинга, л/с;

B – магнитная индукция, (0,1–0,2) Т;

H – напряженность магнитного поля, (80000–150000) А/м;

U – напряженность постоянного тока, (3000–7000) В;

d – диаметр анодной ячейки, ($1 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-2}$) м;

l – высота анодной ячейки, ($0,5 \cdot 10^{-2}$ – $3 \cdot 10^{-2}$) м;

p – рабочее давление, (10^{-4} – 10^{-7}) Па.

Формулы применимы при отношении $l/B = 0,2 \div 0,9$,

где B – расстояние между катодами, м.

В реальных магниторазрядных насосах электродный блок состоит из n ячеек, соединенных параллельно и находящихся под одним анодным напряжением. Быстрота действия n ячеек

$$S_n = n S_{\text{Я}}$$

Эта быстрота действия уменьшается до $S_{\text{ЭФ}}$ из-за наличия сопротивления проводимости в зазоре между анодом и двумя катодами:

$$S_{\text{ЭФ}} = S_n \frac{\text{tg} \vartheta}{\vartheta},$$

$$\text{где } \vartheta = \frac{\kappa A}{785 \cdot \delta} \sqrt{\frac{S_n}{A L}},$$

A – ширина электродного блока, ($1 \cdot 10^{-2}$ – $20 \cdot 10^{-2}$) м;

L – длина электродного блока, ($1 \cdot 10^{-2}$ – $40 \cdot 10^{-2}$) м;

* В скобках даны опытные величины от меньшей до наибольшей.

K – коэффициент, равный 1, когда доступ к электродному блоку открыт с одной стороны, и 0,5, когда блок открыт с двух сторон;

δ – величина зазора между анодом и одним из катодов, $(2,5 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3})$ м.

Если магнитораэрядный насос содержит N электродных блоков, то эффективная быстрота действия на присоединительном фланце насоса S_H может быть рассчитана по уравнению $\frac{1}{S_H} = \frac{1}{N S_{з\phi}} + \frac{1}{F}$, где F – проводимость между карманом с электродным блоком и присоединительным фланцем насоса, л/с.

Рассмотрим подробнее конструктивные особенности элементов магнитораэрядных насосов различных типов.

Повышение производительности разрядных насосов достигается увеличением числа анодных ячеек и секционированием разрядных блоков с такими ячейками. Наибольшее распространение нашли серийно выпускаемые магнитораэрядные насосы с быстротой действия от долей до 10^3 л/с (рис.14; табл. 8). Насосы с быстротой действия до 10^4 л/с выпускают по индивидуальным заказам.

По соображениям экономичности и надежности в магнитных системах насосов применяются постоянные магниты, чаще всего керамические на основе феррита бария (типа 2БА; 2,8БА; 3БА) [1]. Возможно применение магнитов на основе сплава железа и кобальта с различными добавками (типа ЮНДК25А или ЮНДК35Т5) [1], а также магнитов с повышенным B на основе сплава кобальта с редкоземельными элементами, например, с самарием.

Магниты из феррита бария можно нагревать лишь до $150-250^\circ\text{C}$.

Поэтому при термическом обезгаживании насоса при более высоких температурах такие магниты надо снимать. Прогрев насосов с литыми магнитами (типа ЮНДК) возможен до 500°C . Магниты на основе сплава кобальта с самарием могут прогреваться только до $150-200^\circ\text{C}$.

Для создания компактных магнитных систем с несколькими рабочими зазорами при напряженности магнитного поля до 150000 А/м наиболее подходящим материалом является феррит бария. Для создания полей с напряженностью $160000-200000$ А/м более целесообразны литые магниты (типа ЮНДК). Применение магнитов на основе сплава кобальт–самарий позволяет создать

облегченные компактные магнитные системы с напряженностью магнитного поля до 240000 А/м .

Частые прогревы до $300-450^\circ\text{C}$ с целью обезгаживания предъявляют ко всем элементам насоса и вакуумной системы специфические требования. Дополнительные требования предъявляет способ расположения магнитной системы – снаружи или внутри корпуса. В большинстве случаев корпус насоса, аноды электродных систем, крепеж, часть деталей высоковольтных тоководов изготавливают из немагнитной нержавеющей стали 12X18Н9Т или 12X18Н10Т ГОСТ 5632-72, возможно

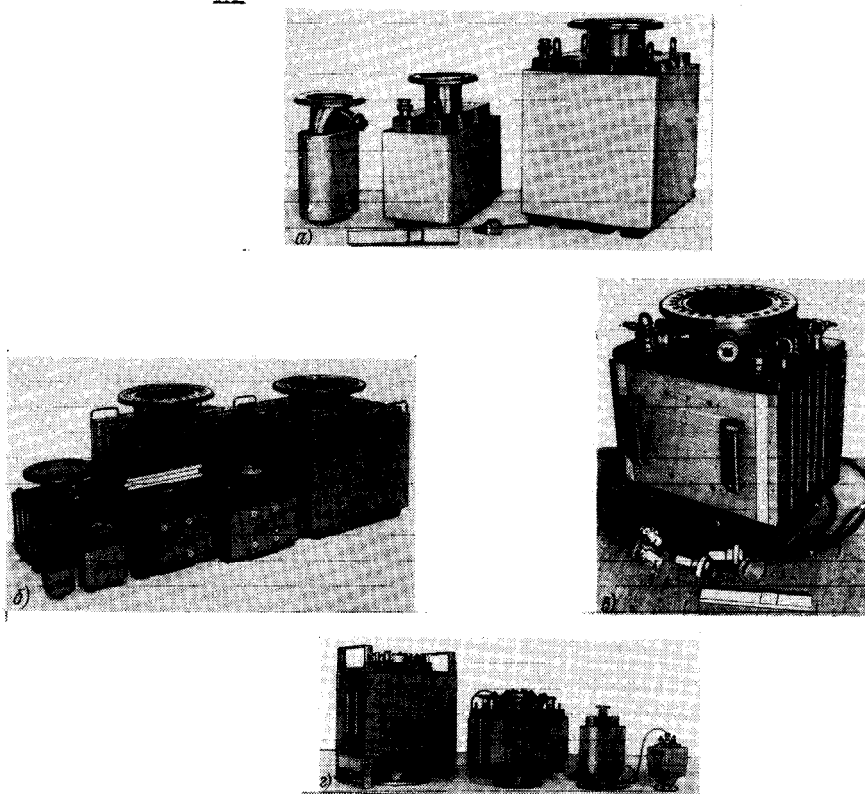


Рис. 14. Отечественные магниторазрядные насосы промышленных типов: а – серии НЭМ, $S_M = 30; 100; 0,2; 300$ л/с; б – серии НМД, $S_M = 6; 25; 63; 100; 630; 1000$ л/с; в – насос НОРД-1, $S_M = 1000$ л/с; г – серии НОРД, $S_M = 250; 100; 25; 10$ л/с

применение хромо-никелевого аустенитного сплава [1]. В некоторых конструкциях не только катоды, но и корпус насоса, аноды изготавливают из технического титана ВТ1-0 или ВТ1-1.

Стенки корпуса и, в особенности, карманы с электродными блоками, делают возможно более тонкими; их толщина определяется по критериям механической прочности и устойчивости.

Возможным конструкционным материалом является также медь. Из нее изготавливают охлаждаемые электроды в насосах типа НОРД, ТРИОД, в отдельных случаях корпуса.

Прокладки для разъемных соединений насоса обычно изготавливают из листовой (0,4-1 мм) меди или алюминия, в некоторых конструкциях насосов - из витона (резиноподобный материал, эластомер). Применение резиновых уплотнителей не рекомендуется даже в непрогреваемых системах.

Изоляция электродов вакуумных высоковольтных тоководов осуществляется с помощью керамических изоляторов. Изоляторы электродов разрядной системы одновременно являются элементами их крепления в электродном блоке (чаще изолируется анод, однако, в трехэлектродных насосах и в насосах с охлаждаемым анодом изолируют катоды). Поэтому опорные изоляторы лучше всего изготавливать из высокоглиноземистой керамики, например, массы 22ХС. Худшие параметры имеют изоляторы из стеатита. Изоляторы вакуумных тоководов предпочтительнее изготавливать из миналунда.

При нагреве катод удлиняется меньше, чем анод (коэффициент линейного расширения нержавеющей стали и меди $17,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, титана - $8,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Поэтому крепежные узлы изоляторов, хотя бы с одной из сторон электродного блока, следует монтировать на тепловом компенсаторе (гибкой пластине), позволяющей аноду и катодам свободно расширяться без нарушения взаимного положения. Длину секции электродных блоков рекомендуется делать не более 0,4 м [1,8]. Сопротивление изоляторов со временем уменьшается из-за напыления на них материала катодов. При снижении сопротивления до $10^8 \Omega$ возникает омический нагрев изоляторов, что приводит к выходу их из строя.

Для защиты изоляторов от напыления применяют экраны из нержавеющей стали, меди, керамики и профилирование поверхности изоляторов.

Изоляторы должны размещать вне активной зоны распыления. Ось узла изоляторов с металлическими коаксиальными экранами, находящимися под разными потенциалами, должна быть перпен-

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Характеристики	Неохлаждаемые насосы						
	НЭМ-0,2	НЭМ-30	НЭМ-100	НЭМ-300	НЭМ-1Т	НЭМ-2,5Т	НЭМ-7Т
Быстрота откачки по воздуху, л/с	0,2	30	100	250	900	3000	6500
при давлении, Па	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Предельное (остаточное) давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$
мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Наибольшее давление запуска, Па	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Наибольшее рабочее давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Габариты насоса, мм:							
высота	100	373	415	575	970	1190	1190
в плане	40x40	200x200	193x373	379x442	571x571	910x910	1550x1550
Входной фланец ДУ, мм	10	100	100	160	260	500	700
Масса, кг	0,3	16,2	42	145	450	1100	2400
Тип блока питания	БПНЭМ-0,2	БПНЭМ-30	БПНЭМ-100	БПНЭМ-300	ВИП НЭМ 1Т	ВИП НЭМ 2,5Т	ВИП НЭМ 2,5Т
Напряжение холостого хода, кВ	+3	+7	+7	+7	+7	+7	+7
Ток короткого замыкания, А	0,01	0,1	0,1	0,42	1	4,5	4,5x2
Габариты блока питания, мм							
высота	160	230	270	340	1760	1790	1790
в плане	160x320	360x530	360x530	500x530	592x625	625x1140	625x1140x2
Масса, кг	5	18	32	71	200	400	400x2
Расход воды, л/ч	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет

Таблица 8

МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

Охлаждаемые насосы					
НОРД-10	НОРД-25	НОРД-100	НОРД-250	НОРД-1000	ТРИОН-150
10	25	100	300	1000	120(200)*
$6,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-6}$
$6,7 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$ $5 \cdot 10^{-11}$
$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$	$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$	$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$	$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$	$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$	$6,7$ $5 \cdot 10^{-2}$
$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$	$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$	$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$	$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$	$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$	$0,1$ $8 \cdot 10^{-4}$
220 100x120	319 200x200	396 175x390	550 254x424	700 543x564	780 280x355
32 7	100 13,5	100 46	160 120	250 300	160 60
БП-10	БП-25	БП-100	БП-100	БП-63	БП-150
-7	-7	-7	-7	-7	-7
0,1	0,3	0,7	0,7	0,7x4	0,7
261 370x430	261 430x530	361 428x530	361 428x530	1805 548x645	361 428x530
30	45	80	80	400	80
50	50-100	100-150	150-200	300-600	100

Характеристики	Встроенные насосы			
	НЭМ-10-1В	НМД-025-1	НМД-063-2	НМД-063-1
Быстрота откачки по воз- духу, л/с в диапазоне давлений $6,7 \cdot 10^{-3}$ $6,7 \cdot 10^{-8}$ Па ($5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст.)	10	250	600	800
Предельное (остаточное) давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$
мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Наибольшее давление за- пуска, Па	$6,7 \cdot 10^{-1}$	1,3	1,3	1,3
мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Наибольшее рабочее давле- ние, Па	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Габариты насоса, мм:				
высота	100	318	474	731
в плане	94x196	332x490	332x490	540x540
Входной фланец ДУ, мм	нет	160	160	260
Масса, кг	1,6	85	121	185
Тип блока питания	БПНЭМ-30	БПНЭМ-300	БПНЭМ-300	БПНЭМ-300
Напряжение холостого хо- да, кВ	+7	+7	+7	+7
Ток короткого замыкания, А	0,1	0,42	0,42	0,42
Габариты блока питания, мм:				
высота	230	340	340	340
в плане	360x530	500x530	500x530	500x530
Масса, кг	18	71	71	71

Продолжение табл. 8

Характеристики	Неохлаждаемые насосы			
	НМД-0,16-1	НМД-0,25-2**	НМД-0,25-3	НМД-0,4-1
Быстрота откачки по воз- духу, л/с в диапазоне давлений $6,7 \cdot 10^{-3}$ $6,7 \cdot 10^{-8}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.)	160	220	260	420
Предельное (остаточное) давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$
мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Наибольшее давление за- пуска, Па	1,3	1,3	1,3	1,3
мм рт. ст.	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Наибольшее рабочее давле- ние, Па	0,13	0,13	0,13	0,13
мм рт. ст.	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Габариты насоса, мм:				
высота	320	340	320	320
в плане	165x390	320x327	320x390	450x390
Входной фланец ДУ, мм	100	160	160	160
Масса, кг	35	53	60	80
Тип блока питания	БП-138***	БП-73	БП-138	БП-138
Напряжение холостого хо- да, кВ	+7	+7	+7	+7
Ток короткого замыкания, А	0,5	0,8	0,6	0,7
Габариты блока питания, мм:				
высота	361	300	361	361
в плане	428x530	480x320	428x530	428x530
Масса, кг	50	52	50	50

Неохлаждаемые насосы						
НМД-0,0063	НМД-0,025	НМД-0,063	НМД-0,1	НМД-0,25	НМД-0,63	НМД-1
6	22	60	110	120	650	1200
$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-10}$
1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$	1,3 $1 \cdot 10^{-2}$
0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$	0,13 $1 \cdot 10^{-3}$
160 80x85	220 157x84	320 320x106	320 320x180	340 320x327	580 500x350	580 500x554
25 2,9	100 8,4	100 21	100 32	160 53	250 190	250 290
БП-0,0063	БП-0,025	БП-0,063	БП-0,1	БП-0,25	БП-0,63	2xБП-0,63
+7 0,12	+7 0,3	+7 0,6	+7 0,7	+7 0,8	+7 1,0	+7 2x1,0
220 480x300 21	220 480x300 20	300 480x320 37	300 480x320 35	300 480x320 47	300 480x320 47	600 480x320 2x47

* У насоса ТРИОН-150 быстрота откачки 200 л/с получена при охлаждении жидким азотом.

** Дифференциальный насос, быстрота откачки $A_{г} = 50$ л/с.

*** Блок позволяет изменять величину тока короткого замыкания.

дикулярна магнитному полю. В противном случае возможно за-
жигание разряда между экранами и выход узла из строя. Же-
лательно, чтобы внешний экран был заземлен [1,3,4.]

Соединение изоляторов высоковольтных тоководов с корпу-
сом или с присоединительным фланцем осуществляется герме-
тической пайкой через переходную коваровую втулку. В неболь-
ших насосах эти изоляторы могут выполнять и функцию кре-
пежного элемента высоковольтного электрода, как, например, в
насосе НОРД-10. В больших насосах применяют несколько
съемных тоководов, отдельно для каждого разрядного блока или
их группы.

Срок службы насосов, в основном, определяется ресурсом ка-
тодов, поскольку эрозия анодов под действием элект-
ронной бомбардировки незначительна. При толщине титановых
катодов 1,5–2 мм и рабочем давлении не выше $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па
($1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.) срок службы составляет не менее 5000 ч,
при давлении $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.) – 50000 ч
(при откачке воздуха). Замена катодов и очистка анодных ячеек
позволяет эксплуатировать насос многие годы. Поэтому в боль-
шинстве конструкций электродные блоки выполняют съемными. В
неразборных конструкциях, характерных для насосов с быстро-
той действия до 25 л/с, предусматривается возможность за-
мены катодов при механическом вскрытии корпуса насоса с
последующей аргоно-дуговой сваркой.

В некоторых вакуумных приборах и аппаратах пользуются так
называемыми встроенными насосами. Эти насосы размещают
внутри откачиваемой камеры в непосредственной близости от
источника газа, они представляют собой совмещенные разряд-
ные и магнитные системы. Особенно эффективны встроенные
насосы в установках с собственным магнитным полем, к при-
меру, в ускорителях заряженных частиц и электромагнитных
сепараторах изотопов [2,8]. Насосы такого типа имеют
предельно простую конструкцию и наилучшие вакуумные пара-
метры, представляя собой собственно электродную систему и
высоковольтный токовод. В зависимости от пространственного
распределения газовой нагрузки насосы могут быть сосредото-
ченными или распределенными. Например, распределенными
встроенными насосами пользуются для откачки потоков фото-
стимулированного газовыделения в ускорителях на встречных
пучках и накопителях [2,8].

Выше уже отмечалось, что производительность магнитораз-
рядных насосов ограничивается газовыделением из электродной

системы, происходящим вследствие разогрева анода и катодов. Принудительное охлаждение электродов позволяет значительно увеличить подаваемую на них мощность, и следовательно, максимальное рабочее давление и быстроту действия насосов при давлении выше 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт.ст.).

При работе насоса мощность, выделяемая на аноде, в 1,5–2 раза превышает тепловую нагрузку катодов, поэтому охлаждаемым обычно является анодный электрод. Однако из-за фокусировки бомбардирующих ионов по оси анодных ячеек на катодах появляются "горячие пятна", сопровождающиеся большим газовыделением. Поэтому в отдельных случаях предпочтительным становится принудительное охлаждение катодов.

Одновременное охлаждение обоих электродов не практикуется. Уменьшить влияние "горячих пятен" удастся путем перфорирования катодов в местах фокусировки ионов, как это сделано, к примеру, в насосах типа НОРД с водоохлаждаемыми анодами (рис.15).

Это приводит к рассредоточению ионов на катоде и уменьшает его локальный разогрев. В такой конструкции охлаждение анода дает существенный эффект и сохраняет преимущества сменных катодов. Перфорирование катодов позволяет также повысить стабильность и быстроту откачки инертных газов. Все это, в том числе и подача отрицательного напряжения на катоды, позволило увеличить давление при запуске насосов НОРД до $6,5\text{--}13$ Па ($5 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.) и в два–три раза – производительность в диапазоне давлений 10^{-7} – 10^{-3} Па (10^{-3} – 10^{-5} мм рт.ст.) (рис. 16). При давлении ниже 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт. ст.) охлаждение не влияет на характеристики насоса, поэтому охлаждаемые насосы рационально использовать при "больших" давлениях. Из этих же соображений в насосах серии НОРД диаметр анодных ячеек выбран равным $10\text{--}12$ мм, что не является оптимальным при давлениях ниже 10^{-5} Па (10^{-7} мм рт.ст.).

Анод насосов типа НОРД представляет собой медную пластину с просверленными ячейками и с расположенной по периметру трубкой из нержавеющей стали, по которой проходит охлаждающая вода (см. рис. 15). Для лучшего теплосъема толщина стенок между ячейками относительно велика (не менее 1 мм), хотя это ограничивает число ячеек на единицу площади катодной пластины и уменьшает запыляемую поверхность анода.

Охлаждение электродов жидким азотом позволяет увеличить быстроту действия во всем диапазоне рабочих давлений. При

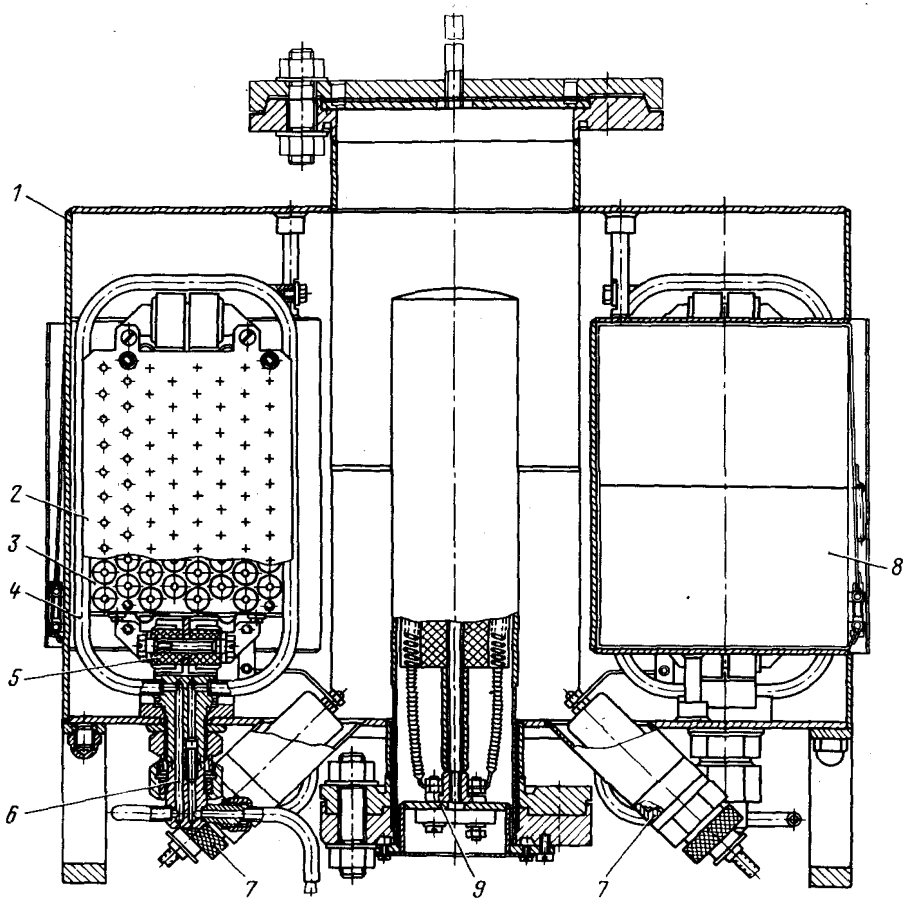


Рис. 15. Схема охлаждаемого насоса НОРД-100:
 1 - корпус; 2 - катод; 3 - анод; 4 - трубка водяного охлаждения;
 5 - экранизированный изолятор; 6 - ввод воды; 7 - токввод; 8 - магнитный блок; 9 - внутренний нагреватель

"высоком" давлении охлаждение жидким азотом становится, однако, неэкономичным. Поэтому в триодном насосе ТРИОН-150 в зависимости от рабочего давления запыляемые титаном поверхности анода и коллектора могут охлаждаться водой или жидким азотом.

Некоторые особенности имеют электродные системы насосов для работы при давлениях 10^{-8} - 10^{-10} Па (10^{-10} - 10^{-12} мм

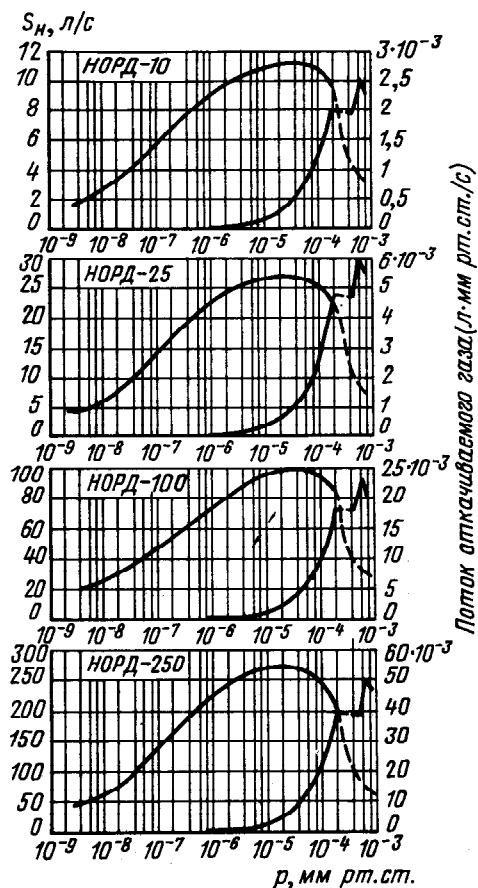


Рис. 16. Зависимость быстроты действия и производительности насосов серии НОРД от давления при откачке воздуха

рт.ст.). В этом диапазоне из-за недостатка свободных электронов возможны затруднения с зажиганием разряда. Для увеличения числа актов ионизации при сверхнизких давлениях электронная система дополняется так называемым триггерным устройством на основе радиоактивного β -источника [5].

Триггерное устройство (рис.17) представляет собой умножитель электронов простейшей конструкции. На внешней по отношению к аноду стороне одного из катодов нанесен слой радиоактивного изотопа $Ni-63$, являющегося источником первичных электронов. Испускаемые источником электроны ускоряются

электрическим полем и бомбардируют эмиттер вторичных электронов, находящийся под положительным потенциалом по отношению к катоду. Испускаемые эмиттером вторичные электроны влетают через отверстие в катод в зону разряда. Этим они облегчают условия зажигания разряда при сверхвысоком вакууме и значительно повышают эффективность ионизации. В насосах с многоячейстыми анодами группа обычных анодных ячеек

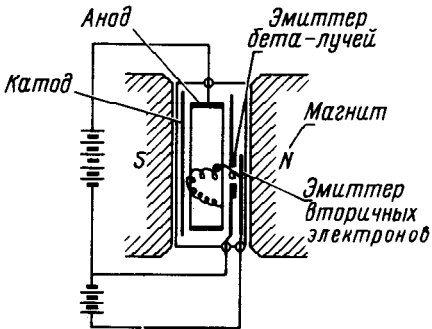


Рис. 17. Разрядная ячейка с триггерным устройством

располагается вокруг одной ячейки большого размера с триггерным устройством. Каждая ячейка имеет в стенке, смежной с большой ячейкой, щелевое отверстие, что позволяет плазме из центральной ячейки быстро распространяться в смежные с ней ячейки [5].

На основе разрядных систем с триггерным устройством разработаны промышленные насосы с быстротой действия от 20 до 320 л/с.

Особенностью этих насосов является постоянная быстрота откачки вплоть до сверхнизких давлений.

Другим способом увеличения скорости ионизации является ввод в зону разряда источника металлических ионов, что осуществляется заменой одного из титановых катодов магниевым.

Mg легко испаряется и имеет достаточную химическую активность, сравнимую с активностью **Ti**. Происходящий при разряде местный нагрев катода приводит к появлению большого числа атомов металла в газовой фазе. Эти атомы ионизируются электронным пространственным зарядом и, ускоряясь электрическим полем, бомбардируют катоды. Дополнительные ионы увеличивают скорость распыления, а, следовательно, и быстроту откачки как активных, так и (по аналогии с дифференциальным

магниторазрядным насосом) инертных газов. Такое увеличение имеет место во всем рабочем диапазоне насоса. В промышленных образцах насосов с комбинированными катодами достигнуто полуторакратное увеличение быстроты действия по сравнению с обычными диодными насосами. Исключение составляет откачка H_2 , по которому быстрота действия меньше примерно на 20% из-за меньшей сорбционной емкости Mg по сравнению с Ti .

5. Электропитание магниторазрядных насосов

Для электропитания магниторазрядных насосов пользуются обычно выпрямителями с напряжением от 3 до 7 кВ и ограничением тока короткого замыкания, что обусловлено необходимостью предотвратить развитие в насосе дугового разряда.

Для эффективной работы насоса к разрядной системе должна подводиться оптимальная мощность, выше уровня которой электроды насоса настолько разогреваются, что их поток газовыделения начинает превышать поток сорбции. Поэтому система "электродный блок - блок питания" должна иметь определенную вольт-амперную характеристику (рис.18). На

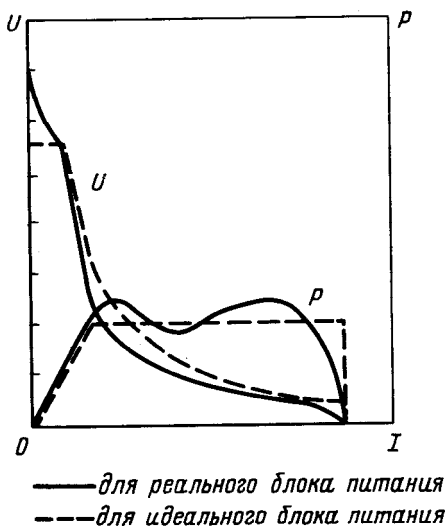


Рис. 18. Характер зависимости подводимой мощности (P) и напряжения U от тока разряда для реального и идеального блоков питания магниторазрядных насосов

рис.19 показана блок-схема источника питания, позволяющая получить характеристику, близкую к требуемой.

В области давлений запуска $1,3 - 10^{-7}$ Па ($10^{-2} - 10^{-3}$ мм рт.ст.) работа насоса характеризуется понижением напряжения между электродами до 200-600 В. При этом диоды Д1 ...Д4 блока питания открыты, и выпрямитель дает ток разряда, близкий к току короткого замыкания, величина которого определяется выбором обмотки W_2 и настройкой трансформатора с магнитным шунтом. В этом режиме насос представляет для блока питания нагрузку с сопротивлением $\sim 10^2$ Ом.

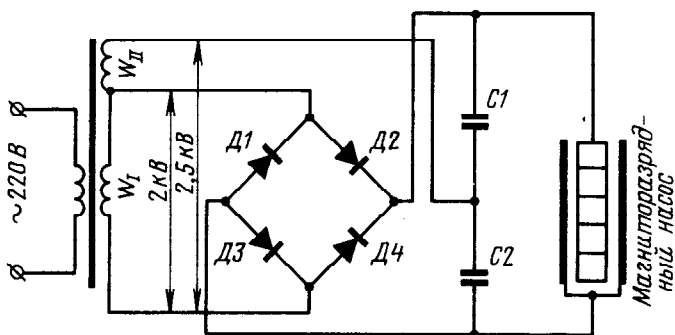


Рис. 19. Упрощенная схема блока питания магнеторазрядного насоса

При этом быстрота действия насоса мала из-за низкой энергии ионов. Увеличение разрядного тока, которое могло бы в известной степени повысить быстроту действия, ограничивается рассеиванием мощности на электродах и конструкцией токовода.

В диапазоне давлений $10^{-7} - 10^{-3}$ Па ($10^{-3} - 10^{-5}$ мм рт.ст.) в насосе все еще течет относительно большой ток, а напряжение по мере уменьшения давления начинает быстро возрастать. В этом режиме насос представляет собой нагрузку с сопротивлением от тысяч до сотен тысяч Ом. Быстрота откачки насоса резко увеличивается, однако, при этих давлениях все еще необходимо ограничение подводимой мощности во избежание перегрева электродов.

Область давлений ниже 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт.ст.) характеризуется малыми токами и напряжением свыше 2 кВ. Диоды Д1 и Д2 в этом режиме запираются; наклон вольт-амперной характеристики определяется удвоителем напряжения Д3, Д4, С1 и С2 и регулируется подбором емкости конден-

саторов S_1 и S_2 (от 0,01 до 0,5 мкФ) и числом витков обмотки W_D . При этом насос представляет собой нагрузку с сопротивлением от сотен килоом до сотен мегаом. При дальнейшем понижении давления напряжение, подаваемое на насос, становится равным удвоенному амплитудному значению напряжения, получаемого со вторичной обмотки трансформатора.

Подбор формы вольт-амперной характеристики существенен для рабочих давлений до 10^{-4} Па (10^{-6} мм рт.ст.). При меньших давлениях питание насоса может обеспечиваться блоком питания при любой форме этой характеристики.

Для электропитания встроенных магниторазрядных насосов в ускорителях заряженных частиц и некоторых других экспериментальных установках в работах Г.Л.Саксаганского предложено использовать электрические и электромагнитные поля, существующие в этих установках ("принцип интеграции вакуумного тракта электрофизических установок"). На этом принципе разработано свыше десятка конструктивных и электрических схем питания магниторазрядных насосов, вообще не нуждающихся во внешних специализированных источниках электропитания. Необходимое напряжение для питания таких насосов создается системой резистивных, емкостных или комбинированных делителей, емкостными или индуктивными накопителями, индукционными генераторами и преобразователями других типов. Применение принципа интеграции целесообразно в тех случаях, когда встроенные насосы находятся в области высоких потенциалов или доступ к ним затруднен, а также при невозможности осуществить внешний электрический вывод к электродной системе.

6. Эксплуатационные характеристики

Современные типы промышленных магниторазрядных насосов имеют высокие эксплуатационные и технико-экономические характеристики. Быстрота действия этих насосов почти постоянна в широком диапазоне давлений (рис.20.). В области сверхвысокого вакуума, особенно в системах, где остаточное давление определяется водородом, плохо распыляющим материал катодов, быстроту действия можно увеличить вводом небольшого количества тяжелого газа, например, Ar . Благодаря этому быстро образуется тонкая свежераспыленная пленка Ti , сорбирующая H_2 ; одновременно уменьшается предельное остаточное давление насоса.

Наличие каких-либо загрязнений, особенно органических, уменьшает быстроту действия насоса и увеличивает остаточное давление.

Загрязнения могут попасть в насос из откачиваемой камеры, системы предварительной откачки, конструкционных материалов самого насоса. Особенно много загрязнений содержится в поверхностном слое металла, прошедшего механообработку (прокат, прессовку, токарную и фрезерную обработку). Поэтому перед присоединением насоса к откачиваемой установке, особенно сразу после его изготовления, капитального ремонта, длительного пребывания в негерметизированном состоянии, тем более, если в окружающей атмосфере имелись пары органических веществ (масла), пылевидные частицы (в том числе, табачный дым), а также после загрязнения насоса в процессе

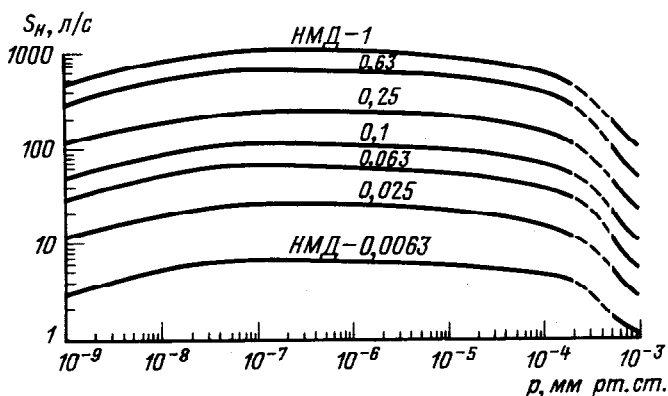


Рис. 20. Зависимость быстроты действия от давления для насосов серии НМД при откачке воздуха

эксплуатации, необходимо произвести тщательную очистку и обезжиривание всех деталей насоса.

Существует несколько способов очистки и обезжиривания. Механическая очистка (в основном запыляемых и катодных поверхностей) может производиться струей песка, стеклянных шариков или металлической щеткой из нержавеющей стали. Возможно применение наждачного камня. Применение наждачной бумаги на органической основе — бумаге, ткани с применением клеящих веществ, — недопустимо во избежание внесения органических загрязнений на обрабатываемую поверхность.

Промывка и протирка с применением растворителей — давно принятый в вакуумной технике, но не лучший способ очистки и

обезжиривания вакуумных поверхностей. Обычно в качестве растворителя применяют бензин, ацетон, спирт, при этом надо учитывать их пожароопасность и токсичность. Ограниченное применение из-за большой токсичности имеют такие превосходные растворители как бензол, трихлорэтилен, четыреххлористый углерод. Промывка проводится в ванне, желательнее с применением ультразвука. Для протирки необходимо использовать бязь, смоченную растворителем. Повторное применение растворителей без их специальной очистки недопустимо из-за возможного загрязнения последующих обрабатываемых деталей.

Предпочтительным является метод промывки следующей моющей смесью: по массе 0,5% моющего средства типа ОП-7 или ОП-10 (ГОСТ 8433-57), 2,5% Na_2CO_3 (стиральная сода) смешиваются с дистиллированной (деионизированной) водой при $+50...+60^{\circ}C$ или моющим средством "Лотос" МРТУ-18-313-69. Тщательная промывка этой смесью проводится в течение 10-15 мин, при этом необходимо следить за температурой смеси. Затем проводится промывка в проточной дистиллированной воде. Детали, находящиеся в вакууме, нельзя трогать незащищенными руками, следует использовать чистые белые капроновые (нейлоновые) или из полимерного материала перчатки.

Для ускорения сушки детали можно помещать в сушильные шкафы ($+100...+150^{\circ}C$). Проводить осушение струей горячего воздуха не рекомендуется из-за возможного содержания в нем паров масла. При изготовлении или ремонте неразборных насосов очистку и обезжиривание деталей необходимо производить до их окончательной сборки и сварки.

При загрязнении насосов во время эксплуатации, особенно при ухудшении вакуумных параметров из-за загрязнения катодов, можно очищать детали методом химического и электрического травления и ионной бомбардировки.

Для восстановления работоспособности запыленных геттерным материалом керамических изоляторов возможна их очистка травлением в 2%-ном растворе HF . Эффективна очистка травлением в титрованном растворе (по объему) 30% HNO_3 и 3% HF , однако она требует достаточного навыка и соблюдения мер предосторожности. Детали из титана протравливают в течение 1-2 ч. в водном растворе (по массе) с 9% HNO_3 , 12% HF и 0,04% H_2O_2 с последующей немедленной промывкой в дистиллированной воде.

Кислотное травление разъедает титановую пленку быстрее, чем детали из нержавеющей стали, кобальта и места спая кобальта с керамикой. Поэтому очистку неразборных (особенно не-

больших) насосов следует производить следующим образом. Предварительно промыть вакуумную полость насоса дистиллированной водой, при этом происходит частичное уплотнение керамических деталей, что предотвращает на некоторое время разьедание спая керамики с коваром в токовводе. Затем насос заполняют водным раствором 30% HNO_3 и 3% HF , после чего сразу же несколько раз прополаскивают дистиллированной водой и просушивают.

При любом виде механической и химической очистке необходимо следить за целостностью уплотняющих поверхностей.

Полученный с завода-изготовителя насос, как правило, не требует проведения очистки и обезжиривания. Если насос не воспроизводит паспортные вакуумные характеристики, то при отсутствии электрических утечек, исправности блока питания и номинальной напряженности магнитного поля необходимо перебрать насос для выявления дефектов и затем очистить и обезжирить.

Откачиваемые магнитоэрозийными насосами установки должны иметь безмасляную систему предварительной откачки с использованием адсорбционных (цеолитовых) насосов или механических насосов с сорбционными прогреваемыми ловушками.

Для получения в откачиваемой камере остаточного давления ниже 10^{-6} Па (10^{-8} мм рт.ст.), установка должна допускать высокотемпературную тренировку при $250...450^{\circ}C$. В протяженных камерах нагрев целесообразно производить методом тепловой волны, идущей по направлению к форвакуумному насосу. Эффективность тренировки возрастает, если откачка в это время производится "черновым" непрогреваемым магнитоэрозийным насосом, например, типа НОРД, до давления $10^{-3} - 10^{-4}$ Па ($10^{-5} - 10^{-6}$ мм рт. ст.).

Обычно первый после изготовления или капитального ремонта прогрев ведут при $350...400^{\circ}C$ и давлении ниже 1 Па (10^{-2} мм рт.ст.) в течение 24-36 ч. В процессе эксплуатации насоса, при тех же режимах, - в течение 3-12 ч. Время до установления необходимой температуры прогрева не учитывается. Эффективен прерывистый прогрев, например, двухкратный в течение 3-5 ч с перерывом от 8 до 16 ч (1 - 2 смены).

Обезгаживание установки при $200...250^{\circ}C$ возможно и с работающим насосом; система предварительной откачки должна быть отключена. Этот способ обеспечивает связывание только тех химически активных газов, которые образуют при температуре прогрева химически устойчивые соединения с геттерным материалом. В этом случае газовый состав в насосе определяется,

в основном, H_2 и в меньшей мере He, CH_4, Ar, N_2 , парами H_2O и CO, CO_2 . При катоде из Ti откачка H_2 прекращается при $250^\circ C$ (в связи с ростом его десорбции), поэтому выделяющийся при прогреве H_2 должен быть удален из системы другим средством откачки.

Важной характеристикой насоса является продолжительность запуска, т.е. время откачки с давления запуска (обычно 6,7—1,3 Па) ($5 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.) до давления порядка 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт.ст.). На продолжительность запуска влияет множество факторов, в том числе предварительное разрежение, объем системы, температура и род откачиваемого газа, "предыстория" эксплуатации насоса, чистота системы, конструкционные материалы, характеристика источника питания, поляриность изолированного электрода.

При запуске диодного насоса с изолированным анодом разряд легко заполняет не только разрядные ячейки, но и весь объем металлической откачиваемой системы, вызывая дополнительное газовыделение как результат ионной бомбардировки. Продолжительность запуска при этом увеличивается, но сопутствующий прогрев и обезгаживание системы позволяет получить более низкое предельное остаточное давление. При понижении давления разряд локализуется в межэлектродном пространстве насоса. Для предотвращения проникновения разряда в полость насоса или откачиваемой системы на выходе из кармана с электродным блоком или на входном патрубке устанавливается заземленная металлическая сетка с достаточной газовой проводимостью, как, например, в насосах НМД. При этом продолжительность запуска уменьшается.

Насосы с изолированным отрицательным электродом, например, насосы НОРД или ТРИОН характеризуются меньшей продолжительностью запуска, чем диодные насосы без защиты сеткой; они более стабильны в эксплуатации.

В ранее работавших обезгаженных чистых системах с объемом порядка $0,5 S_H$, л. с/с продолжительность запуска не превышает 2–6 мин. Для неработающего или загрязненного насоса продолжительность запуска значительно больше. Наиболее распространенной причиной загрязнений и медленного запуска являются пары H_2O , адсорбируемые при напуске в систему атмосферного воздуха. Чувствительность насоса к парам H_2O возрастает при увеличении напыленных слоев геттерного материала, имеющих губчатую структуру. Поэтому в циклично работающих системах между насосом и откачиваемой камерой желательна установка клапана, который должен

закрываются перед напуском атмосферы. Насос при этом остается под вакуумом в рабочем состоянии. Клапан с регулируемой поверхностью, выполняя роль дросселя, позволяет насосу в продолжении всего периода запуска работать с наибольшей эффективностью при давлении ниже 10^{-2} Па (10^{-4} мм рт.ст.).

При отсутствии клапана перед напуском атмосферы систему необходимо заполнить сухим газом, например, N_2 или воздухом с точкой росы ниже 228К. Эта мера эффективна при кратковременных напусках атмосферного воздуха и в случаях, если система не подвергается разборке.

В период запуска электродная система работает в наиболее напряженных режимах, поскольку начальное газовыделение уменьшает эффективную быстроту откачки насоса, приводит к перегреву насоса и к дальнейшему увеличению газовыделения. Перегрев можно уменьшить путем периодического выключения насоса или работой при пониженной мощности. При откачке систем большого объема или с большим газовыделением запуск целесообразно производить при пониженном давлении.

При включении загрязненного насоса давление в системе, как правило, несколько повышается, поэтому систему предварительной откачки следует отключать не сразу, а только при появлении отчетливой тенденции к снижению давления. Интервал между моментом включения и началом понижения давления в системе определяется начальным давлением, быстротой действия насоса предварительного разрежения и проводимостью соединительного трубопровода. В режиме "короткого" запуска предпочтительнее применять механические насосы большой производительности с ловушкой паров масла.

Однако для получения предельно низкого остаточного давления необходимо использовать безмасляную систему предварительной откачки (рис.21.).

Остаточное давление, получаемое в непрогреваемых системах, зависит от суммарной скорости газовыделения насоса и откачиваемой камеры. В небольших чистых непрогреваемых системах с металлическими уплотнителями редко удается получить остаточное давление ниже $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.). Обезгаживание прогревом при $150...175^{\circ}\text{C}$ такой системы в течение 60 ч позволяет получить давление до $6,7 \cdot 10^{-7}$ Па ($5 \cdot 10^{-9}$ мм рт.ст.).

Рассмотренные особенности магнитоэлектрических насосов позволяют следующим образом резюмировать их эксплуатационные и техникоэкономические характеристики.

Широкий диапазон рабочих давлений, способность длительно и стабильно откачивать практически все газы, включая инертные, отсутствие органических загрязнений откачиваемой системы, большой ресурс, устойчивость к неблагоприятным внешним воздействиям – вибрации, ускорению, ударам, повышенной температуре, авариям с электропитанием, внезапному попаданию атмосферы, отсутствие потребности в постоянной форвакуумной

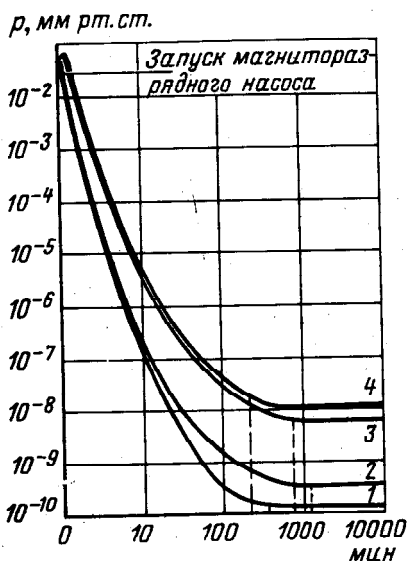


Рис. 21. Кинетика откачки камеры объемом 50 л насосом НОРД-100 при различных режимах форвакуумной откачки:

1 – откачка цеолитовым насосом (ЦВН); 2 – откачка насосом ВН-2МГ с чистой прогреваемой сорбционной ловушкой (ЛС1Т); 3 – откачка тем же насосом с чистой непрогреваемой ловушкой (ЛС2); 4 – откачка тем же насосом с той же непрогреваемой ловушкой, проработавшей 250 ч (ЛС2)

откачке, средствах охлаждения, малая потребляемая мощность, возможность контроля давления по разрядному току, совместимость с системами автоматизированного управления, простота обслуживания – все эти качества делают магниторазрядные насосы незаменимыми при откачке обширного класса высоковакуумных устройств, приборов и оборудования.

К недостаткам этих насосов относятся значительная избирательность по отношению к различным газам, чувствительность к загрязнениям, особенно тяжелыми углеводородами, малый ресурс при давлении выше 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт.ст.), наличие магнитных полей рассеяния и вторичной электронной эмиссии, вылет из насоса паров геттерного материала, необходимость в высоковольтных источниках питания, относительно низкие габаритные характеристики, большая масса и высокая стоимость на единицу быстроты действия и производительности.

При проектировании вакуумных систем необходимо предусматривать такие схемы и режимы эксплуатации магниторазрядных насосов, которые позволяли бы с наибольшей полнотой использовать их положительные качества и сводить к минимуму влияние отрицательных.

1У. КОМБИНИРОВАННЫЕ НАСОСЫ

Вслед за появлением магниторазрядных насосов широкое применение нашли установки, откачиваемые испарительными геттерными и магниторазрядными насосами, а затем были разработаны и комбинированные насосы, сочетающие в одном корпусе средства геттерной откачки и пеннинговские разрядные ячейки. Целесообразность подобной комбинации определяется тем, что геттерные насосы эффективно откачивают большинство химически активных газов, но не пригодны для откачки инертных газов (даже в смеси с активными) и газов со сложной структурой молекул, например, углеводородов. Магниторазрядные насосы, напротив, неприменимы для откачки больших количеств активных газов, но эффективны при откачке инертных газов и углеводородов.

Такая комбинированная система (насос) может проводить откачку с быстротой до 10^6 л/с и имеет предельное остаточное давление ниже 10^{-10} Па (10^{-12} мм рт.ст.) даже без применения низкотемпературного охлаждения. К примеру комбинированный насос с быстротой несколько тысяч литров в секунду менее чем за 5 мин. откачивает необезгаженную прогревом 200-литровую камеру после напуска в нее атмосферы от 1 Па (10^{-2} мм рт.ст.) до 10^{-5} Па (10^{-7} мм рт.ст.); за 10–20 ч в этой же системе достигается давление 10^{-7} Па (10^{-9} мм рт.ст.). В обезгаженной прогревом системе давление 10^{-9} Па (10^{-11} мм рт.ст.) достигается за 16–24 ч.

Разнообразие конструкций комбинированных установок и насосов очень велико. Оно определяется типом испарителей, способом охлаждения запыляемых коллекторов (естественное, водяное, жидким газом, например, азотом, гелием), площадью запыляемой поверхности и тем самым, быстротой поглощения активных газов, и количеством присоединяемых магниторазрядных насосов или встраиваемых в корпус насоса электродных систем и т. п.

На рис. 22 показана схема комбинированного насоса с 24разрядными блоками трехэлектродного типа и внешними маг-

нитеми, обеспечивающими быстроту действия $2,8 \cdot 10^3$ л/с (по воздуху) и 840 л/с (по A_4). На дне корпуса установлена карусель с пятью испарителями Ti . Испарение осуществляется бомбардировкой с петлеобразного вольфрамового катода, расположенного над тиглем с набором титановых дисков диаметром 100–120 мм и толщиной 2–3 мм. Такая конструкция позволяет уменьшить теплопередачу между слоями титана и производить более равномерное распыление на криопанель по 200 г титана с каждого испарителя. Подаваемая на испаритель мощность может регулироваться от 600 до 3000 Вт; при этом скорость испарения меняется от 0,5 до 7 г/ч. Быстрота

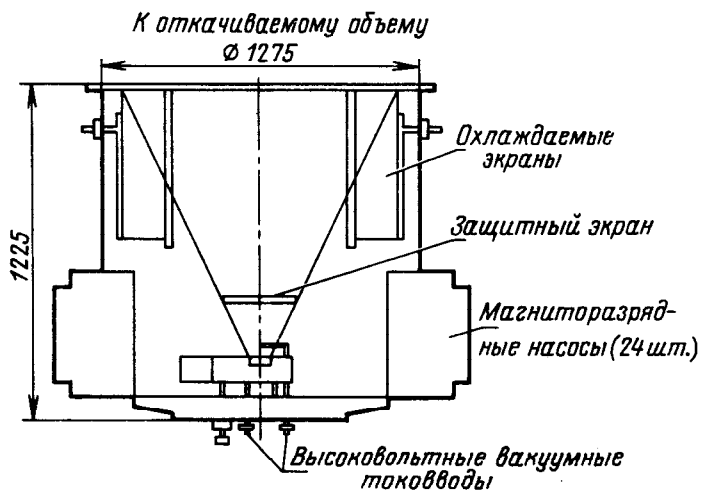


Рис. 22. Схема комбинированного насоса

действия такого насоса 115000 л/с, достигаемое предельное остаточное давление ниже 10^{-11} Па (10^{-13} мм рт. ст.).

Различные конструкции отечественных комбинированных насосов позволяют получить остаточное давление от 10^{-5} Па (10^{-7} мм рт. ст.) до 10^{-9} Па (10^{-11} мм рт.ст.) и имеют быстроту откачки от сотен до 10^4 л/с. Например, насосы типа ЭГИН сочетают в одном корпусе испаритель насосов типа ГИН и разрядные блоки насосов типа НЭМ. Они имеют давление запуска порядка 1 Па (10^{-2} мм рт. ст.) и позволяют получить давление $4 \cdot 10^{-7}$ Па ($3 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.) за 15 ч; их предельное остаточное давление $7 \cdot 10^{-8}$ Па ($5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст.); массовая характеристика таких насосов 0,1–0,12 кг/(л/с).

Более совершенными являются конструкции комбинированных насосов типа НВГМ-2,5 ($S_H = 2500$ л/с) и О1НГМ-4000 ($S_H = 4000$ л/с). Массовые характеристики этих насосов соответственно 0,07 и 0,11 кг/(л/с). Более низкое давление, порядка 10^{-9} Па (10^{-7} мм рт.ст.), позволяет получить неохлаждаемая установка УСВ-1 ($S_H = 2000$ л/с), состоящая из форвакуумных цеолитовых насосов ЦВН-1-2, насоса НМД-0,25-2, соединенного через прогреваемый вентиль с рабочей камерой, имеющей три шпилечных испарителя.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По каким признакам можно классифицировать геттерные и ионно-геттерные насосы?
2. Принцип действия испарительного геттерного, испарительного ионно-геттерного и магнитного электроразрядного насосов, их сходство и отличие;
3. Характеристики геттерных материалов при откачке активных и инертных газов; влияние охлаждения геттерных пленок на параметры насосов;
4. Типы и сравнительные характеристики испарителей;
5. Условия и критерии оптимизации испарительных геттерных насосов;
6. Конструктивные схемы, эксплуатационные особенности и рекомендуемые области применения испарительных геттерных насосов ;
7. Особенности откачки газов в испарительных ионно-геттерных насосах;
8. Устройство ионизаторов ионно-геттерных насосов;
9. Конструктивные и эксплуатационные характеристики насосов с ионизацией термoeлектронным пучком (на примере насосов типа ГИН);
10. Принцип действия, конструктивные особенности и характеристики орбитронных насосов;
11. Рекомендуемые области применения испарительных ионно-геттерных насосов различных типов.
12. Принцип действия и конструктивные особенности магнитных электроразрядных насосов;
13. Механизм откачки различных газов;
14. Способы увеличения скорости действия магниторазрядных насосов по инертным газам;
15. Аргонная обработка насосов, достигаемый эффект и режимы проведения;

16. Принципы проектирования систем электропитания магнито-разрядных насосов;
17. Пусковые характеристики и особенности эксплуатации магнито-разрядных насосов;
18. Целесообразные области применения магнито-разрядных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Г.А. Магнито-разрядные насосы. М., "Энергия", 1970, 112 с.
2. Глазков А.А., Малышев И.Ф., Саксаганский Г.Л. Вакуумные системы электрофизических установок. М., Атомиздат, 1975, 192 с.
3. Грошковский Я. Техника высокого вакуума, М., "Мир", 1975, 622 с.
4. Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. М., "Энергия", 1969, 528 с.
5. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М., "Энергия", 1970, 504 с.
6. Попов В.Ф. Нераспыляемые газопоглотители. Л., "Энергия", 1975, 104 с.
7. Пульцин Н.М. Взаимодействие титана с газами, М., "Металлургия", 1969, 217 с.
8. Саксаганский Г.Л., Котельников Ю.Н., Малев М.Д., Смирницкая Г.В., Юферов В.Б. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении, М., "Атомиздат", 1976, 374 с.
9. Современная вакуумная техника. Сборник под ред. Н.В. Черепнина. М., "ИЛ", 1963, 415 с.
10. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезжиривания и откачки в вакуумной технике. М., "Советское радио", 1967, 408 с.
11. Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике, М., "Советское радио", 1973, 384 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
I. Испарительные геттерные насосы.....	5
1. Сорбционные характеристики напыленных металлических пленок.....	-

2. Испарители.....	8
3. Конструктивные и эксплуатационные характеристики испарительных геттерных насосов.....	12
II. Испарительные ионно-геттерные насосы.....	18
1. Сорбция газов при электрическом разряде.....	-
2. Насосы типа ГИН,	20
3. Насосы орбитронного типа.....	24
III. Магнитные электроразрядные насосы.....	28
1. Механизм действия и основные характеристики.....	-
2. Откачка водорода.....	31
3. Откачка инертных газов.....	33
4. Основы расчета и конструктивные особенности.....	37
5. Электропитание магниторазрядных насосов.....	51
6. Эксплуатационные характеристики.....	53
IV. Комбинированные насосы.....	60
Вопросы для самопроверки.....	62
Список литературы.....	63

Евгений Иванович КОНТОР

ГЕТТЕРНЫЕ И ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Редактор В. М. Токарь
Технический редактор И. В. Пушина
Корректор Л. В. Надеяева

Подписано к печати 20. 10. 77 г. Т - 15334
Формат 60x90 ¹/₁₆ Бумага офсетная № 2
Уч.-изд. л. 4,03 Усл. печ. л. 4
Тираж 1500 экз. Изд. зак. 4464 Тип. зак. 999
Бесплатно

Издательство "Машиностроение", 107885,
Москва Б-78 1-й Басманный пер., 3.

Тип. ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш