

УДК 533.5

Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с. – ISBN 5-283-03913-7.

Рассмотрены принципы работы испарительных геттерных и ионно-геттерных, магнитных электроразрядных, комбинированных, орбитронных, сорбционных, на основе термоактивируемых нераспыляемых геттеров и других типов электрофизических насосов. Изложены принципы и критерии их оптимизации, инженерные методы расчета вакуумных и электрических характеристик, типичные эксплуатационные режимы.

Для научных работников и инженеров. Может быть полезна также студентам вузов и аспирантам.

Табл. 54. Ил. 111. Библиогр.: 144 назв.

Рецензент Б. Н. Яблоков

С $\frac{1704070000-038}{051(01)-88}$ 23-88

ISBN 5-283-03913-7

© Энергоатомиздат, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для вакуумной техники последнее десятилетие было периодом интенсивного промышленного освоения результатов предшествующих исследований по созданию безмасляных средств откачки. Арсенал сверхвысоковакуумных технологий обогатился также экспериментальными устройствами, основанными на новых физических принципах. Достигнут существенный прогресс в понимании процессов, протекающих при высоковакуумной откачке газов этими устройствами, что позволило сформулировать критерии их технико-экономической оптимизации, резко повысить эксплуатационную надежность, технологичность, ресурс, уменьшить стоимость, массу и габариты.

Для электрофизических насосов характерно разнообразие физических принципов и сфер применения. К их числу обычно относят все типы насосов поверхностного действия, в которых для создания и активации сорбирующих поверхностей используются электрический разряд в вакууме, резистивный и электронно-лучевой нагрев, потоки ускоренных заряженных частиц, электромагнитное излучение.

Ориентация на электрофизические насосы определяется возможностью получения практически неограниченной скорости действия при отсутствии в остаточном газе тяжелых углеводородов. Некоторые их типы отличают высокая экономичность, способность к саморегулированию расхода геттера, значительный ресурс. Эти достоинства предопределили масштабность и высокую эффективность практического использования электрофизических насосов, их ведущую роль при решении важнейших задач вакуумной технологии. Массовый переход на электрофизические средства откачки преобразил многие области промышленного использования вакуума и научного приборостроения.

Специфика и своеобразное изящество физико-химических механизмов, определяющих работу электрофизических насосов, привели к кардинальному пересмотру даже самих принципов построения вакуумных систем. Вот лишь один пример. В нашей стране в начале 60-х годов были предложены и получили затем широкое распространение в СССР и за рубежом интегрированные вакуумные системы ускорителей и термоядерных установок. В этих системах электродные блоки электрофизических насосов встроены непосредственно в откачиваемую камеру; для их функционирования используются собственные электромагнитные

поля установок или циркулирующих в них пучков заряженных частиц. Благодаря такой компоновке исключается лимитирующее влияние проводимости вакуумной камеры и удается на 2–3 порядка снизить остаточное давление; резко уменьшаются также стоимость и объем вакуумной системы. Достижимый эффект зачастую не может быть получен никакими другими средствами и технологическими приемами. Подобных примеров немало и в других областях использования высоко- и сверхвысоковакуумной техники.

История развития электрофизических средств откачки восходит к работам Пеннинга по физике газового разряда в магнитном поле (ячейки Пеннинга). Мощный толчок дальнейшим изысканиям в этой области в 50-х годах дали исследования по управляемому термоядерному синтезу, ядерной физике, электронике, физике высоких энергий, освоение ракетно-космической техники. Заметные вехи в их дальнейшем совершенствовании связаны с именами Гуревича и Вестендорпа (1954), Рейхруделя (1956), Холла (1958), Джексона (1959). Отечественные электрофизические насосы промышленных типов созданы коллективом специалистов, сформированным академиком С. А. Векшинским. Различные модификации специализированных насосов разработаны в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, Институте ядерной физики СО АН СССР, НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Харьковском физико-техническом институте, ряде других отраслевых и академических научных центров. В настоящее время десятки типов электрофизических насосов выпускаются промышленными сериями в нашей стране и за рубежом. Они используются в электронной промышленности, полупроводниковом, электровакуумном и оптическом приборостроении, в ускорителях заряженных частиц, термоядерных установках, имитаторах космического пространства, установках радиационно-вакуумного и космического материаловедения, в прецизионной металлургии, других отраслях промышленности и научного приборостроения.

Библиография по электрофизическим насосам и системам откачки на их основе включает около 700 статей в тематических сборниках и научной периодике. Сотнями исчисляется количество изобретений в этой области. Однако последняя крупная работа, обобщающая эту тему, — монография "Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении" (М., Атомиздат, 1976) — опубликована уже более 10 лет назад. С целью систематизировать накопленный за прошедшие годы опыт, обобщить результаты новых физико-технологических изысканий по созданию электрофизических насосов и написана эта книга. Наибольшее внимание уделено насосам промышленных типов, расчету их вакуумных параметров, методам оптимизации, эксплуатационным особенностям, тенденциям совершенствования. Отдельные физические положения обсуждаются лишь в той степени, в какой это необходимо для придания изложению цельности и логической за-

вершенности. Акцент сделан на проблематику, непосредственно связанную с профессиональными интересами автора как участника работ по созданию вакуумных систем ускорителей и термоядерных установок. Поскольку органичная взаимосвязь и постоянное взаимное обогащение традиционны для экспериментальной физики и сверхвысоковакуумной техники, подобный акцент, думается, вполне естествен.

Приложенный к книге библиографический перечень отнюдь не исчерпывает отмеченного выше научно-информационного изобилия, характерного для нынешнего этапа развития электрофизических насосов. В него включены лишь монографии, обзоры и статьи, содержащие обзорно-тематические подборки, а также отдельные материалы историко-приоритетного характера. Первоисточники могут быть найдены по библиографии, приведенной в этих работах. С целью облегчить их поиск список литературы в книге составлен по главам. Исключение сделано только для новых средств откачки, не получивших пока широкой известности, — нераспыляемых геттеров и мембранных насосов (гл. 6). Полнота библиографического перечня к этой главе должна восполнить отсутствие обзорных работ.

Автор благодарит всех специалистов, предоставивших информацию или высказавших советы при обсуждении рукописи. Особо значимы здесь вклад Е. И. Контора, при участии которого написаны § 3.1 и 5.4, комментарий А. И. Лившица по содержанию § 6.4 и доброжелательное внимание Б. Н. Яблокова, чьи критические замечания во многом способствовали формированию окончательного научного и литературного облика книги. Автор высоко ценит дискуссии с Л. С. Гуревичем, Б. Д. Ершовым, Д. А. Карповым, В. В. Назаровым, В. В. Рябовым, Д. В. Серебrenниковым и Л. В. Филипповой в процессе многолетнего сотрудничества по созданию геттерных и ионно-геттерных насосов для электрофизических установок. С глубокой признательностью автор отмечает постоянный интерес к работе и поддержку со стороны академика АН СССР В. А. Глухих. Большую помощь при подготовке рукописи оказала О. С. Расторопова. Критические оценки и пожелания читателей будут приняты со вниманием и искренней благодарностью.

Г. Саксаганский

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

B	— магнитная индукция;	p	— абсолютное давление;
D	— коэффициент диффузии;	P_H	— давление во входном сечении насоса;
D, d	— диаметр цилиндрической камеры, трубопровода;	P_{0H}	— предельное остаточное давление насоса;
E	— напряженность электрического поля;	Q	— газовый поток;
E	— энергия частицы;	q	— плотность газового потока, удельная скорость газовыделения поверхности;
$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	— заряд электрона;	$q_{a.c.}$	— плотность потока активных центров;
F	— площадь;	q_0	— плотность газового потока, падающего на входное отверстие насоса;
G	— газокинетическая проводимость трубопровода, канала, элемента вакуумной системы;	$R_0 = 8,31$ Дж/(моль · К)	— универсальная газовая постоянная;
G_0	— газокинетическая проводимость отверстия;	R, r	— радиус цилиндрической камеры, трубопровода;
I	— сила тока;	\vec{r}	— радиус-вектор точки в пространстве;
L, l	— длина камеры, трубопровода;	S	— быстрота откачки;
M	— молекулярная масса;	S_0	— быстрота действия на единицу площади откачивающей поверхности;
m	— масса молекулы, атома;	S_{0H}	— номинальная быстрота действия насоса;
N	— плотность адсорбированных атомов;	T	— абсолютная температура;
N_0	— плотность адсорбированных атомов в монослое;	t	— временная координата;
$N_{a.c.}$	— поверхностная или объемная плотность активных центров;	V	— внутренний объем камеры, элемента вакуумной системы;
n	— молекулярная концентрация;	V_0	— объем, занимаемый равновесным газом, падающим за единицу времени на единичную площадь поверхности стенки;
P	— коэффициент газокинетической проводимости;		
P_0	— коэффициент газокинетической проводимости трубопровода для равновесного газа в свободном пространстве (коэффициент Клаузиуса);		

v	— скорость молекулы;	μ	— коэффициент внедрения;
x, y, z	— линейные координаты;	μ_0	— скорость испарения геттера на единицу площади;
β	— коэффициент прилипания, конденсации;	Φ	— коэффициент полного молекулярного обмена;
Γ	— коэффициент захвата вакуумного насоса;	φ	— коэффициент непосредственного молекулярного обмена.
η	— коэффициент заполнения поверхности адсорбированными атомами;		
κ	— число атомов геттера, приходящихся на одну поглощенную молекулу газа;		

ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ГН	— геттерный (е) насос (ы);	НЛГ	— нераспыляемый ленточный геттер;
ИГН	— ионно-геттерный (е) насос (ы);	ЭФН	— электрофизический (е) насос (ы).
КЗ	— коэффициент захвата;		
КП	— катодное (ые) пятно (а);		
МЭРН	— магнитный (е) электроразрядный (е) насос (ы);		

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ

1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ

Действие *электрофизических насосов* (ЭФН) основано на физико-химическом связывании активных газов пленкой или слоем геттера; возможна также имплантация молекул или ионов этих газов в граничные поверхности. Атомы инертных газов поглощаются путем ионизации, ускорения и внедрения в эти пленки с последующим "замуровыванием" напыляемым геттером. Для создания указанных условий используются различные физические эффекты, связанные с протеканием электрического тока в конденсированных и газовых средах. К числу важнейших из них относятся:

прямой или косвенный нагрев при пропускании электрического тока (резистивный нагрев) для активации или сублимации рабочего тела насоса (*испарительные геттерные насосы, насосы на основе нераспыляемых геттеров, термические атомизаторы молекулярных пучков в каталитических насосах, мембранные насосы* на основе металлических фольг с асимметричной проницаемостью для откачиваемого газа и т. п.);

нагрев и термическое испарение рабочего тела при его бомбардировке электронными и (или) ионными пучками, лазерном облучении, индукционном нагреве [*испарительные геттерные насосы (ГН), орбитроны, ионно-сублимационные насосы, лучевые насосы* и т. п.];

распыление рабочего тела при его бомбардировке ионными пучками [*магнитные электроразрядные насосы (МЭРН)*, магнетронные насосы, инверсно-магнетронные насосы* и т. п.];

эрозия электродов при возбуждении электрического разряда в парах рабочего тела и пробое разрядного промежутка (*испарительные насосы с плазменными источниками геттерных пленок***, *искровые насосы* и т. п.);

диссоциация, возбуждение, ионизация, ускорение, направленный перенос и имплантация газовых молекул в пленку геттера с помощью электронных пучков или при поддержании той или иной формы электрического разряда в откачиваемом газе [*испарительные ионно-геттерные насосы (ИГН), МЭРН, мембранные насосы, квадрупольные ионные насосы* и т. п.].

* Используются также термины *магниторазрядные, разрядные насосы*.

** Используется также термин *плазменные дуговые насосы*.

Таким образом, для ЭФН любого типа принципиально значимы следующие три фактора:

процессы, происходящие с рабочим телом (веществом) насоса (активация, испарение, сублимация, распыление и т. п.);

физико-химические процессы, идущие с молекулами откачиваемого газа (адсорбция, диффузионный перенос, хемосорбция, ионизация, имплантация, окисление и т. п.);

характеристики электрических и магнитных полей, управляющих этими процессами.

ЭФН удобно анализировать по совокупности трех названных выше функциональных признаков, дополнив их четвертым, описывающим конструктивные особенности. Эти признаки, укрупненно представленные в табл. 1.1, составляют основу классификационных формул ЭФН. К примеру, испарительные насосы с водяным охлаждением на базе прямонакальных титан-молибденовых нитей имеют формулу $IIa-2-a-A$; распределенные встроенные МЭРН без принудительного охлаждения, работающие в магнитном поле откачиваемой установки, — $III-2, 4, 6-b, d-V, \Gamma, E$; каталитические насосы модульного исполнения для откачки водорода путем термической диссоциации его молекул и последующего окисления — $V-5, 1b-a-K$ и т. д. Число возможных комбинаций этих признаков и, стало быть, соответствующих вариантов ЭФН, как видно, значительно превышает число ныне существующих типов. Поэтому в перспективе можно ожидать появления оригинальных модификаций, отвечающих новым сочетаниям классификационных признаков.

В настоящее время серийно выпускаются следующие типы ЭФН: насосы на базе нераспыляемых геттеров с термической активацией путем пропускания тока по металлической подложке, на которую нанесен слой геттера (классификационная формула $I-2-a$);

испарительные насосы с термическим испарением геттера из твердой фазы, осуществляемым резистивным нагревом испарителя (классификационная формула $IIa-2-a$);

испарительные насосы с термическим испарением геттера из твердой фазы, осуществляемым электронным пучком, и сопутствующей имплантацией в пленку геттера ионизованных атомов инертных газов (классификационные формулы $IIa-2, 4, 7-b$; $IIa-2, 4, 7-b, d$);

средства откачки с термическим испарением геттера из жидкой фазы, осуществляемым сфокусированным электронным пучком с электростатическим или магнитным управлением (классификационные формулы $IIb-2-b$; $IIb-2-b, d$). Устройства этого типа обычно представляют собой автономные испарители, встраиваемые непосредственно в откачиваемые камеры;

испарительные насосы с термическим испарением, ионизацией и ускорением атомов геттера, осуществляемыми при возбуждении дугового разряда постоянного либо переменного тока в парах геттера (класси-

Таблица 1.1. Классификационные признаки электрофизических насосов

Преобладающий процесс, идущий с рабочим телом в процессе откачки	Обозначение	Преобладающий процесс, идущий с молекулами откачиваемого газа	Обозначение	Управляющие электрические и магнитные поля	Обозначение	Конструктивное исполнение насоса	Обозначение
Термическая активация	I	Сорбция:	I	Отсутствуют	a	В виде автономного элемента вакуумной системы	A
Термическое испарение с образованием геттерной пленки:	II	бессорбционная диссоциативная с химическим вращением	Ia	Электростатическое	b	Встроенный локализованный	B
твердофазного рабочего вещества	IIa	Сорбция с последующей диффузией	2	Высокочастотное	c	Встроенный распределенный	B
жидкофазного рабочего вещества	IIб	Диффузионный перенос через твердое тело:	3	Постоянное магнитное	d	Работающий в магнитном поле откачиваемой установки	Г
рабочего вещества с неоднородным фазовым состоянием	IIв	без химических вращений на "выходной" границе с химическими превращениями	3а	Прочие	e	С интегрированным электролитанием (см. § 5.5)	Д
Ионное расплытие с образованием геттерной пленки	III	Имплантация:	4			Без принудительного охлаждения	E
Стимулируемая перестройка кристаллической решетки	IV	в твердое тело в жидкое тело	4а			С принудительным охлаждением:	Ж
Прочие	V	Атомизация	5			воздушным	Жа
		Возбуждение	6			водяным	Жб
		Ионизация и направленный перенос	7			жидкоазотным	Жв
		Прочие	8			Комбинированное	И
						Модульного типа	К
						Прочее	Л

Таблица 1.2. Основные характеристики промышленных образцов электрофизических насосов

Тип насоса	Едичная быстрота действия N_2 , м ³ /с	Предельное остаточное давление, Па	Максимальное рабочее давление, Па	Наибольшее давление пуска, Па	Коэффициент захвата N_2	Удельная масса ^{*2} , кг/(м ³ ·с ⁻¹)
МЭРН	$10^4 - 10$	$10^{10} - 10^{-7}$	$10^3 - 10^2$	10	0,09 - 0,25	200 - 600
Испарительные: с биметаллическим испарителем из титан-молибденовых нитей	0,1 - 60	$10^9 - 10^{-6}$	10^2	10^1	0,2 - 0,45	20 - 100
с титановым испарителем косвенного нагрева ^{*1}	1 - 25	$10^9 - 10^{-6}$	1	3	-	-
с нагревом рассеянным электронным пучком	$10^4 - 20$	$10^9 - 10^{-6}$	10^2	1	0,25 - 0,4	50 - 300
с титановым плазменным испарителем	2 - 80	$10^8 - 10^{-6}$	1	10	0,45 - 0,60	10 - 20
На основе нерастворяемого ленточного геттера ^{*1} (модуль из цирконий-алюминиевого сплава)	0,85 - 1,25 (H ₂)	$10^8 - 10^{-9}$	-	-	0,2 - 0,3 (H ₂)	12 - 15

*1 Встраиваются непосредственно в откачиваемую камеру.

*2 Масса насоса, отнесенная к его быстройте действия.

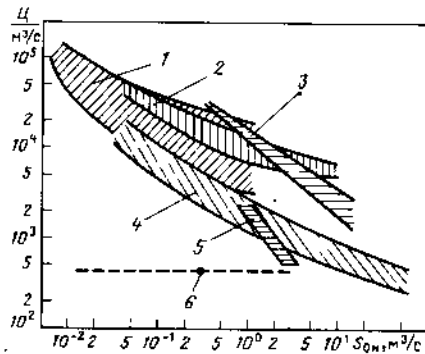


Рис. 1.1. Стоимость (условные единицы) на единицу быстроты действия промышленных высоковакуумных насосов различной производительности:

1 — МЭРН; 2 — турбомолекулярные насосы; 3 — криогенные насосы; 4 — диффузионные паромасляные насосы; 5 — испарительные геттерные насосы; 6 — на 1 м встроенного насоса на основе неаerosольного геттера (по водороду)

фикационные формулы Пв — 2 — b; Пв — 2 — b, d). Геттер в процессе испарения находится в неоднородном фазовом состоянии;

ИГН с ионным распылением геттера при возбуждении газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях (классификационная формула П — 2, 4, 6, 7 — b, d);

ИГН исполнения И, представляющие собой конструктивно совмещенные в едином корпусе откачные блоки различных типов, например МЭРН и насосы с термическим испарением геттера. Насосы этого типа называют обычно *комбинированными*.

Промышленные ЭФН не нуждаются в постоянной форвакуумной откачке. Их важнейшие вакуумные и технико-экономические характеристики суммированы в табл. 1.2 и на рис. 1.1.

При разработке ЭФН, в особенности высокопроизводительных, существенное значение имеют вопросы их энергетической и структурно-геометрической оптимизации. Критерии и принципы оптимизации подробно рассмотрены в гл. 2 и 3.

1.2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Ни один тип ЭФН не является универсальным средством высоковакуумной откачки. В каждом конкретном случае их применения необходимы детальный анализ эксплуатационных условий и сопоставление характеристик насосов различных типов.

Важная особенность ЭФН — селективность откачки. Речь идет не только о принципиальном различии механизмов поглощения активных и инертных газов, результатом которого является практическая неспособность большинства ЭФН длительно и устойчиво откачивать гелий, аргон и другие инертные газы. Почти столь же широкий диапазон значений коэффициента захвата — от несколько сотых до единицы — характерен и для откачки различных активных газов. Это связано как со свойства-

ми собственно геттерных пленок (табл. 1.3), так и с конструктивно-физическими формами реализации этих свойств (табл. 1.4).

Одной из важнейших физических характеристик процессов сорбционного взаимодействия газ—твердое тело, определяемых состоянием электронных оболочек сорбированных молекул и атомов кристаллической решетки геттера, являются термодинамические параметры, в частности теплота сорбции. Для их определения разработаны многочисленные модели. Экспериментально установлена, к примеру, линейная корреляция между теплотами сорбции различных газов на данном геттере. Для теплоты адсорбции $Q(M, Me)$ некоторой газовой молекулы M на металле Me справедливо соотношение

$$Q(M, Me) = C^0(M)Q^0(Me),$$

где $C^0(M)$, $Q^0(Me)$ — константы, зависящие соответственно только от рода газа и вида металла. Например, теплоты адсорбции кислорода Q_{O_2} и оксида углерода Q_{CO} связаны соотношением $Q_{O_2} = 1,8Q_{CO}$.

Таблица 1.3. Усредненные показатели скорости поглощения активных газов различными геттерными пленками (температура газа 293 К)

Газ	M, а. е. м.	Идеальная сорбирующая поверхность		Напыленная пленка титана				Цирконий-алюминиевый сплав			
				T = 77 К		T = 293 К		T = 293 К		T = 673 К	
		β_0	S_0	β_0	S_0	β_0	S_0	β_0	S_0	β_0	S_0
H ₂	2	1,0	440,3	0,22	96,7	0,05	22,0	0,03	13,2	0,03	13,2
D ₂	4	1,0	311,4	0,14	43,5	0,02	6,2	0,02	6,23	0,02	6,23
T ₂	6	1,0	254,2	0,09	22,8	0,01	2,5	0,01	2,54	0,01	2,54
CH ₄	16	1,0	155,7	0,05	7,8	0,001	0,16	—	—	—	—
N ₂	28	1,0	117,7	0,58	68,3	0,35	41,2	0,1	11,8	0,1	11,8
CO	28	1,0	117,7	0,95	111,8	0,88	103,6	0,1	11,8	0,1	11,8
O ₂	32	1,0	110,1	0,98	107,9	0,95	104,6	—	—	—	—
CO ₂	44	1,0	93,9	0,98	92,02	0,95	89,2	0,1	9,4	0,1	9,4

Таблица 1.4. Коэффициенты захвата ЭФН различных типов при температуре 293 К

Газ	Геттерные модули (см. § 6.2)	ГН с резистивным нагревом проволоки	Плазменные дуговые насосы	МЭРН диодного типа	Комбинированные ИГН
H ₂	0,13	0,2—0,23	0,2—0,25	$(0,5 \div 1) \cdot 10^{-1}$	0,17—0,23
N ₂	0,24	0,42—0,45	0,5—0,6	0,12—0,2	0,22—0,42

Абсолютные значения теплоты сорбции газов на пленках вольфрама при $T = 293$ К составляют, кДж/моль: 192 (водород), 418 (оксид углерода), 355 (азот), 811 (кислород), 460 (диоксид углерода), 8,4 (аргон), 17 (криптон), 21 (ксенон).

Характеризуя свойства различных геттеров, ограничимся пока начальными коэффициентами прилипания β_0 , т. е. коэффициентами прилипания при очень малой степени заполнения поверхности молекулами откачиваемого газа, и их удельной быстротой действия S_0 в тех же условиях. При этом

$$S_0 = \beta_0 V_0, \quad (1.1)$$

где $V_0 = 36,38 (T/M)^{0,5} \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ — объем газа с молекулярной массой M , а. е. м., падающего за 1 с на единицу поверхности в условиях термодинамического равновесия газа со стенками при температуре T , К.

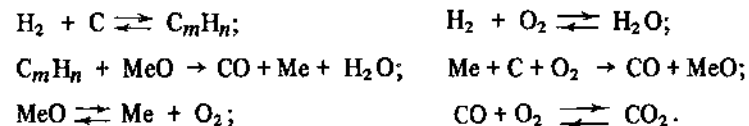
Для обобщенного описания параметров ЭФН будем использовать коэффициент захвата Γ , определяемый соотношением

$$\Gamma = S_{0н} / V_0 F_{0н}, \quad (1.2)$$

где $S_{0н}$ — номинальная быстрота действия насоса; $F_{0н}$ — площадь его входного сечения.

Необходимо подчеркнуть, что приведенные в табл. 1.3 и 1.4 значения β_0 , S_0 и Γ следует рассматривать лишь как ориентировочные. Свойства геттерных пленок сильно зависят от условий их напыления и даже незначительных примесей кислорода и оксида углерода в откачиваемом газе. Кроме того, данные разных авторов заметно расходятся из-за различия используемых методов измерений. Относительные значения $S_{0н}$ по индивидуальным газам, рассчитанные по данным табл. 1.3, могут также несколько отличаться от аналогичных значений, приводимых в последующих главах для реальных ЭФН, из-за влияния газокинетической проводимости входных патрубков.

Общим свойством ЭФН является инициирование и ускорение химических и плазмохимических реакций газ-геттер в результате каталитического влияния геттерных и горячих поверхностей, потоков заряженных частиц и фотонов. Наиболее неприятный результат этих процессов — синтез углеводородов и водяных паров; они особенно интенсивны в ЭФН, в которых возбуждается газоразрядная плазма. К важнейшим относятся реакции:



Они оказывают непосредственное влияние на формирование спектра масс остаточной газовой среды. На генезис и итоговый баланс углеводородных молекул, как видно, весьма существенно влияют водяные пары, в том числе синтезируемые в процессе работы ЭФН.

Синтез водяных паров идет с наибольшей скоростью в стартовом режиме насоса при прохождении диапазона давлений $1-10^1$ Па; парциальное давление паров в этом интервале возрастает на 1-2 порядка по сравнению с начальным и последующим уровнями. Общее количество синтезируемых водяных паров можно заметно уменьшить, сокращая продолжительность стартового режима. Для этого параллельно ЭФН необходимо подключать вспомогательный высокопроизводительный насос. Полезен также прогрев до температуры ~ 350 К, даже кратковременный.

Вопросы синтеза углеводородных молекул, в частности метана, более подробно обсуждаются в § 1.4.

Для быстрой откачки от давлений выше $5 \cdot 10^2$ Па при работе с частым напуском атмосферного воздуха и при продолжительной откачке газовых сред со значительным содержанием углеводородов предпочтение следует отдавать испарительным насосам. Особенно устойчиво в таких режимах работают ЭФН с плазменными источниками геттерных пленок. При работе без напуска атмосферного воздуха и давлениях ниже 10^{-6} Па лучшие результаты достигаются с помощью МЭРН; они же более эффективны и при откачке метана в диапазоне давлений $10^{-9} - 10^{-10}$ Па. При равных габаритах орбитроны по сравнению с МЭРН имеют большее значение быстроты действия по активным газам и меньшее — по инертным. Для эвакуации замкнутых систем без напуска инертных газов соотношение быстрот действия используемых ЭФН по азоту и аргону должно составлять около 100 : 1.

При очень низких давлениях (менее 10^{-6} Па) состав остаточной газовой среды в системах, откачиваемых ЭФН, определяют водород, метан и аргон; при давлениях ниже 10^{-6} Па метан превалирует.

При включении ЭФН с расходуемым рабочим телом, прежде всего испарительных, выделяются сравнительно большие количества газов, в особенности водорода, растворенных в геттере. Поэтому для испарительных насосов, работающих в сверхвысоковакуумных системах, следует подбирать высокочистые геттеры. Чтобы предотвратить запыление геттерным веществом элементов вакуумных систем, откачиваемых испарительными и в меньшей степени разрядными насосами, необходимо их "оптическое" экранирование.

Интересное и, пожалуй, уникальное для средств откачки свойство МЭРН — пропорциональность тока разряда молекулярной концентрации откачиваемого газа. Это позволяет использовать МЭРН как индикаторы, а при периодической градуировке и постоянстве рода газа и как измерители полного остаточного давления.

В разрядных насосах, работающих при относительно высоких электрических напряжениях (обычно десятки киловольт), газовые ионы приобретают значительную кинетическую энергию; глубина их внедрения в геттер достигает сотни нанометров. В процессе дальнейшей эксплуатации из-за распыления катодных электродов слой геттера, насыщенный имплантированными газовыми атомами, обнажается и начинается их длительная ремиссия. Поэтому все модификации разрядных насосов обладают "памятью" к откачиваемым газам; при их включении формируется остаточная газовая среда, отражающая эксплуатационную предьсторию этих насосов. По этой причине в вакуумных системах аналитического оборудования, например в масс-спектрометрах, разрядные насосы применяются сравнительно редко. Заметная "память" характерна и для испарительных насосов.

Все ЭФН с обновляемыми геттерными пленками обладают *последствием*, т. е. сохраняют сорбционную активность в течение некоторого времени после выключения. В сверхвысоком вакууме и при малых газовых нагрузках эффект последствия ощутим в течение многих десятков часов. Это необходимо учитывать при формировании и измерениях малых газовых потоков в системах с активными сорбирующими поверхностями.

Таблица 1 5 Физические характеристики некоторых геттерных металлов

Характеристика	Титан	Цирконий	Молибден	Тантал	Вольфрам
Атомный номер	22	40	42	73	74
Атомная масса, а. е. м.	47,90	91,22	95,94	180,95	183,85
Плотность, г/см ³	4,5	6,5	10,2	16,6	19,4
Температура плавления, К	1940	2128	2895	3270	3650
Температура, К, соответствующая давлению пара, Па:					
1,33 · 10 ⁻¹	1850	2450	2650	3080	3250
1,33 · 10 ⁻⁵	1410	1855	1970	2370	2520
1,33 · 10 ⁻⁸	1200	1580	1655	2020	2150

Таблица 1 6. Предельное массовое содержание, %, примесных элементов в технически чистом титане отечественного производства

Марка титана	Fe	C	H	N	O
BT-1-00	0,12	0,05	0,008	0,04	0,10
BT-1-0	0,18	0,07	0,010	0,04	0,12
BT-1-1	0,25	0,08	0,012	0,05	0,15

Таблица 1 7. Эксплуатационные особенности ЭФН различных типов

Тип ЭФН	Достоинства	Недост. т.к.	Рекомендуемые области применения
Магнитные электро-разрядные	Широкий диапазон рабочих давлений	Значительная селективность при откачке различных газов	Высоко- и сверхвысоковакуумное технологическое оборудование и исследовательские установки с редким напуском атмосферного воздуха и малыми газовыми нагрузками
	Способность откачивать все газы	Чувствительность к углеводородным загрязнениям	
Термовакуумные	Отсутствие органических загрязнений откачиваемой системы	Малая устойчивость в области повышенных давлений и при длительной откачке инертных газов	Высокая удельная стоимость
	Большой ресурс при давлениях ниже 10 ⁻⁴ Па	Эффект "памяти"	
Ионно-вакуумные	Устойчивость к вибрации, ударам, низким и повышенным температурам, радиации, авариям с электропитанием, внешнему попаданию атмосферного воздуха	Большая длительность "выхода в режим" после напуска атмосферного воздуха	Высокая удельная стоимость
	Малая и саморегулируемая потребляемая мощность	Вылет из насоса паров геттера	
Сверхвысоковакуумные	Возможность контроля давления по разрядному току	Наличие магнитных полей рас-сеяния, вторичной электронной эмиссии, высокого напряжения	Высокая удельная стоимость
	Совместимость с системами автоматизированного управления	Плохие массогабаритные характеристики	
Сверхвысоковакуумные	Простота обслуживания		
Сверхвысоковакуумные	Ремонтопригодность		

Таблица 1.7 (продолжение)

Тип ЭФН	Достоинства	Недостатки	Рекомендуемые области применения
Испарительные геттерные и ионно-геттерные	Широкий диапазон рабочих давлений Практически неограниченные быстрога действия и производительность по активным газам Устойчивость к импульсным газовым нагрузкам Быстрый "выход в режим" после запуска атмосферного воздуха Устойчивость к повышенной температуре, радиации, аварийному снятию напряжения Совместимость с системой автоматизированного управления Ремонтпригодность Хорошие массогабаритные характеристики Низкая удельная стоимость	Значительная селективность Несоблюдность откачивать инертные газы (кроме ИГН) и отраженный ресурс Чувствительность к аварийному попаданию атмосферного воздуха Синтез метана Необходимость систематической очистки от пленок геттера Вылет из насоса паров геттера Чувствительность к внешним магнитным полям	Технологическое оборудование и исследовательские установки с частым напуском атмосферного воздуха и повышенными газовыми нагрузками Встроенные системы откачки

Таблица 1.7 (продолжение)

Тип ЭФН	Достоинства	Недостатки	Рекомендуемые области применения
На основе нераспыляемого ленточного геттера	Широкий диапазон рабочих давлений Практически неограниченные быстрога действия и производительность по активным газам Устойчивость к импульсным газовым нагрузкам Устойчивость к вибрации, ударам, высоким температурам, радиации, аварийному снятию напряжения, внезапному падению атмосферного воздуха Совместимость с системами автоматизированного управления Хорошие массогабаритные характеристики	Селективность Несоблюдность откачивать инертные газы Необходимость периодической регенерации Ограниченный ресурс	Технологическое оборудование и исследовательские установки с очень периодического действия с очень большим напуском активных газов Встроенные системы откачки установок со значительным энерговыделением

В качестве геттера в ЭФН используются титан, цирконий, тантал, некоторые другие металлы и сплавы (табл. 1.5). Наиболее широкое распространение в современных промышленных ЭФН получил титан. Он обладает хорошими сорбционными характеристиками, имеет значительную скорость испарения на единицу потребляемой мощности, технологичен, сравнительно дешев. Развитая металлургия позволяет получать металл высокой чистоты и разнообразного сортамента. В отечественных промышленных насосах применяют технически чистый титан марки ВТ (табл. 1.6), иодидный титан и разработанную специально для испарителей титан-молибденовую проволоку. В специализированных насосах в качестве геттера используются также редкоземельные элементы и некоторые сплавы.

Сравнительные характеристики ЭФН различных типов приведены в табл. 1.7.

1.3. КИНЕТИКА СОРБЦИИ ГАЗОВ НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ГЕТТЕРНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Сорбция газа металлической пленкой представляет собой одну из стадий единого адсорбционно-диффузионного взаимодействия в системе разреженный газ-поверхность-металл. Процесс установления динамического равновесия между газовой фазой, адсорбатом и газом, растворенным в пленке, описывается:

уравнением откачки газа из камеры

$$Vdp/dt = (q_{т.д} - q_a)F - Sp; \quad (1.3a)$$

балансом газового потока на поверхности пленки

$$dN/dt = q_a + q_{диф} - q_{т.д}; \quad (1.3б)$$

уравнением диффузии газа в пленке

$$\nabla^2 C = (1/D)dC/dt. \quad (1.3в)$$

В системе (1.3a) – (1.3в) V , F , S , p – соответственно объем камеры, площадь пленки, быстрота откачки камеры внешним вакуумным насосом и давление газа; $q_{т.д} = kN^\xi \exp(-E_{т.д}/R_0T)$ – скорость потока тепловой десорбции; $q_a = 10^3 p\beta(N)/(MT_r)^{0,5}$ – скорость адсорбции газа пленкой, N – плотность адсорбированных атомов; $q_{диф} = -D \text{grad} C|_s$ – скорость диффузии газа в пленке; $\beta(N)$ – коэффициент прилипания падающих молекул; T – температура пленки; $\text{grad} C|_s$ – градиент концентрации газа на поверхности пленки; $E_{т.д}$, k , ξ – энергия активации и константы тепловой десорбции; T_r – температура газа.

Скорость установления равновесия между газовой и адсорбированной фазами при изменении p , T_r или других внешних условий намного

больше скорости аналогичного выравнивания концентраций адсорбированных атомов и атомов газа, диффундирующих к поверхности из пленки. Поэтому при описании кинетики диффузионного переноса атомов газа в пленке переходными процессами на поверхности и в камере можно пренебречь. При медленных изменениях внешних условий это позволяет положить $dp/dt = 0$ и $dN/dt = 0$. При быстрых изменениях условий производные велики, однако само влияние изменений на течение диффузионного процесса крайне незначительно ввиду их кратковременности. Соответственно уравнения (1.3a) и (1.3б) примут вид

$$(q_{т.д} - q_a)F = Sp; \quad (1.4a)$$

$$q_a + q_{диф} - q_{т.д} = 0. \quad (1.4б)$$

По этой же причине ход диффузионного процесса будет определяться не изменением плотности адсорбированных атомов $N(t)$, а концентрацией атомов газа в приповерхностном слое кристаллической решетки $C(0, t)$. Эти величины связаны экспоненциальным множителем

$$[N(t)/N_0] \exp(-\Delta E/R_0T) = C(0, t)/C_0, \quad (1.5)$$

где N_0 – плотность адсорбированных атомов в мономолекулярном слое; ΔE – разность потенциальных энергий адсорбированного атома и атома газа в кристаллической решетке; C_0 – константа растворимости газа в металле или его концентрация в химическом соединении с металлом.

В исходную систему уравнений (1.3a) – (1.3в) входит $\beta(N)$ – статистически детерминированный коэффициент прилипания падающих молекул. В дальнейшем для описания его зависимости от коэффициента заполнения поверхности адсорбированными атомами $\eta = N/N_0$ будем использовать линейную аппроксимацию вида

$$\beta(N) = \begin{cases} \beta_0, & N/N_0 \leq \eta_{кр}, \\ \beta_0(1 - \eta), & N/N_0 > \eta_{кр}. \end{cases} \quad (1.6a)$$

$$\beta(N) = \begin{cases} \beta_0, & N/N_0 \leq \eta_{кр}, \\ \beta_0(1 - \eta), & N/N_0 > \eta_{кр}. \end{cases} \quad (1.6б)$$

Здесь β_0 – начальный коэффициент прилипания. Такая аппроксимация с хорошим приближением описывает экспериментально наблюдаемые зависимости. На чистых поверхностях при коэффициентах заполнения, меньших некоторого критического $\eta_{кр}$, коэффициент прилипания постоянен и для разных пар газ-металл находится в пределах 0,05–0,5; $\eta_{кр} \approx 0,2 \div 0,4$. В дальнейшем β монотонно убывает; при коэффициенте заполнения, близком к единице, $\beta = 10^{-5} \div 10^{-3}$.

Соотношения (1.4) и (1.5) дают граничные условия к диффузионному уравнению (1.3в). Необходимые для его решения константы могут быть получены из экспериментальных кинетических кривых сорбции $S_0 = f(t)$ при $p = \text{const}$ или эквивалентных кривых $S_0 = f(N)$ при $p = \text{const}$.

Типовая кинетическая кривая содержит два участка — линейный и параболический. На линейном участке скорость сорбции практически не зависит от времени, в среднем пропорциональна давлению и медленно возрастает с температурой. Кинетическая кривая такого рода характерна, например, для поглощения кислорода пленками бария. При переходе на параболический участок скорость сорбции начинает падать примерно как $t^{-0,5}$ и слабо зависит от давления. Так сорбируется, к примеру, водород. Используем высказанные ранее соображения для объяснения подобных кинетических кривых.

Пусть геттерная пленка толщиной δ помещена в камеру, в которой поддерживается постоянное давление; начальная концентрация газа в пленке равна нулю. Перепишем выражение для скорости потока тепловой десорбции в виде

$$q_{T,д} = kN_0^{\xi}(N/N_0)^{\xi} \exp(-E_{T,д}/R_0T) = \epsilon kN_0^{\xi}(N/N_0)^{\xi} \exp(-E_{T,д}/R_0T). \quad (1.7)$$

Здесь ϵ зависит от ξ : для $\xi = 1$ коэффициент $\epsilon = 1$, а для $\xi = 2$ он определяется из условия наилучшей аппроксимации отрезка параболы прямой линией при изменении концентрации адсорбированных атомов от N_1 до N_2 . Из соотношений (1.4) — (1.7) на границе пленка — разреженный газ получаем

$$-\partial C/\partial x|_0 + hC(0, t) = bh, \quad (1.8)$$

где h — коэффициент газообмена. При $N/N_0 \leq \eta_{кр}$

$$h = h_1 = A/(C_0D); \quad b = b_1 = S_0pC_0/A, \quad (1.9a)$$

а при $N/N_0 > \eta_{кр}$

$$\left. \begin{aligned} h = h_2 &= [S_0p \exp(\Delta E/R_0T) + A]/(C_0D); \\ b = b_2 &= S_0pC_0/[S_0p \exp(\Delta E/R_0T) + A]. \end{aligned} \right\} \quad (1.9b)$$

Здесь $S_0 = 10^3 \beta_0/(MT_T)^{0,5}$; величиной $A = \epsilon kN_0^{\xi} \exp\{-(E_{T,д} + \Delta E)/R_0T\}$ учитывается поток тепловой десорбции. Условие (1.9a) соответствует линейному ($t \leq t_1$), а (1.9b) — параболическому ($t > t_1$) участкам кинетической кривой сорбции; $N(t_1)/N_0 = \eta_{кр}$.

Рассмотрим теперь условия на противоположной стороне пленки. Газовый поток здесь отсутствует; $\partial C/\partial x|_{\delta} = 0$. Решение диффузионного уравнения для этих условий дает

$$q = bhD \sum_1^{\infty} 2h \exp(-\alpha_n^2 Dt) / [(h^2 + \alpha_n^2)\delta + h], \quad (1.10)$$

где α_n — последовательные корни уравнения $atg(\alpha\delta) = h$.

Постоянство S_0 на начальном (линейном) участке кинетической кривой эквивалентно малости десорбционного потока из пленки. Вследствие этого слагаемым A в формулах (1.9б) можно пренебречь, а граничное условие (1.8) заменить условием постоянства газового потока на границе газ—пленка:

$$\partial C/\partial x|_0 = -S_0p/D. \quad (1.11)$$

Плотность поглощаемого пленкой газового потока, как и следовало ожидать, выразится тогда тривиальным соотношением

$$q = S_0p. \quad (1.12)$$

Для определения координаты t_1 , соответствующей границе линейного участка кинетической кривой, соотношение (1.5) необходимо переписать в виде

$$C(0, t_1)/C_0 = [N(t_1)/N_0] \exp(-\Delta E/R_0T)$$

и подставить сюда решение диффузионного уравнения с граничным условием (1.11).

Если диффузионная длина меньше толщины пленки ($\sqrt{Dt_1} \leq 0,2\delta$), то сорбция носит поверхностный характер. В этом случае

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= (2/\sqrt{\pi})S_0p\sqrt{t/D}; \\ t_1 &= \frac{\pi}{4} \eta_{кр}^2 \frac{C_0^2 D \exp(-2\Delta E/R_0T)}{(S_0p)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Для объемной сорбции ($\sqrt{Dt_1} > 0,45\delta$)

$$C(0, t) = \frac{S_0pt}{\delta} + \frac{S_0p\delta}{D} \left[\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \times \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 Dt}{\delta^2}\right) \right]; \quad (1.14a)$$

$$t_1 \approx \eta_{кр} \delta \frac{C_0 \exp(-\Delta E/R_0T)}{S_0p} - \frac{\delta^2}{3D}. \quad (1.14b)$$

Перейдем теперь к конечному участку кривой сорбции ($t > t_1$). Для поверхностной сорбции вычисление ряда в (1.10) дает

$$q = S_0p \Psi \left[\frac{S_0p(t - t_1)^{0,5}}{C_0D^{0,5} \exp(-\Delta E/R_0T)} \right], \quad (1.15)$$

где

$$\Psi(z) = \exp(z^2) (1 - \operatorname{erf} z).$$

Анализируя временное поведение этой функции, можно видеть, что при достаточно большом t она переходит в уравнение параболы: при $z > 3$ $\Psi(z) \approx (z \sqrt{\pi})^{-1}$ и

$$q = C_0 \exp(-\Delta E/R_0 T) D^{0.5} / \sqrt{\pi(t-t_1)}.$$

Для объемной сорбции можно ограничиться только первым членом ряда в (1.14а). Тогда

$$q = S_0 p \frac{2h \exp[-\alpha^2 D(t-t_1)]}{(h^2 + \alpha^2) \delta + h}, \quad (1.16)$$

где $h = S_0 p / C_0 D \exp(-\Delta E/R_0 T)$; $\alpha \operatorname{tg}(\alpha \delta) = h$.

Численное решение полученных уравнений и сравнение результатов с экспериментальными данными показывают, что изложенная адсорбционно-диффузионная модель дает вполне адекватную интерпретацию кинетики сорбции водорода и других газов геттерными пленками*.

Продлав сходную аналитическую обработку имеющейся экспериментальной информации для различных систем газ-геттерная пленка, можно определить коэффициенты диффузии и прилипания, растворимость и другие константы, а также их зависимость от температуры и давления.

Коэффициент β_0 определяется по начальной скорости откачки. Наклон параболического участка кинетической кривой позволяет вычислить аргумент функции Ψ в соотношении (1.15) или показатель экспоненты в соотношении (1.16); временные границы линейного участка кривой дают еще одну комбинацию постоянных. Условие перехода от поверхностной сорбции к объемной

$$0,05\delta^2 \leq Dt_1 \leq 0,2\delta^2 \quad (1.17)$$

позволяет оценить коэффициент диффузии. Такой анализ выявляет, в частности, слабую зависимость коэффициента прилипания от давления,

* Здесь уместно отметить попутно обстоятельство, выходящее за рамки собственно геттерирования газов и представляющее более общий практический интерес. Кинетика давления газа в камере, степень заполнения поверхности адсорбатором, потоки тепловой десорбции со стенок и другие газокинетические характеристики, как видно из (1.3а) – (1.3в), отражают всю совокупность адсорбционно-диффузионных процессов в вакуумной системе. В той или иной степени они чувствительны к любым изменениям температуры, состояния поверхности и других внешних параметров. При быстрых изменениях параметров новое равновесное состояние устанавливается с некоторой конечной скоростью, возможно, и меньшей скорости самих изменений. Стенка камеры, к примеру, в зависимости от направленности происходящей эволюции параметров в переходном состоянии может быть как интенсивным источником газовой выделению, так и достаточно емким стоком газа. Это обстоятельство не должно игнорироваться при вакуумных измерениях в импульсных режимах, анализе быстропотекающих газодинамических и электрофизических процессов, особенно в области сверхнизких давлений.

Таблица 1.8. Газодиффузионные характеристики титана

Характеристика	Ti-H ₂	Ti-CO
T, К	450–1100	650–1200
p, Па	$1,3 \cdot 10^{-4} - 133$	$6,7 \cdot 10^{-4} - 66,5$
$q_0 = 1333 S_0 p, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{см}^2$	$4,69 \cdot 10^{-2} p^{0,7} \exp\left(-\frac{1000}{T}\right)$	$520,8 p^{0,7} \exp\left(-\frac{6400}{T}\right)$
$T_{кр}, \text{ К}$	$\frac{2690}{5,03 - 2 \lg \delta}$	$\frac{16500}{11,37 - 2 \lg \delta - 1,4 \lg p}$
$q, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$1333 q_0 \Psi \left[1,84 \cdot 10^{-2} p^{0,2} \times \exp\left(-\frac{2785}{T}\right) \sqrt{t-t_1} \right]$	$1333 q_0 \Psi \left[1,35 \cdot 10^{-3} p^{0,7} \times \exp\left(-\frac{6900}{T}\right) \sqrt{t-t_1} \right]$
$T < T_{кр}$	$t_1, \text{ с} < 60$	$3,4 \cdot 10^7 p^{-1,4} \exp\left(-\frac{18000}{T}\right)$

Таблица 1.8 (продолжение)

Характеристика	Ti-H ₂		Ti-CO	
	q, м ³ · Па/(с · м ²)	1333q ₀ exp[-α ² D(t - t ₁)]		
t ₁ , с	< 60			
T > T _{кр}	10 ² атг(αβ)	13,79p ^{0,2} exp(- $\frac{615}{T}$)	0,68p ^{0,7} exp(- $\frac{16500}{T}$)	
D, м ² /с		1,8 · 10 ⁻⁶ exp(- $\frac{6200}{T}$)	4 · 10 ⁻⁶ exp(- $\frac{19250}{T}$)	
β ₀		1,3 · 10 ⁻⁴ p ^{-0,3} exp(- $\frac{1000}{T}$)	5,64p ^{-0,3} exp(- $\frac{6400}{T}$)	
ΔE, Дж/моль	7231,4			30 096
C ₀ , м ³ · Па/м ³	1893p ^{0,5} exp(- $\frac{5450}{T}$)			1400

связанную с множественностью адсорбированных состояний с разной энергией связи. Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется функцией $\beta_0 \sim p^n$, где n меняется для различных пар газ-металл в пределах от -0,25 до -0,33. Полученные газодиффузионные константы и расчетные формулы для скорости сорбции сведены в табл. 1.8.

Рассмотрим теперь на примере геттерных пленок и массивных образцов из титана особенности поглощения различных газов.

1.4. СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ТИТАНОВЫХ ПЛЕНОК

Геттерные свойства металлов существенно зависят от температуры и способа формирования сорбирующих пленок. Рассмотрим вначале сорбционные характеристики массивного образца титана и заранее сформированных титановых пленок в области средних и высоких температур (см. также табл. 1.8-1.10; рис. 1.2, 1.4-1.7).

Водород. Для ленты толщиной 40 мкм при температуре 473 К характерна поверхностная сорбция водорода, при $T = 573$ К сорбция имеет уже явно выраженный объемный характер. Температурная зависимость коэффициента прилипания немонотонная: ниже 400 К β_0 растет с уменьшением температуры. Временная протяженность линейного участка кинетической кривой сорбции t_1 около 60 с; критическая степень заполнения поверхности адсорбатом $\eta_{кр} \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Откачка водорода приводит к синтезу метана в результате каталитической реакции с содержащимся в титане углеродом. Его источниками являются как свободный углерод, растворенный в пленке, так и поглощенный ранее его оксид (см. ниже). Связь между парциальным содержанием водорода и метана выражается эмпирической зависимостью

$$p_{CH_4} = 9,87 \cdot 10^{-6} p_{H_2}^2 \cdot 10^{a + 3610/T - 2,68 \lg T}, \quad (1.18)$$

где

$$a = 404,5 p_{H_2}^{0,77} - 0,53(3,26 + \ln p_{H_2}) - 3,62 \cdot 10^{-6} p_{H_2}^{-0,7}$$

и давление выражено в Па. Коэффициентом a учитывается влияние промежуточных химических и плазмохимических реакций, ведущих к синтезу метана. Скорость синтеза минимальна, если температура испарителя поддерживается в интервале 1350-1400 К.

Оксид и диоксид углерода, азот. Сорбции оксида и диоксида углерода титановыми пластинами протекают с образованием на поверхности карбида и оксидов титана. При толщине пластин 0,5-1 мм сорбция носит поверхностный характер до температуры 1000 К, растворимость не зависит от давления, $t_1 \sim p^{-1,4}$.

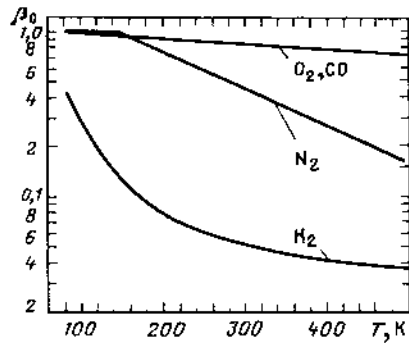


Рис. 1.2. Начальный коэффициент прилипания активных газов для титановой пленки в зависимости от ее температуры

Высокотемпературная сорбция азота сопровождается образованием нитридов.

Важнейшая особенность сорбции в низкотемпературной области — исчезающе низкая скорость диффузии для всех газов, кроме водорода.

Поэтому сорбционные характеристики определяются практически только адсорбционными эффектами; кинетические уравнения сорбции, приведенные в предыдущем параграфе, применимы лишь для водорода. Оптимальная толщина титановой пленки 10–100 монослоев. Дальнейшее увеличение толщины бесполезно и в расчете на единицу массы геттера приводит к падению сорбционной емкости. В температурном интервале 300–500 К коэффициенты прилипания газа для массивных образцов и титановых пленок совпадают, если принять коэффициент шероховатости пленки равным 10–15.

Обратимся к конкретным газам (рис. 1.2).

Водород. Коэффициент диффузии при уменьшении температуры от 300 до 220 К падает с $2 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-15} $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; соответствующие диффузионные длины за 1 ч составляют $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ см, так что диффузионный перенос заметен и в низкотемпературной области. Сорбционная емкость при температурах вблизи 200 К достигает $(1 \div 10) \times 10^{17}$ см^{-2} ; только при $T = 150$ К и менее она снижается до значения $(1 \div 5) \cdot 10^{15}$ см^{-2} , типичного для чисто поверхностной сорбции. В области криогенных температур наблюдается очень быстрый рост β_0 , который связан с переходом к бездиссоциативной сорбции и с уменьшением тепловой десорбции.

В насосах с периодическим напылением пленок, работающих при $T = 300$ К, начальное значение β_0 на вновь формируемых слоях постепенно снижается. При охлаждении сорбирующей поверхности жидким азотом подобный эффект не обнаружен. Он объясняется диффузией ранее поглощенного водорода в напыляемые слои и его десорбцией. Это явление можно предотвратить, напыляя толстые слои геттера или покрывая ранее напыленный слой тонкой пленкой металла с малым коэффициентом диффузии, например никеля или меди.

Особого упоминания заслуживает эффект взаимной дискриминации при одновременном поглощении нескольких газов с различной энергией сорбции. Газы, обычно встречающиеся в вакуумных системах, можно расположить в ряд, отражающий рост энергии сорбции: инерт-

ные газы — метан — водород — азот — оксид углерода — диоксид углерода — кислород. Начиная с водорода, каждый последующий газ в этом ряду даже в малых количествах вызывает десорбцию предыдущих и блокирует их дальнейшую сорбцию. К примеру, примесь в потоке водорода всего 1% азота заметно снижает коэффициент прилипания водорода; при образовании на пленке монослоя молекул азота сорбция водорода прекращается полностью. Метан и инертные газы такого влияния не оказывают.

Равновесное давление метана, синтезируемого при откачке водорода, в температурном интервале 200–150 К падает с 10^{-6} до 10^{-11} Па. Метан почти не сорбируется геттером; начальный коэффициент прилипания при температурах 300 и 77 К близок соответственно к 4×10^{-4} и $5 \cdot 10^{-3}$. Поглощенный при температуре 77 К метан полностью десорбируется при нагреве пленки до 130 К.

Азот, кислород, оксид углерода. Даже при комнатной температуре коэффициент диффузии этих газов крайне мал (около 10^{-28} $\text{см}^2/\text{с}$); диффузионная длина за 1 ч не превышает $5 \cdot 10^{-12}$ см. Сорбция носит чисто поверхностный характер; сорбционная емкость пленки составляет $(2 \div 5) \cdot 10^{15}$ см^{-2} (4–10 монослоев газа) и практически не меняется в температурном интервале 77–300 К. Диффузия азота в пленку при комнатной температуре возможна только по границам плотно упакованных кристаллитов.

Водяные пары. В температурной области 77–300 К пары воды сорбируются с высокой скоростью; поглощение молекулы воды сопровождается выделением молекулы водорода.

Инертные газы. Сорбция гелия и неона практически отсутствует даже при $T = 77$ К; для аргона сорбционная емкость пленки при $T = 150$ К составляет всего 10^{12} см^{-2} . Равновесное давление над пленкой равно 10^{-6} Па. Поглощенный газ полностью десорбируется при нагреве пленки.

Сорбционные характеристики пленок сильно зависят от температуры подложки, давления и состава среды при формировании геттерного слоя. Осаждение пленки на подложках, охлажденных до 77 К, заметно увеличивает скорость сорбции. Это связано с изменяющейся структурой формируемого геттерного слоя: при конденсации на холодной поверхности слой аморфизуется, тогда как при $T = 300$ К формируется слой с кристаллической структурой; площадь физической поверхности пленки, сконденсированной при $T = 77$ К, примерно на порядок выше. Распыление в среде чистого инертного газа также способствует росту начального коэффициента прилипания.

Остановимся на важном вопросе, связанном с влиянием микрорельефа геттерных пленок, напыляемых в различных условиях. Для количественных оценок удобно использовать коэффициенты шероховатости R (рис. 1.3). Располагая этими данными и сопоставляя площади реальной (физической) и проективной поверхностей пленки, можно найти

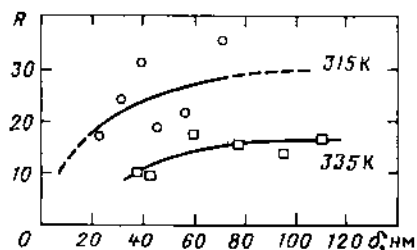


Рис. 1.3. Коэффициент шероховатости термически осажденных пленок титана в зависимости от их толщины δ

абсолютное значение коэффициента прилипания β' . Эта величина характеризует вероятность захвата падающей молекулы газа идеально гладкой геттерной пленкой для вы-

бранной пары газ–металл при данных условиях сорбции. Взаимосвязь между β , β' и R для термически осажденных пленок записывается соотношением

$$\beta = \frac{\beta'}{1 - (1 - \beta')(1 - R^{0,8})} \quad (1.19)$$

Приводя в соответствии с формулой (1.19) экспериментальные значения β при известных условиях напыления к β' и усредняя затем полученные разными авторами значения, можно заметно повысить точность измерений.

Плодотворность такого подхода иллюстрируется данными табл. 1.9.

Коэффициенты шероховатости R , использованные при расчете β'_0 , взяты из кривых, приведенных на рис. 1.3. Среднее значение $\beta'_0 = 2 \times 10^{-2}$ при разбросе 18%, что намного меньше погрешности измерений при непосредственном осреднении экспериментальных значений β_0 .

Толщина термически осаждаемых геттерных пленок обычно близка к 40 нм или превышает это значение. Для таких пленок в соответствии с рис. 1.3 $R = 26,5$. Наиболее вероятное значение начального коэффициента прилипания для азота, соответствующее $\beta'_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ и $R = 26,5$, составляет 0,22 (разброс 14%) при температуре пленки 300 К. Аналогичные измерения и пересчет для водорода при той же температуре пленки дают $\beta'_0 = 8,9 \cdot 10^{-4}$ и $\beta_0 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ (разброс 19%). Значения β_0 для титановых пленок, полученные по усредненным результатам опубликованных исследований, приведены в табл. 1.10; температура газа 300 К.

Таблица 1.9. Экспериментальные ($\beta_{0\text{эксп}}$) и расчетные абсолютные (β'_0) значения начальных коэффициентов прилипания азота на титановых пленках различной толщины при $T = 300$ К

$\beta_{0\text{эксп}}$	δ , нм	T_f , К	R	$\beta'_0, 10^{-2}$
0,12	6	296	9	2,3
0,12	17	296	15	1,5
0,25	75	283	28,4	2,2
0,22	60–100	296	28,6	1,9

Таблица 1.10 Начальные коэффициенты прилипания различных газов на термически осажденных титановых пленках

Температура пленки, К	H_2	D_2	T_2	N_2	CO	O_2	CO_2
300	0,05	0,015	0,012	0,22	0,9	0,9	0,44
80	0,22	0,08	0,07	0,7	1,0	1,0	1,0

Насыщение невозобновляемой пленки титана сорбируемым газом иллюстрируется рис. 1.4–1.7. При построении кривых на рис. 1.6, 1.7 принято, что плотность падающего на пленку молекулярного потока $q_{\text{пад}}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, отвечает равновесным условиям при температуре газа T_f и давлениях p , указанных на каждой кривой в соответствии с известным из молекулярно-кинетической теории соотношением $q_{\text{пад}} = 4,67 \times 10^{24} p (MT_f)^{-0,5}$.

Перейдем к характеристикам геттерных пленок в режиме непрерывного напыления. Для описания сорбционных свойств пленок здесь использованы эмпирические оценки, основанные на экспериментальных данных. Развитой теории, описывающей поглощение газов в этом режиме, пока нет.

На рис. 1.8, 1.9 приведены зависимости $\beta(q_{\text{пад}}/q_{\text{гет}})$ и $\tilde{\beta}(q_{\text{погл}}/q_{\text{гет}})$. Температура газа во всех случаях равна 300 К. Кривые на рис. 1.9 получены путем математической обработки экспериментальных зависимостей, приведенных на рис. 1.8. Аргументами при построении этих зависимостей являются относительная плотность падающего молекулярного потока

$$C_{\text{пад}} = q_{\text{пад}}/q_{\text{гет}} \quad (1.20a)$$

и относительная плотность поглощенного молекулярного потока

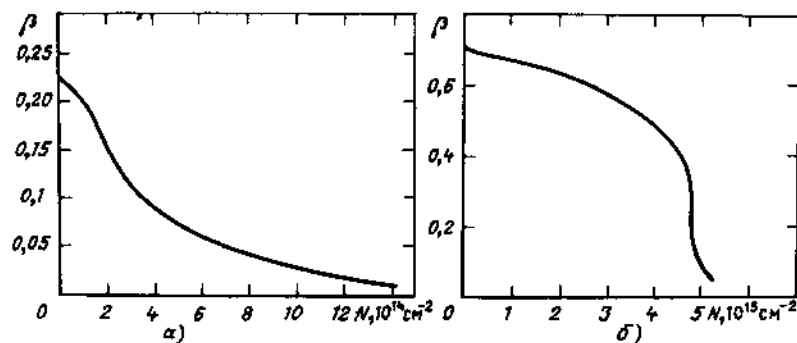


Рис. 1.4. Коэффициент прилипания азота для термически осажденной титановой пленки при температурах 295 К (а) и 83 К (б)

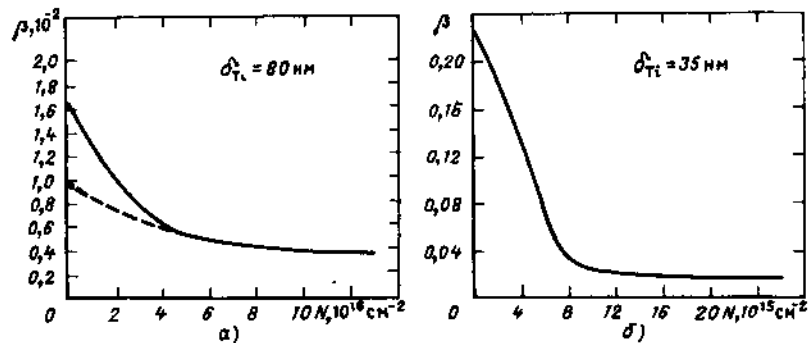


Рис. 1.5. Коэффициент прилипания водорода для термически осажденной титановой пленки при температурах 295 К (а) и 83 К (б)

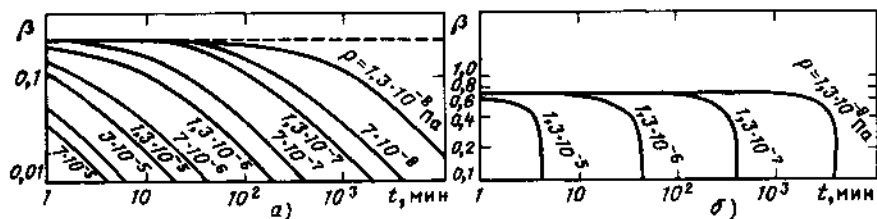


Рис. 1.6. Кинетические кривые сорбции азота термически осажденной титановой пленкой при температурах 295 К (а) и 83 К (б)

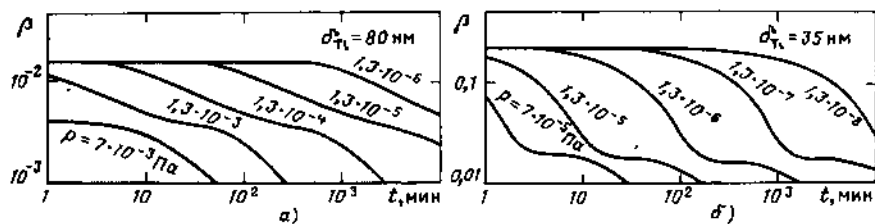


Рис. 1.7. Кинетические кривые сорбции водорода термически осажденной титановой пленкой при температурах 295 К (а) и 83 К (б)

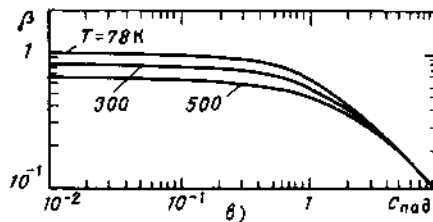
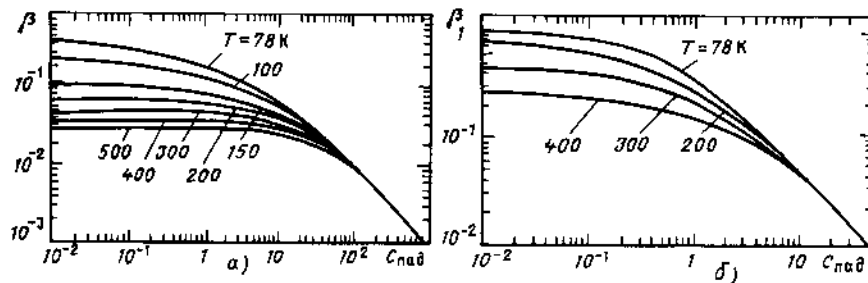


Рис. 1.8. Коэффициент прилипания водорода (а), азота (б), оксида углерода и кислорода (в) на непрерывно осаждаемой титановой пленке как функция относительной плотности падающих молекул газа и температуры подложки

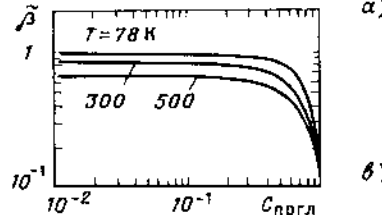
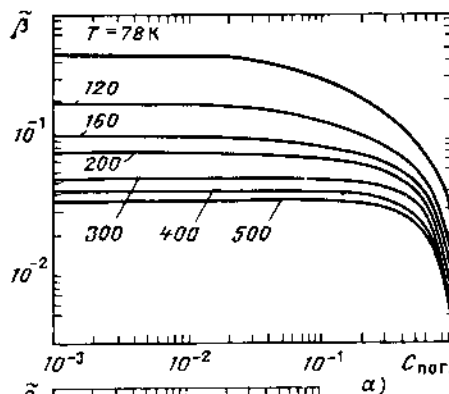


Рис. 1.9. Вероятность захвата падающих молекул водорода (а), азота (б), оксида углерода и кислорода (в) непрерывно осаждаемой титановой пленкой как функция относительной плотности поглощенных молекул газа и температуры подложки

$$C_{\text{погл}} = q_{\text{погл}}/q_{\text{гет}} = \beta q_{\text{пад}}/q_{\text{гет}} = \beta C_{\text{пад}}, \quad (1.206)$$

где $q_{\text{гет}}$ — плотность потока геттера. Зависимости $\tilde{\beta} = f(C_{\text{погл}})$ при различной температуре подложки T удобно выразить в аналитической форме, что упрощает их последующее использование при проектировании ЭФН. Аппроксимирующие функции для этих зависимостей в температурном интервале 78–500 К имеют вид:

для сорбции водорода

$$\tilde{\beta}_{\text{H}_2} = \frac{(1-k)(1-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*) \exp 2(1-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*)}{1+50 \exp(-290/T)} + \frac{k}{(1+C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*) \exp(1-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*)}, \quad (1.21)$$

где

$$k = 1 + 50 \exp(-290/T) [0,082 \exp(-1,66 \cdot 10^{-3} T)];$$

$$C_{\text{погл}}^* = 1;$$

для сорбции азота

$$\tilde{\beta}_{\text{N}_2} = \frac{(1-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*) \exp(0,8-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*)}{1+33 \exp(-950/T)}, \quad (1.22)$$

$$C_{\text{погл}}^* = 0,5;$$

для сорбции оксида углерода и кислорода

$$\tilde{\beta}_{\text{CO, O}_2} = \frac{(1-C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^*) \exp(C_{\text{погл}}/C_{\text{погл}}^* - 1,4)}{1+0,78 \exp(-360/T)}; \quad (1.23)$$

$$C_{\text{погл}}^* = 1.$$

Символу $C_{\text{погл}}^*$ в формулах (1.21) – (1.23) отвечает полное насыщение пленки сорбированным газом. Для водорода, оксида углерода и кислорода одному атому насыщенной напыленной пленки соответствует одна поглощенная молекула газа. На одну поглощенную молекулу азота в насыщенной пленке приходится два атома титана.

Вероятность захвата активных и инертных газов и сорбционная емкость геттерных пленок существенно возрастают при увеличении кинетической энергии поглощаемых молекул газа. Например, бомбардировка титановой пленки равнокомпонентной смесью ионизованных и нейтральных молекул азота с энергией ионной компоненты около 2 кэВ примерно вдвое увеличивает вероятность захвата. Наибольший эффект при откачке активных газов достигается бомбардировкой

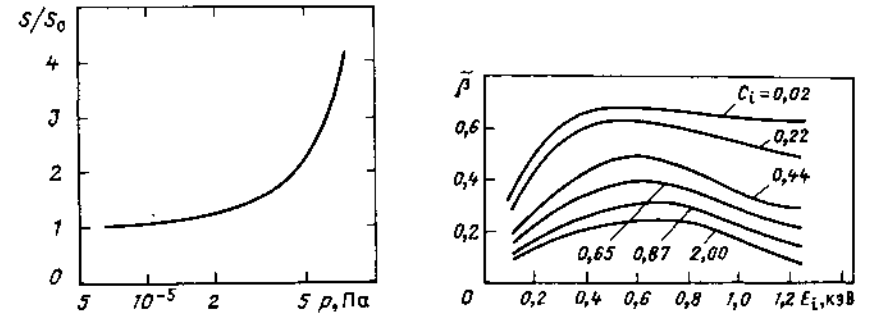


Рис. 1.10. Увеличение скорости действия ионно-сублимационного насоса по азоту при напуске балластного аргона в зависимости от его парциального давления

Рис. 1.11. Вероятность захвата ионов аргона непрерывно осаждаемой титановой пленкой при температуре 300 К в зависимости от энергии ионов при различном соотношении атомов аргона и титана

пленки ионами газа со средней атомной массой. Можно использовать, в частности, аргон. Опубликованные экспериментальные данные иллюстрируются рис. 1.10. Откачка велась при давлении азота около 10^{-5} Па; ускоряющее напряжение составляло 600 В.

Поглощение ионизованных инертных газов имеет некоторые особенности. Непрерывное заплытие поверхности атомами геттера позволяет, как видно из рис. 1.11, довести вероятность захвата ионов до 0,6. Оптимальная энергия ионов $E_i = 0,5 \div 0,7$ кэВ, оптимальное отношение плотностей потока ионов и потока напыляемых атомов близко к 0,2.

Глава 2

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ

2.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ НАСОСОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕЙСТВИЯ

ЭФН при всем многообразии протекающих в них физико-химических процессов как компоненты вакуумной системы принадлежат к одному классу откачных средств — насосам поверхностного действия. С этих позиций ЭФН и системы откачки на их основе представляют собой совокупность отражающих и сорбирующих молекулы газа по-

верхностей*, различным образом ориентированных по отношению к источнику откачиваемого газа. Подвергаясь воздействию существенно разных по интенсивности молекулярных потоков, сорбирующие поверхности, в свою очередь, далеко не одинаково поглощают эти потоки. Поэтому ЭФН как объект расчета и оптимального конструирования требуют для своего описания адекватной системы понятий и количественных характеристик. К ним относятся интегральные характеристики, такие, как *быстрота действия* (при откачке газа, находящегося в равновесном состоянии с изотропным распределением молекулярных скоростей), *коэффициент захвата* (КЗ) молекул, падающих на входное сечение насоса (при произвольном распределении скоростей молекул, в том числе при откачке газа, находящегося в неравновесных условиях, и при откачке направленных газовых потоков), *коэффициент обратного рассеяния* падающих молекул, вводимые ниже *структурно-геометрические* параметры, а также большая группа дифференциальных характеристик, относящихся как к откачиваемому газу, так и к рабочему телу насоса. К ним относятся пространственное распределение молекулярной концентрации, газовых и лучистых потоков во внутренней полости насоса, толщина геттерной пленки в различных зонах сорбирующих поверхностей, распределение потоков распыляемых атомов геттера и т. п. Эти понятия и характеристики должны быть пригодны для формулирования количественных требований к основным функциональным элементам ЭФН. Их использование должно также позволять сравнение технико-экономической эффективности насосов различных типов и модификаций.

Во многих установках и аппаратах применение ЭФН является наиболее рациональным, а иногда и единственно возможным способом получить требуемые вакуумные параметры. Площади сорбирующих поверхностей в некоторых действующих и сооружаемых образцах вакуумного оборудования уже сейчас достигают десятков квадратных метров; отчетливо прослеживается тенденция их дальнейшего роста. Важными элементами проектирования вакуумных систем по этой причине становятся обоснование критериев и структурно-геометрическая оптимизация ЭФН и систем откачки на их основе. Решение этой задачи также должно быть основано на указанной выше системе понятий и характеристик и на соответствующих методиках оптимизации.

Эта глава посвящена изложению общих принципов и методик расчета и оптимизации, пригодных для всех типов ЭФН как геометрических структур. Примеры расчета характеристик насосов конкретных типов, а также специальные методики расчета рассмотрены в следующих главах.

* Здесь и далее термином *сорбирующая поверхность* обозначается любая физическая поверхность, обладающая отличным от нуля коэффициентом прилипания для падающих молекул газа независимо от механизма их поглощения.

При построении упомянутых систем понятий и методик нет необходимости вдаваться в физические детали взаимодействия молекул газа с поверхностями ЭФН. Ограничимся поэтому простой обобщенной моделью такого взаимодействия, основанной на концепции *активных центров*. Под активным центром будем понимать микрообласть сорбирующей поверхности, доступную для падающих молекул. Взаимодействие молекул с активными центрами, приводящее к "нейтрализации" последних, будем описывать статистически детерминированными параметрами $\eta(\vec{r}, t)$ (вероятностью необратимого поглощения активным центром молекулы, попавшей в его силовое поле) и $\vartheta(\vec{r}, t)$ (вероятностью попадания молекулы в это силовое поле). Количественно поле активных центров будем характеризовать их поверхностной или объемной концентрацией $N_{a.ц}(\vec{r}, t)$ в малой области сорбирующей поверхности вокруг точки \vec{r} в момент t и плотностью потока нейтрализуемых активных центров в этой области $q_{a.ц}(\vec{r}, t)$.

Представление об активных центрах как обобщенной модели взаимодействия молекулы с сорбирующей поверхностью имеет прямые физические аналогии (табл. 2.1). В адсорбционных и имплантационных

Таблица 2.1. Параметры взаимодействия молекула-сорбирующая поверхность при различных механизмах поглощения газа

Механизм поглощения газа	Параметр элементарного акта взаимодействия	Физический аналог активных центров	η	ϑ	Факторы, регламентирующие параметры элементарных актов взаимодействия
Адсорбция	Коэффициент прилипания	Адсорбционные центры	1	β	Поверхностная концентрация адсорбата
Хемосорбция	Вероятность образования химической связи	Сорбционные центры	1	β	Объемная концентрация сорбата
Имплантация	Коэффициент внедрения	То же	μ	1	Концентрация внедренных частиц
Сорбция непрерывно возобновляемой пленкой геттера	κ^*	Напыляемые атомы геттера	κ^{-1}	κ^{-1}	Температура подложки; толщина геттерной пленки

* Число напыляемых атомов геттера, приходящихся на одну поглощенную молекулу газа, в полностью насыщаемой геттерной пленке.

насосах, работающих при комнатной температуре, активные центры формируются до начала откачки. В сорбционных насосах с рабочей температурой отличной от комнатной для формирования активных центров необходимы дополнительные энергетические затраты. В насосах, работающих в режиме непрерывного возобновления геттерной пленки, поток активных центров воспроизводится испарителем (распылителем). В процессе откачки активные центры нейтрализуются, теряя способность дальнейшего связывания молекул газа; скорость их нейтрализации пропорциональна падающему молекулярному потоку.

Используя концепцию активных центров, легко сформулировать общий и частные критерии оптимизации ЭФН. Поскольку формирование активных центров связано с энергетическими затратами, очевидным общим критерием будет минимизация энергетических затрат на единицу количества поглощенного газа. Отсюда вытекает частный критерий температурной оптимизации испарительных геттерных насосов (см. § 3.1). Отсюда же может быть найдена и целая группа других частных критериев оптимизации, основанных на совместном анализе пространственного распределения молекулярных потоков и потоков активных центров во внутренней полости насоса (табл. 2.2). В дальнейшем для этой группы принят термин *критерии структурно-геометрической оптимизации ЭФН*.

Таблица 2.2. Критерии структурно-геометрической оптимизации ЭФН и систем на их основе

Объект оптимизации	Управляемые факторы	Критерии оптимизации
ЭФН	Компоновочная схема; геометрические соотношения	Максимум $\Gamma, S_{\text{он}}, \Gamma/\Gamma_{\text{л}}, \Gamma/\Gamma_{\text{л}}', Q/Q_{\text{л.изл}};$ минимум $\Gamma_{\text{л}}, \Gamma_{\text{л}}'$. Подобие функций пространственного распределения потоков откачиваемого газа и потоков (концентрации) активных центров. Система обобщенных критериев (см. § 2.2)
Системы, содержащие источники газа, лучистых потоков, потоков активных центров и сорбирующие поверхности	Компоновочная схема; взаимная ориентация источников молекулярных и лучистых потоков и потоков активных центров; их пространственное распределение; геометрические соотношения	Минимум $S_{\text{он}}, F_{\text{с.п}}, Q_{\text{л.изл}}, Q'_{\text{л.изл}}, Q_{\text{л.пад}}, Q_{\text{л.пад}}$ на единицу полезной работы установки

Под термином *полезная работа*, используемым в табл. 2.2, понимается любой физический параметр, характеризующий назначение откачиваемой установки и требующий достижения заданного остаточного давления. Остальные обозначения имеют следующий смысл: $\Gamma, S_{\text{он}}$ — коэффициент захвата и быстрота действия насоса; Q — откачиваемый газовый поток, $Q_{\text{л.погл}}$ — лучистый поток, поглощаемый сорбирующей поверхностью насоса; $Q_{\text{л.пад}}$ — лучистый поток, падающий на вход насоса извне; $Q'_{\text{л.изл}}$ — лучистый поток, излучаемый вовне через входное сечение насоса; $Q_{\text{л.изл}}$ — полный лучистый поток, излучаемый источником активных центров; $F_{\text{с.п}}$ — площадь сорбирующих поверхностей; $\Gamma_{\text{л}} = Q_{\text{л.погл}}/Q_{\text{л.пад}};$ $\Gamma'_{\text{л}} = Q'_{\text{л.изл}}/Q_{\text{л.изл}}$.

Независимыми или управляемыми факторами оптимизации являются пространственное распределение потоков газа в откачиваемой вакуумной камере, геометрическая структура ЭФН и вакуумного тракта в целом, скорость формирования и пространственное распределение активных центров, свойства сорбирующих поверхностей. Как видно из табл. 2.2, часть критериальных характеристик требует совместного рассмотрения молекулярного и лучистого переноса в проектируемых ЭФН и вакуумных системах на их основе.

Для иллюстрации высказанных соображений детализируем один из приведенных в табл. 2.2 критериев в приложении к геттерному насосу. В оптимально спроектированном насосе КЗ должен иметь максимально возможное для данного газа и сорбирующей поверхности значение. При этом степень насыщения слоя геттера в любой области сорбирующей поверхности должна быть одной и той же. При невыполнении этого условия локальное насыщение геттерного слоя будет приводить к уменьшению КЗ. Следовательно, отвечающим критериям оптимизации можно считать только такой ГН, сорбирующие поверхности которого в каждой точке и в любой момент эксплуатации будут иметь одну и ту же степень насыщения.

Количественно сформулированный критерий для малой области сорбирующей поверхности вокруг точки \bar{r} можно выразить простым соотношением

$$\beta(\bar{r}, t)q_{\text{пад}}(\bar{r}, t)/q_{\text{а.д}}(\bar{r}, t) = \text{const} \leq \eta_{\text{кр}}, \quad (2.1)$$

где $\eta_{\text{кр}}$ — критическая степень насыщения сорбирующей поверхности, после достижения которой β начинает падать. Соотношение (2.1) отражает сформулированное в табл. 2.2 требование подобия функций пространственного распределения падающих молекулярных потоков и потоков активных центров как критерия структурно-геометрической оптимизации ЭФН. Различные модификации ЭФН проанализированы с этих позиций в § 2.4.

Перейдем теперь к построению обобщенной математической модели ЭФН.

**2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СИСТЕМА ОБОБЩЕННЫХ
КРИТЕРИЕВ СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ**

При построении модели кроме характеристик сорбирующих поверхностей $\eta(\bar{r}, t)$, $\vartheta(\bar{r}, t)$, $q_{a.ц}(\bar{r}, t)$, $N_{a.ц}(\bar{r}, t)$, плотностей молекулярных потоков, падающих на сорбирующие поверхности $q_{пад}(\bar{r}, t)$ и поглощаемых ими $q_{погл}(\bar{r}, t)$, применим функцию Φ – пространственное распределение плотностей молекулярных потоков в откачиваемой камере. Это позволит описать разреженный газ вне насоса. Учитывая различия в математическом описании процессов поглощения газа в ЭФН с непрерывным возобновлением геттерной пленки и в насосах с заранее сформированными сорбирующими поверхностями, последующее рассмотрение будем производить раздельно для каждого из этих типов ЭФН.

Насосы с непрерывным возобновлением геттерной пленки. К этому типу принадлежат испарительные насосы, работающие в режиме непрерывного испарения (сублимации) геттера, и МЭРН. Активными центрами в них являются напыляемые на сорбирующие поверхности атомы геттера. С учетом обозначений § 1.4 удобно принять

$$\kappa_{погл}^* = \eta(\bar{r})\vartheta(\bar{r}) = 1/\kappa(\bar{r}). \quad (2.2)$$

Оптимальным будем называть такой насос, в котором в любой области сорбирующих поверхностей поток активных центров поддерживается минимально необходимым для поглощения падающего газового потока. Количественно сформулированное условие записывается в виде

$$\kappa(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})/q_{a.ц}(\bar{r}) = 1 \quad (2.3)$$

Для реального насоса соотношение (2.3), естественно, может не выполняться. При $\kappa(\bar{r})q_{пад}(\bar{r}) > q_{a.ц}(\bar{r})$, что соответствует малости потока активных центров по сравнению с необходимым по условию (2.3), насос имеет КЗ меньше предельно возможного для данной конструктивной схемы, рода газа, вида геттера и температурных условий. При $\kappa(\bar{r})q_{пад}(\bar{r}) < q_{a.ц}(\bar{r})$ коэффициент захвата максимален для данных условий, однако поток активных центров избыточен по сравнению с необходимым.

Таким образом, в каждой области сорбирующих поверхностей реального насоса величина

$$\kappa(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})/q_{a.ц}(\bar{r}) = \Lambda_0\Lambda(\bar{r}) \quad (2.4)$$

может принимать любое значение от нуля до бесконечности, причем степень ее близости к единице можно рассматривать как меру струк-

турного совершенства насоса в данной его области в смысле условия (2.3). В формуле (2.4)

$$\Lambda_0 = \kappa_0 q_{пад0}/q_{a.ц0}; \quad \Lambda(\bar{r}) = \lambda_{\kappa}(\bar{r})\lambda_{пад}(\bar{r})/\lambda_{a.ц}(\bar{r});$$

$$\lambda_{\kappa}(\bar{r}) = \kappa(\bar{r})/\kappa_0; \quad \lambda_{пад}(\bar{r}) = q_{пад}(\bar{r})/q_{пад0}; \quad \lambda_{a.ц} = q_{a.ц}(\bar{r})/q_{a.ц0}.$$

Нулевой индекс здесь присвоен значениям функций, относящимся к некоторой произвольно выбранной малой области сорбирующих поверхностей – *нулевой зоне*. Это может быть, например, узкий поясok вблизи входного сечения насоса.

Используя введенные обозначения, КЗ насоса произвольной геометрической формы можно представить как функцию

$$\Gamma = f[q_{пад0}; \kappa_0, q_{a.ц0}; \lambda_{пад}(\bar{r}); \lambda_{a.ц}(\bar{r})]. \quad (2.5)$$

Функции $q_{пад}(\bar{r})$ и, следовательно, $q_{пад0}$ и $\lambda_{пад}(\bar{r})$ выражаются через $q_{a.ц0}$, Φ , κ_0 , $\lambda_{a.ц}(\bar{r})$, $\lambda_{\kappa}(\bar{r})$. Последние обычно заданы или могут быть легко определены (см. § 2.4).

Функция (2.5), связывающая коэффициент захвата Γ с распределением плотностей молекулярных потоков в откачиваемой камере, свойствами откачиваемого газа, характеристиками источника активных центров и геометрической структурой насоса, есть искомая математическая модель ЭФН. Остановимся более подробно на ее компонентах.

Функция $\lambda_{пад}(\bar{r})$, зависящая от Φ , κ_0 , $q_{a.ц0}$, $\lambda_{\kappa}(\bar{r})$ и $\lambda_{a.ц}(\bar{r})$, описывает распределение относительной плотности молекулярных потоков, падающих на сорбирующие поверхности.

Функция $\lambda_{\kappa}(\bar{r})$ описывает поле параметров взаимодействия газовых потоков с поверхностями. При однородной температуре сорбирующей поверхности обычно $\lambda_{\kappa}(\bar{r}) = 1$.

Функция $\lambda_{a.ц}(\bar{r})$ описывает распределение плотности потоков активных центров, в данном случае напыляемых атомов геттера, определяемое типом и режимом работы их источника.

Параметр κ_0 характеризует условия поглощения газа в нулевой зоне сорбирующих поверхностей. Из условия (2.3) для этой зоны ($\Lambda_0 = 1$) непосредственно вытекают требования к интенсивности источника активных центров:

$$q_{a.ц0} = \kappa_0 q_{пад0}. \quad (2.6)$$

В дальнейшем будем полагать условие (2.6) безусловно выполняющимся.

Функция $\Lambda(\bar{r})$ отражает условия поглощения газа на сорбирующих поверхностях в сравнении с оптимальными. Поэтому определяемую ею функцию

$$\Lambda^*(\bar{r}) = \min[\Lambda(\bar{r}), 1/\Lambda(\bar{r})] \quad (2.7)$$

можно рассматривать как *локальный* (для малой области вокруг точки r) *критерий подобия* реального насоса оптимальному. Для последнего

$$\Lambda^*(\bar{r}) = \Lambda(\bar{r}) \equiv 1. \quad (2.8)$$

Введем дополнительно несколько функций, детализирующих математическую модель ЭФН. Функция

$$\Lambda^* = \frac{1}{F_{c.п}} \int_{F_{c.п}} \min \left[\Lambda(\bar{r}), \frac{1}{\Lambda(\bar{r})} \right] dF, \quad (2.9)$$

при вычислении которой из двух возможных значений подынтегрального выражения всегда будем брать меньшее, дает числовую характеристику структурного совершенства насоса в целом и может быть принята поэтому за *интегральный критерий подобия* реального насоса оптимальному. Функция

$$\Lambda_{эн} = \frac{1}{F_{c.п}} \int_{F_{c.п}} \min [1, \Lambda(\bar{r})] dF \quad (2.10)$$

численно характеризует насос в целом с точки зрения полноты использования потока активных центров и может рассматриваться поэтому как *интегральный коэффициент подобия* реального насоса оптимальному по *критерию минимизации потока активных центров* (энергетических затрат). Функция

$$\Lambda_{c.п} = \frac{1}{F_{c.п}} \int_{F_{c.п}} \min [1, 1/\Lambda(\bar{r})] dF \quad (2.11)$$

служит числовой характеристикой насоса с позиций достижения максимально возможного КЗ и может рассматриваться поэтому как *интегральный коэффициент подобия* реального насоса оптимальному по *критерию полноты использования сорбирующих поверхностей*. При вычислении функций $\Lambda_{эн}$ и $\Lambda_{c.п}$ будем ограничиваться значением подынтегрального выражения, равным или меньшим единицы.

Для определения эксплуатационных характеристик ЭФН важно знать распределение поглощенного газа на сорбирующих поверхностях $q_{погл}(r)$. Введем поэтому в дополнение к указанным выше ряд коэффициентов и критериев подобия с использованием функции $q_{погл}(\bar{r})$. В насосах с непрерывным возобновлением геттерной пленки $q_{погл}(r)$ выражается через $q_{пад}(\bar{r})$ [в диапазоне $0 < q_{пад}(\bar{r})/q_{a.ц}(\bar{r}) \leq 1/\kappa(\bar{r})$]:

$$q_{погл}(\bar{r}) = q_{пад}(\bar{r}) \quad (2.12)$$

или через $q_{a.ц}(\bar{r})$ [в диапазоне $q_{пад}(\bar{r})/q_{a.ц}(\bar{r}) > 1/\kappa(\bar{r})$]:

$$q_{погл}(\bar{r}) = q_{a.ц}(\bar{r})/\kappa(\bar{r}). \quad (2.13)$$

В первом случае, подставив (2.12) в (2.4), получим

$$\kappa(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})/q_{a.ц}(\bar{r}) = \Lambda'_0 \Lambda'(\bar{r}), \quad (2.14)$$

где

$$\Lambda'_0 = \kappa_0 q_{погл_0}/q_{a.ц_0}; \quad \Lambda'(\bar{r}) = \lambda_{\kappa}(\bar{r})\lambda_{погл}(\bar{r})/\lambda_{a.ц}(\bar{r}).$$

Условиями оптимальности здесь, как и ранее, будут

$$\Lambda'_0 = 1; \quad \Lambda'(\bar{r}) = 1. \quad (2.15)$$

Далее строится ряд коэффициентов и критериев подобия, по смыслу эквивалентных ранее рассмотренным, но отличающихся от них аргументом. При этом

$$\lambda_{пад}(\bar{r}) = \lambda_{погл}(\bar{r}); \quad \Lambda(\bar{r}) = \Lambda'(\bar{r}); \quad \Lambda^*(\bar{r}) = \Lambda^{*'}(\bar{r});$$

$$\Lambda^* = \Lambda^{*'}, \quad \Lambda_{эн} = \Lambda'_{эн}; \quad \Lambda_{c.п} = \Lambda'_{c.п} = 1.$$

Таким образом, при выполнении условия (2.12) обе системы математического описания ЭФН тождественны.

Во втором случае количественно оценить насос в смысле требования (2.3) в принципе нельзя, поскольку между $q_{погл}(\bar{r})$ и $q_{пад}(\bar{r})$ в этом режиме не существует однозначной связи.

Еще один, универсальный, критерий оптимизации – *интегральный коэффициент производительности ЭФН в режиме непрерывного возобновления геттерной пленки* Λ – введен и детально проанализирован в § 2.5.

Насосы с заранее сформированными сорбирующими поверхностями.

К данному типу принадлежат адсорбционные, хемосорбционные и имплантационные ЭФН, а также испарительные насосы, работающие в режиме периодического возобновления геттерных пленок. Во всех этих насосах действует механизм саморегулирования потока нейтрализуемых активных центров. Для них в отличие от насосов с непрерывно возобновляемой пленкой геттера всегда выполняется условие $q_{пад}(r) \geq \eta(\bar{r})\vartheta(\bar{r})q_{a.ц}(\bar{r})$. Удобно принять

$$\eta(\bar{r}, t)\vartheta(\bar{r}, t) = \beta(\bar{r}, t), \quad (2.16)$$

где $\beta(\bar{r}, t)$ – вероятность необратимого поглощения молекулы газа в некоторой точке сорбирующей поверхности. Плотность потока нейтрализуемых активных центров

$$q_{a.ц}(\bar{r}, t) = -dN_{a.ц}(\bar{r}, t)/dt = \beta(\bar{r}, t)q_{пад}(\bar{r}, t). \quad (2.17)$$

Оптимальен такой насос, в котором во всех областях сорбирующих поверхностей относительное изменение поверхностной или объемной концентрации активных центров вследствие поглощения молекул оди-

наково. При невыполнении этого условия некоторые области будут насыщаться быстрее, чем остальные, и, следовательно, КЗ начнет падать в сравнении с его оптимальным теоретическим значением. Количественно сформулированное условие можно представить в виде

$$q_{a.ц}(\bar{r}, t)/N_{a.ц}(\bar{r}, t) = \beta(\bar{r}, t)q_{пад}(\bar{r}, t)/N_{a.ц}(\bar{r}, t) = \epsilon(t), \quad (2.18)$$

где $\epsilon(t)$ — функция времени, одинаковая для всех точек сорбирующих поверхностей.

Прежде чем приступить к анализу формулы (2.18), сделаем оговорку. Насосы с заранее сформированными сорбирующими поверхностями работают, вообще говоря, в нестационарном режиме, поскольку параметры элементарных актов взаимодействия молекула — сорбирующая поверхность (в данном случае коэффициент β) и соответственно пространственное распределение молекулярных потоков в полости насоса подчинены тому или иному регламентирующему фактору. Поэтому для строгого описания насоса необходимо иметь не одну, а множество меняющихся во времени характеристик. Сравнительные характеристики насосов различной геометрии, однако, почти не зависят от абсолютных значений их интегральных характеристик. Это позволяет ограничиться рассмотрением только начального состояния ЭФН, сведя задачу к стационарной.

С учетом сделанной оговорки условие (2.18) можно переписать в форме

$$\beta(\bar{r})q_{пад}/N_{a.ц}(\bar{r}) = \Lambda_0 \Lambda(\bar{r}) = c, \quad (2.19)$$

где

$$\Lambda_0 = \beta_0 q_{пад0}/N_{a.ц0}; \quad \Lambda(\bar{r}) = \lambda_\beta(\bar{r})\lambda_{пад}(\bar{r})/\lambda_{a.ц}(\bar{r}),$$

$$\lambda_\beta(\bar{r}) = \beta(\bar{r})/\beta_0, \quad \lambda_{a.ц}(\bar{r}) = N_{a.ц}(\bar{r})/N_{a.ц0};$$

c — константа.

В реальном насосе соотношение (2.19), естественно, может не выполняться, что означает снижение КЗ по сравнению с его предельно возможным значением. Следовательно, в каждой области сорбирующих поверхностей ЭФН величина

$$\beta(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})/N_{a.ц}(\bar{r}) = \Lambda_0 \Lambda(\bar{r}) \quad (2.20)$$

может принимать любое значение от нуля до бесконечности, причем степень выполнимости соотношения (2.19) можно рассматривать как меру структурного совершенства насоса в смысле условия (2.18). Функцию же

$$\Gamma = f[q_{пад0}; \beta_0; N_{a.ц0}; \lambda_{пад}(\bar{r}); \lambda_\beta(\bar{r}); \lambda_{a.ц}(\bar{r})] \quad (2.21)$$

можно рассматривать как математическую модель насоса.

Остановимся на особенностях этой модели.

Функция $\lambda_\beta(\bar{r})$ описывает поле физических параметров взаимодействия молекул газа с сорбирующими поверхностями. Для имплантационных насосов при однородном распределении температуры сорбирующих поверхностей обычно $\lambda_\beta(\bar{r}) = 1$. Для испарительных и хемосорбционных насосов при существенной неоднородности толщины геттерной пленки, в особенности при повышенной температуре геттера, возможно, что $\lambda_\beta(\bar{r}) \neq 1$.

Функция $\lambda_{a.ц}(\bar{r})$ описывает распределение относительной поверхностной или объемной концентрации активных центров.

Параметр Λ_0 характеризует условия поглощения газа в фиксированной зоне. Он непосредственно определяет требования к концентрации активных центров в этой зоне в зависимости от плотности падающего газового потока при заданной скорости снижения сорбционной емкости и, напротив, позволяет определить эту скорость, если задана концентрация активных центров.

Функция $\Lambda(\bar{r})$ отражает степень близости кинетических характеристик поглощения газа в произвольной точке сорбирующих поверхностей к аналогичным характеристикам в фиксированной зоне. Поэтому определяемую ею функцию

$$\Lambda^*(\bar{r}) = \min[\Lambda(\bar{r}); 1/\Lambda(\bar{r})] \quad (2.22)$$

можно рассматривать как *локальный критерий подобия* реального насоса оптимальному. Для последнего

$$\Lambda^*(\bar{r}) = \Lambda(\bar{r}) \equiv 1. \quad (2.23)$$

Введем несколько производных функций.

Функция

$$\Lambda^* = \frac{1}{F_{c.п}} \int_{F_{c.п}} \Lambda^*(\bar{r}) dF \quad (2.24)$$

характеризует структурное совершенство насоса в целом с позиций требования (2.18) и может интерпретироваться поэтому как *интегральный критерий подобия* реального насоса оптимальному.

Функция

$$\Lambda_{ЭН} = \frac{1}{F_{c.п}} \int_{F_{c.п}} \min[1, \Lambda(\bar{r})] dF \quad (2.25)$$

имеет двойкий смысл. Во-первых, она характеризует неоднородность насыщения сорбирующих поверхностей. Во-вторых, для насосов, сорбирующие поверхности которых поддерживаются при температуре, отличной от температуры корпуса, она сохраняет физическую содержа-

тельность как *интегральный коэффициент подобия* реального насоса оптимальному по критерию минимизации энергетических затрат. В таких ЭФН наличие "избыточных" (т. е. насыщающихся медленнее, чем фиксированная зона) охлажденных (криосорбционные ЭФН) или нагретых (имплантационные и хемосорбционные ЭФН) зон приводит к повышенному поглощению или излучению лучистых потоков.

Функция

$$\Lambda_{с.п} = \frac{1}{F_{с.п}} \int_{F_{с.п}} \min [1, 1/\Lambda(\bar{r})] dF \quad (2.26)$$

имеет физический смысл как *интегральный коэффициент подобия* реального насоса оптимальному по критерию использования сорбирующих поверхностей: быстрое насыщение зон, имеющих $\Lambda(\bar{r}) > 1$, эквивалентно уменьшению их эффективной площади по сравнению с номинальной.

Введем ряд коэффициентов и критериев подобия с использованием функции $q_{\text{погл}}(\bar{r})$. Во всех ЭФН рассматриваемого типа

$$q_{\text{погл}}(\bar{r}) = \beta(\bar{r})q_{\text{пад}}(\bar{r}). \quad (2.27)$$

Подставив (2.27) в (2.19), получим

$$\beta(\bar{r})q_{\text{пад}}(\bar{r})/N_{а.ц}(\bar{r}) = \Lambda'_0 \Lambda'(\bar{r}), \quad (2.28)$$

где

$$\Lambda'_0 = q_{\text{погл}0}/N_{а.ц0}; \quad \Lambda'(\bar{r}) = \lambda_{\text{погл}}(\bar{r})/\lambda_{а.ц}(\bar{r}).$$

Условия оптимальности здесь

$$\Lambda'_0 = c; \quad \Lambda'(\bar{r}) = 1. \quad (2.29)$$

Далее можно построить ряд коэффициентов и критериев подобия, по смыслу эквивалентных ранее рассмотренным, но отличающихся от них аргументом. При $\lambda_{\beta}(\bar{r}) = 1$: $\lambda_{\text{пад}}(\bar{r}) = \lambda_{\text{погл}}(\bar{r})$; $\Lambda(\bar{r}) = \Lambda'(\bar{r})$; $\Lambda^*(\bar{r}) = \Lambda'^*(\bar{r})$; $\Lambda^* = \Lambda'^*$; $\Lambda_{эн} = \Lambda'_{эн}$; $\Lambda_{с.п} = \Lambda'_{с.п}$.

Универсальный критерий оптимизации – *интегральный коэффициент производительности ЭФН с заранее сформированными сорбирующими поверхностями** Λ' – введен и детально проанализирован в § 2.5.

Использование найденных критериев и коэффициентов подобия позволяет определить конкретные способы структурно-геометрического совершенствования проектируемых ЭФН и улучшения технико-экономических характеристик вакуумных систем в целом. В такой же степени изложенные принципы и критерии справедливы для насосов по-

* Этот же критерий справедлив, естественно, и для насосов с периодически возобновляемыми сорбирующими поверхностями в режиме паузы между последовательными циклами формирования геттерных пленок.

верхностного действия других типов, в частности конденсационных и криосорбционных.

К примеру, совместное рассмотрение соотношений $\Gamma = f_1(l/d, \beta)$, $\Lambda_{эн} = f_2(l/d, \beta)$ и $\Lambda_{с.п} = f_3(l/d, \beta)^*$ для насосов с заранее сформированными сорбирующими поверхностями позволяет сделать обоснованный выбор значения l/d и определить целесообразность перехода к насосам щелевидного и сотового типов. Вариации зоны насоса с непрерывно возобновляемой геттерной пленкой, в которой выполняется условие $\Lambda_0 = 1$, позволяют оптимизировать насос по КЗ или интегральным коэффициентам подобия. Из условия (2.3) непосредственно вытекают требования к конструкции испарителя, который должен обеспечить необходимый закон пространственного распределения потоков активных центров. В свою очередь, условие (2.19) однозначно определяет требуемый закон изменения толщины геттерного слоя по длине насоса. Многофакторная оптимизация по критериям Λ и Λ' , как показано в § 2.5, позволяет построить ЭФН максимальной производительности. Примеры, иллюстрирующие высказанные соображения, приведены в § 2.4, 2.5 и в последующих главах.

Перейдем теперь к построению системы критериев структурно-геометрической оптимизации ЭФН, учитывающих теплофизические процессы, которые сопутствуют откачке. Для этого введем следующие понятия и обозначения: $q_{\text{пад}}^n(\bar{r})$; $q_{\text{погл}}^n(\bar{r}) = [1 - \rho^n(\bar{r})]q_{\text{пад}}^n(\bar{r})$ – соответственно плотности падающего и поглощаемого лучистых потоков в малой области сорбирующих поверхностей вокруг точки \bar{r} ; $\rho^n(\bar{r})$ – коэффициент отражения лучистых потоков; функции

$$\lambda_{\text{пад}}^n(\bar{r}) = q_{\text{пад}}^n(\bar{r})/q_{\text{пад}0}^n; \quad (2.30)$$

$$\lambda_{\text{погл}}^n(\bar{r}) = q_{\text{погл}}^n(\bar{r})/q_{\text{погл}0}^n. \quad (2.31)$$

В контексте анализируемой задачи полная тепловая нагрузка на сорбирующую поверхность $\tilde{q}_{\text{погл}}(\bar{r})$ складывается из энтальпии и теплоты фазового перехода откачиваемого газа, пропорциональных поглощаемому газовому потоку $q_{\text{погл}}(\bar{r})$, и лучистого теплопритока. В насосах с непрерывно возобновляемой геттерной пленкой дополнительный вклад дают энтальпия и теплота фазового перехода напыляемых атомов геттера, пропорциональные потоку активных центров $q_{а.ц}(\bar{r})$. В общем виде

$$\tilde{q}_{\text{погл}}(\bar{r}) = k_1 q_{\text{погл}}(\bar{r}) + q_{\text{погл}}^n(\bar{r}) + k_2 q_{а.ц}(\bar{r}), \quad (2.32)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности. Очевидно, что второе и третье слагаемые в (2.32), отражающие процессы, не связанные с по-

* Здесь l, d – характеристические продольный и поперечный размеры насоса.

глошением газа, а лишь сопутствующие ему, должны быть как можно меньше; для "идеального" по теплофизическим характеристикам ЭФН они должны отсутствовать. Поэтому функцию

$$\tilde{\Lambda}^*(\bar{r}) = \frac{k_1 q_{\text{погл}}(\bar{r})}{k_1 q_{\text{погл}}(\bar{r}) + q_{\text{погл}}^n(\bar{r}) + k_2 q_{\text{а.ц}}(\bar{r})} =$$

$$= [1 + (q_{\text{погл}}^n / k_1 q_{\text{погл}}) \lambda_{\text{погл}}^n(\bar{r}) / \lambda_{\text{погл}}(\bar{r}) +$$

$$+ (k_2 q_{\text{а.ц}} / k_1 q_{\text{погл}}) \lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}) / \lambda_{\text{погл}}(\bar{r})]^{-1} \quad (2.33)$$

можно рассматривать как *локальный критерий теплофизического подобия реального насоса идеальному*, а функцию

$$\tilde{\Lambda}^* = \frac{1}{F_{\text{с.п}}} \int_{F_{\text{с.п}}} \tilde{\Lambda}^*(\bar{r}) dF \quad (2.34)$$

с этих же позиций можно интерпретировать как *интегральный критерий теплофизического подобия*. Для идеального по теплофизическим характеристикам ЭФН $\tilde{\Lambda}^*(\bar{r}) = \tilde{\Lambda}^* \equiv 1$

Приведенная система критериев и структурно-геометрических характеристик позволяет: адекватно процессу откачки и сопутствующим ему теплофизическим процессам математически описывать ЭФН; сравнивать насосы, выполненные по различным конструктивно-физическим схемам; формулировать количественные требования к компоновочным схемам ЭФН, геометрическим соотношениям и параметрам испарителей, теплозащитных экранов, геттерных панелей и других функциональных элементов и с их помощью осуществлять структурно-параметрическую оптимизацию проектируемых ЭФН и вакуумных систем на их основе.

2.3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТКАЧКИ

Рассмотрим типовые компоновочные схемы вакуумных систем, в которых используются ЭФН. Примем, кроме особо оговоренных случаев, что откачиваемая камера заполнена разреженным газом с молекулярной массой M ; газ находится в термодинамическом равновесии со стенками при температуре T .

1. Геттерная панель с коэффициентом прилипания β размещена внутри откачиваемой камеры. Площадь сорбирующей поверхности $F_{\text{с.п}}$ намного меньше площади стенок камеры. Быстрота действия панели, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$S_{\text{ОН}} = \beta V_0 F_{\text{с.п}} = 36,38 \beta F_{\text{с.п}} (T/M)^{0,5}. \quad (2.35)$$

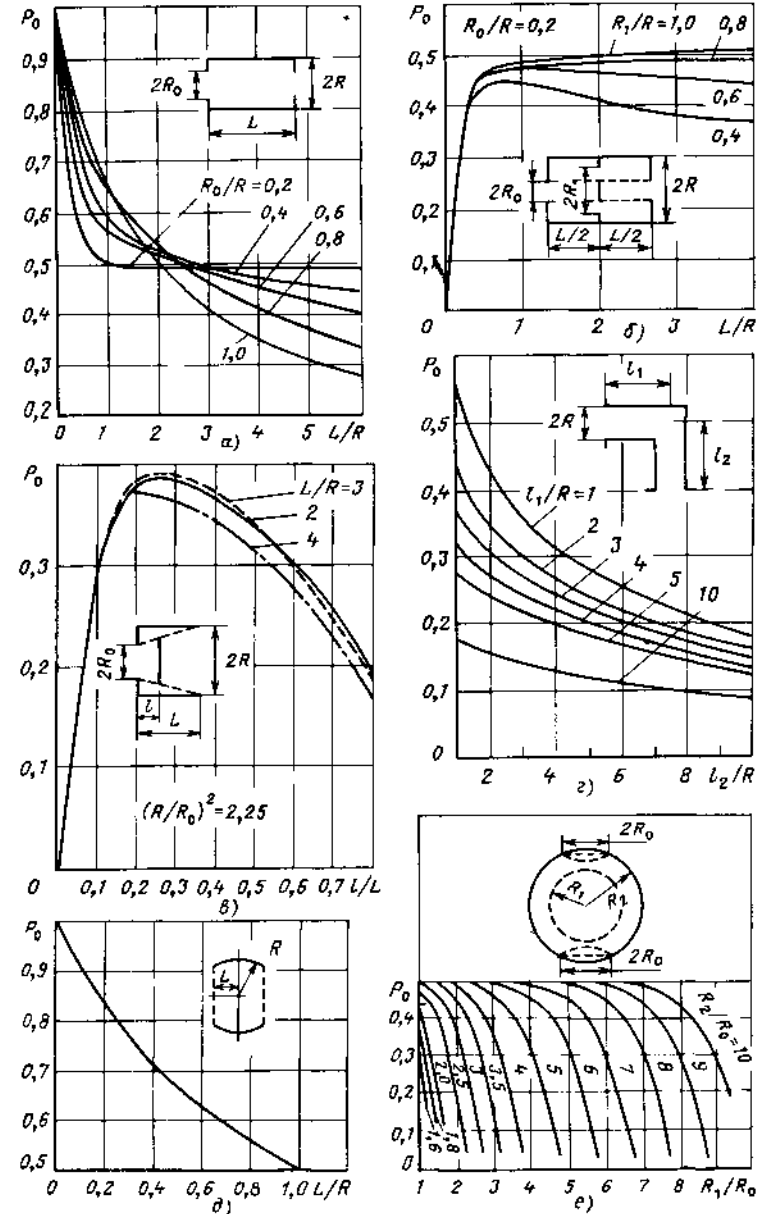


Рис 21 Коэффициенты проводимости типичных соединительных трубопроводов (а-ж) в зависимости от соотношения характеристических размеров

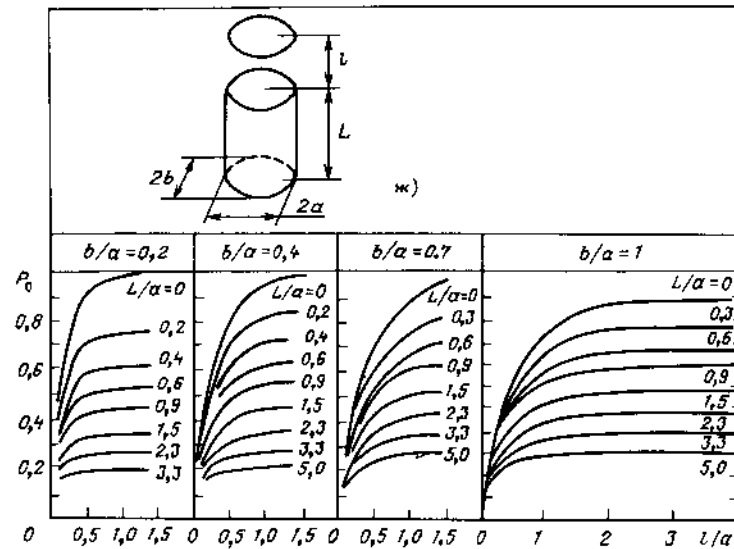


Рис. 2.1 (продолжение)

2. Сорбирующая поверхность (площадь $F_{с.п}$, m^2 , коэффициент прилипания β) соединена с откачиваемой камерой трубопроводом. Площадь входного сечения трубопровода $F_{отр}$, m^2 , много меньше площади стенок камеры. Быстрота откачки камеры, m^3/c , в этом случае

$$S = \left[\frac{1}{P_0 V_0 F_{отр}} + \frac{1}{36,38 \beta F_{с.п}} (M/T)^{0,5} \right]^{-1}, \quad (2.36)$$

где P_0 – коэффициент газокинетической проводимости соединительного трубопровода (рис. 2.1).

3. ЭФН присоединен непосредственно к откачиваемой камере. Площадь входного отверстия насоса соизмерима с площадью стенок камеры, так что распределение скоростей молекул газа неоднородно.

В этом случае насос нельзя точно характеризовать в традиционных понятиях вакуумной техники. Из-за нарушения однородности поля молекулярных скоростей такие категории молекулярно-кинетической теории газов, как давление и объем газа, падающего в 1 с на стенку, а также производные от них понятия быстроты действия и быстроты откачки теряют свою физическую содержательность и однозначность. Свойство ЭФН такой конфигурации с той или иной эффективностью поглощать падающие молекулы описывается более общей, чем быстрота действия, интегральной характеристикой – КЗ. Для вычисления КЗ и других интегральных и дифференциальных характеристик сложных вакуумных структур разработаны специальные методы, подроб-

но изложенные в монографии "Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах" (см. библиографию к этой главе).

На рис. 2.2 и 2.3 представлены коэффициенты захвата ЭФН наиболее распространенных конфигураций, вычисленные одним из этих методов – методом угловых коэффициентов. Все проанализированные схемы, кроме VI и VIII на рис. 2.2, соответствуют ЭФН цилиндрической формы. Насос по схеме V имеет симметричный жалюзийный экран с коэффициентом газокинетической проводимости P_0 . Схема VI соответствует насосу в виде прямоугольного параллелепипеда с расположенными друг против друга сорбирующими поверхностями, схема VII – насосу в форме спиралевидного вкладыша с двусторон-

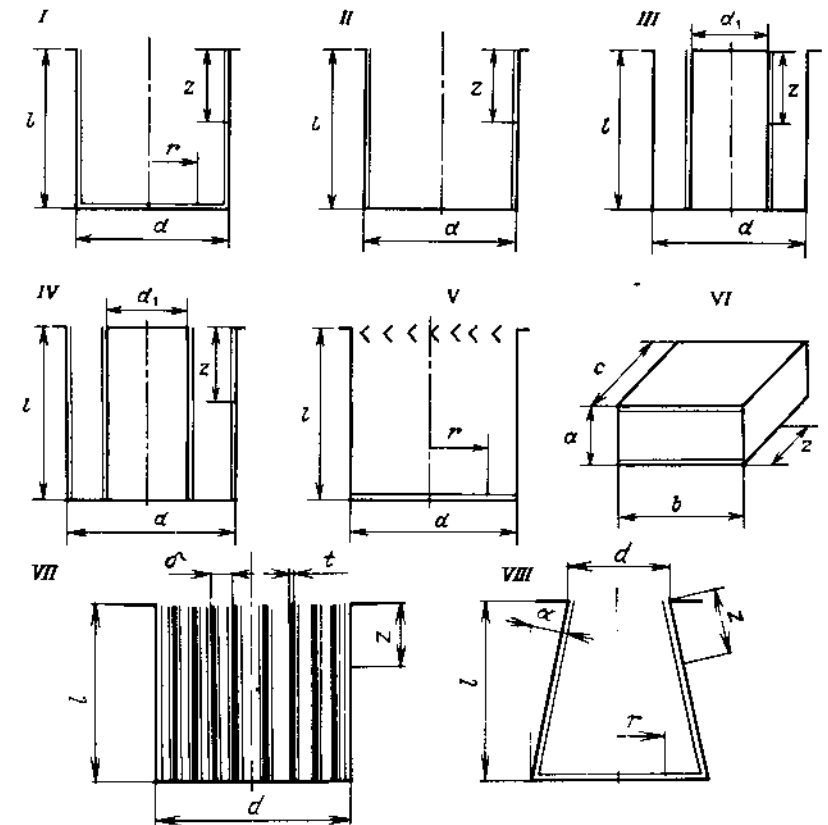


Рис. 2.2. Типичные конструктивные схемы ЭФН с однородным заранее сформированным геттерным слоем и их КЗ в зависимости от соотношения характеристических размеров и коэффициентов прилипания. Сорбирующие поверхности показаны двойными линиями

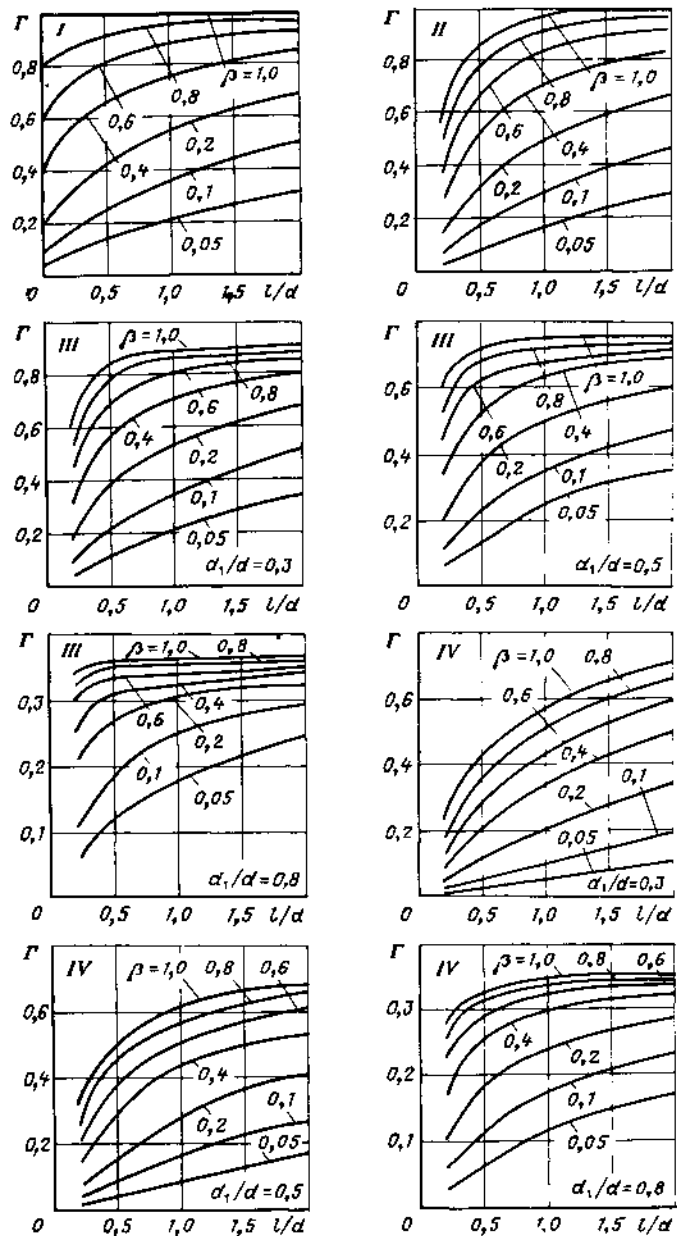


Рис. 2.2 (продолжение)

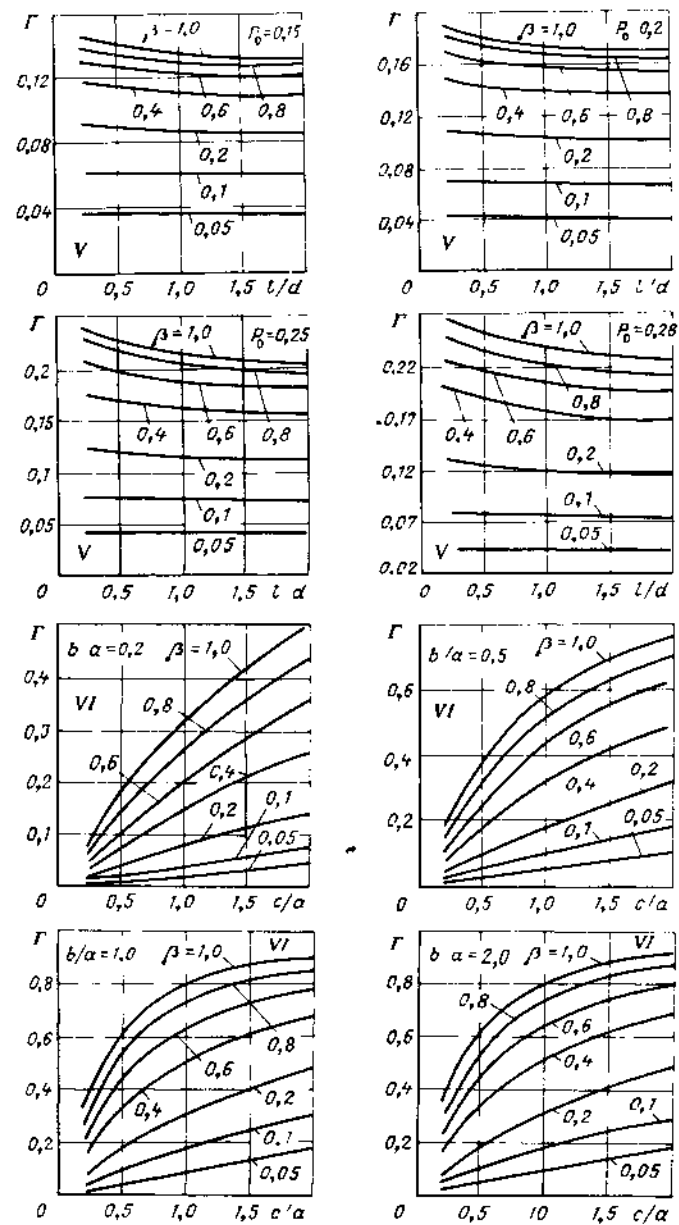


Рис. 2.2 (продолжение)

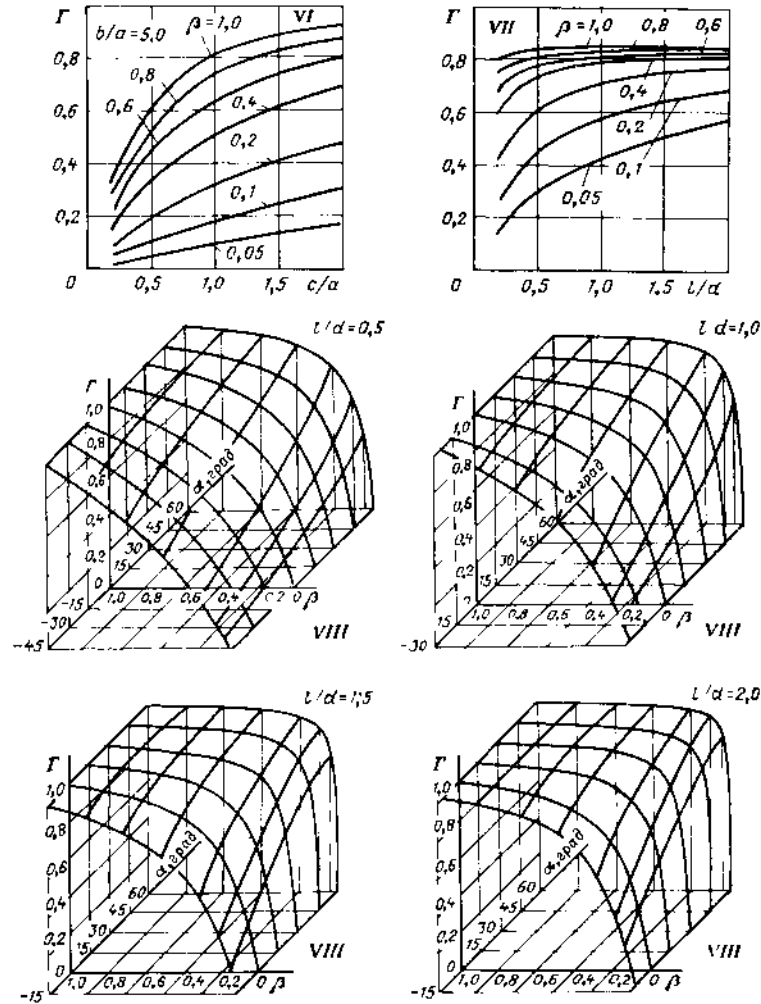


Рис. 2.2 (продолжение)

ними ленточными сорбирующими поверхностями. В насосах IX–XIV коаксиально корпусу размещены источники атомов геттера (испарители): сферический (IX); нитевидный, или проволочный (X); кольцевой (XII); дисковый (XIII); полусферический (XIV).

Расчеты выполнены при следующих приближениях: на вход насоса падает однородный диффузный молекулярный поток; собственное газовыделение поверхностей отсутствует; отражение молекул от любой поверхности носит диффузный характер; на сорбирующих по-

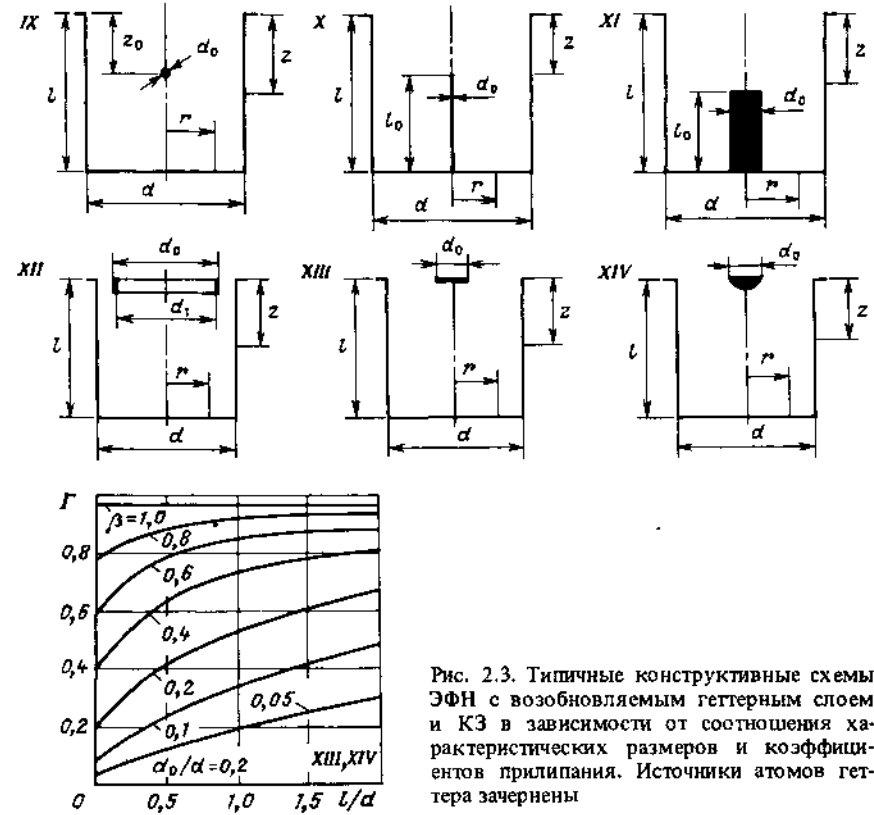


Рис. 2.3. Типичные конструктивные схемы ЭФН с возобновляемым геттерным слоем и КЗ в зависимости от соотношения характерных размеров и коэффициентов прилипания. Источники атомов геттера зачернены

верхностям происходит полная конденсация атомов геттера ($\beta_{a.ц} = 1$); источники атомов геттера не вносят существенных изменений в распределение молекулярных потоков внутри насоса; в нулевой зоне ЭФН, работающих в режиме непрерывного возобновления геттерной пленки, всегда выполняется условие (2.6) и коэффициент прилипания равен единице. В остальных зонах при $\lambda_{a.ц} \leq 1$ $\beta = \lambda_{a.ц}$, при $\lambda_{a.ц} > 1$ $\beta = 1$.

На этапе предварительного проектирования ЭФН применение точных методов не всегда оправдано ввиду их сравнительной трудоемкости. Во многих случаях достаточно использовать приближенные методы, позволяющие быстро оценивать эффективность той или иной структуры при вариациях ее геометрии. Простой и универсальный метод, дающий вполне достаточную для этих целей точность, состоит в "приведении" кажущейся быстроты действия сорбирующих поверхностей к входному отверстию образуемой ими структуры. Под кажущейся быстротой действия $S_0 \Sigma$ понимаем величину $\Sigma S_{0i} F_i$, где сумми-

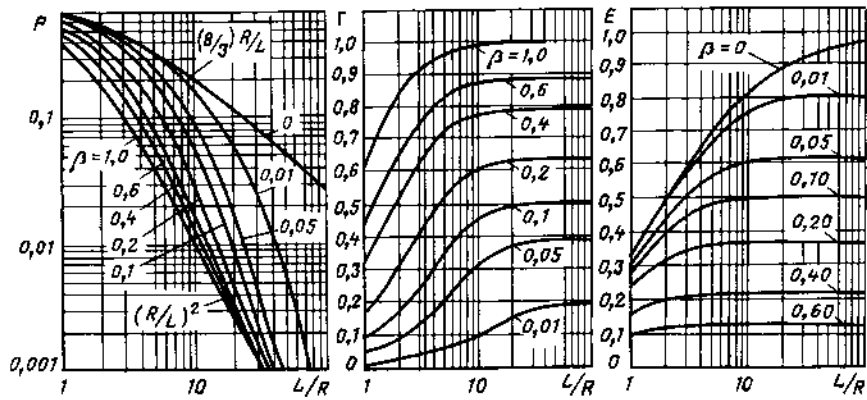


Рис. 2.4. Коэффициенты захвата Γ , проводимости P и обратного рассеяния E для ЭФН цилиндрической формы в зависимости от относительной длины при различных коэффициентах прилипания

рование ведется по всем сорбирующим поверхностям. Здесь S_{0i} , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, — удельная быстрота действия i -й сорбирующей поверхности с площадью F_i , м^2 . Такой прием означает замену трехмерной структуры приближенно эквивалентной ей сорбирующей поверхностью, расположенной в сечении стыковки насоса и откачиваемой камеры. Быстрота действия этой эквивалентной поверхности S , $\text{м}^3/\text{с}$, в согласии с формулой (2.36) определяется приближенным соотношением

$$S = \Sigma S_{0i} F_i [1 + \Sigma S_{0i} F_i / 36,38 F_0 (T/M)^{0,5}]^{-1}, \quad (2.37)$$

где F_0 — площадь входного отверстия, м^2 .

Большинство ЭФН имеет достаточно простую геометрическую форму. Поэтому соотношение (2.37) можно представить в конкретизированном виде для насосов наиболее распространенных сечений — кругового (диаметр d), прямоугольного (стороны a и $\xi a = b$) и щелевого (ширина a , зазор $\delta \ll a$):

$$S_{\text{кр}} = S_0 \pi d L [1 + 0,11 S_0 (L/d) \sqrt{M/T}]^{-1}; \quad (2.37a)$$

$$S_{\text{пр}} = S_0 2a L (1 + \xi) [1 + 0,055 S_0 (1 + 1/\xi) (L/a) \sqrt{M/T}]^{-1}, \quad (2.37б)$$

$$S_{\text{щ}} = S_0 2a L [1 + 0,055 S_0 (L/\delta) \sqrt{M/T}]^{-1}. \quad (2.37в)$$

Здесь размеры выражены в м, быстрота действия — в $\text{м}^3/\text{с}$, удельная быстрота действия S_0 — в $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Нетрудно видеть, что полученные формулы можно обобщенно представить как

$$S = \alpha S_0 \Sigma, \quad (2.38)$$

где α — коэффициент приведения. Метод отличается предельной простотой и дает вполне достаточную для инженерных расчетов точность.

4. Система сорбирующих и отражающих газ поверхностей соединяет две вакуумные камеры. Интегральными характеристиками таких ЭФН, используемых обычно для дифференциальной откачки вакуумного тракта, являются коэффициенты захвата $\Gamma = N_{\text{погл}}/N$, проводимости $P = N_{\text{пр}}/N$ и обратного рассеяния $E = N_{\text{обр}}/N$, связанные соотношением

$$\Gamma + P + E = 1. \quad (2.39)$$

Здесь $N_{\text{погл}}$, $N_{\text{пр}}$ и $N_{\text{обр}}$ — соответственно потоки поглощенных, прошедших от входного к выходному сечениям и отраженных обратно молекул; N — молекулярный поток, падающий на входное сечение системы. Коэффициенты Γ , P , E вычисляются упомянутыми выше методами анализа молекулярных потоков в сложных вакуумных структурах. Для простейшей системы — цилиндрического трубопровода в интервале $0 \leq \beta \leq 1$ — эти коэффициенты представлены на рис. 2.4.

2.4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Пространственное распределение молекулярных потоков, падающих на стенки и поглощаемых ими, для насоса простейшей формы — цилиндрического трубопровода с различными относительными длинами — представлено на рис. 2.5, 2.6. В реальных ЭФН, как видно из рис. 2.7–2.10, это распределение существенно иное. Различие опреде-

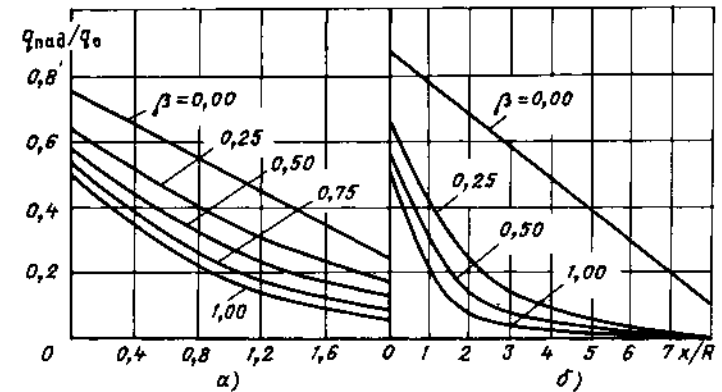


Рис. 2.5. Плотность молекулярных потоков, падающих на стенки цилиндрической сорбирующей поверхности, при $L/R = 2$ (а) и $L/R = 8$ (б) в долях плотности потока на входе

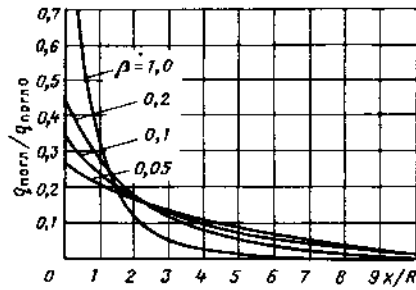


Рис. 2.6. Относительная плотность поглощенных молекул вдоль стенок цилиндрической сорбирующей поверхности при $L/R = 10$; $q_{\text{погло}}$ — плотность потока, поглощаемого стенкой у входного сечения насоса при $\beta = 1$

ляется влиянием отражающих молекулы конструктивных элементов насоса.

На этих рисунках и в табл. 2.3–2.5 приведены основные дифференциальные и структурно-геометрические характеристики ЭФН. Выбраны те же модификации насосов, для которых в § 2.3 были рассчитаны интегральные характеристики; характеристики отобраны в соответствии с § 2.2. Для осесимметричных ЭФН трехмерная задача заменялась плоской. Кривые распределения представлены в виде функций линейных координат z (для боковой поверхности) и r (для торца); точка $r = 0$ находится на оси насоса. Римские цифры на графиках соответствуют номерам схем ЭФН на рис. 2.2 и 2.3. Принято, что на вход насоса падает однородный молекулярный поток с плотностью $q_0 = \text{const}$, его угловое распределение описывается законом косинуса.

При анализе представленных результатов необходимо учитывать следующее. Нулевой зоной в ЭФН по схемам I–IV, VII, VIII является узкий поясик в верхней части сорбирующих поверхностей. Числовые значения функции $\lambda_{\text{погл}}$ в зоне $z/d = 1$ при выходе соответствующих кривых за пределы графиков составляют:

- схема III, $d_1/d = 0,3$ 1,24 ($\beta = 0,05$) и 1,22 ($\beta = 0,1$);
- схема III, $d_1/d = 0,8$: 5,55 ($\beta = 0,05$) и 1,22 ($\beta = 0,1$);
- схема IV, $d_1/d = 0,3$, поверхность d_1 : 1,09 ($\beta = 0,05$);
- схема IV, $d_1/d = 0,5$, поверхность d_1 : 1,09 ($\beta = 0,05$);
- схема IV, $d_1/d = 0,8$, поверхность d_1 : 1,89 ($\beta = 0,05$);
- схема IV, $d_1/d = 0,8$, поверхность d : 1,70 ($\beta = 0,05$).

Нулевой зоной в ЭФН по схеме V является малый круг в центре сорбирующей поверхности. В интервалах $0,15 \leq P \leq 0,28$ и $0,3 \leq l/d \leq 1,5$, в которых сделаны вычисления, функция $\lambda_{\text{погл}}/\lambda_{a,z}$ практически не зависит от P и относительной длины насоса.

Нулевая зона в ЭФН по схеме VI совпадает с узкой центральной частью сорбирующих поверхностей непосредственно у входного сече-

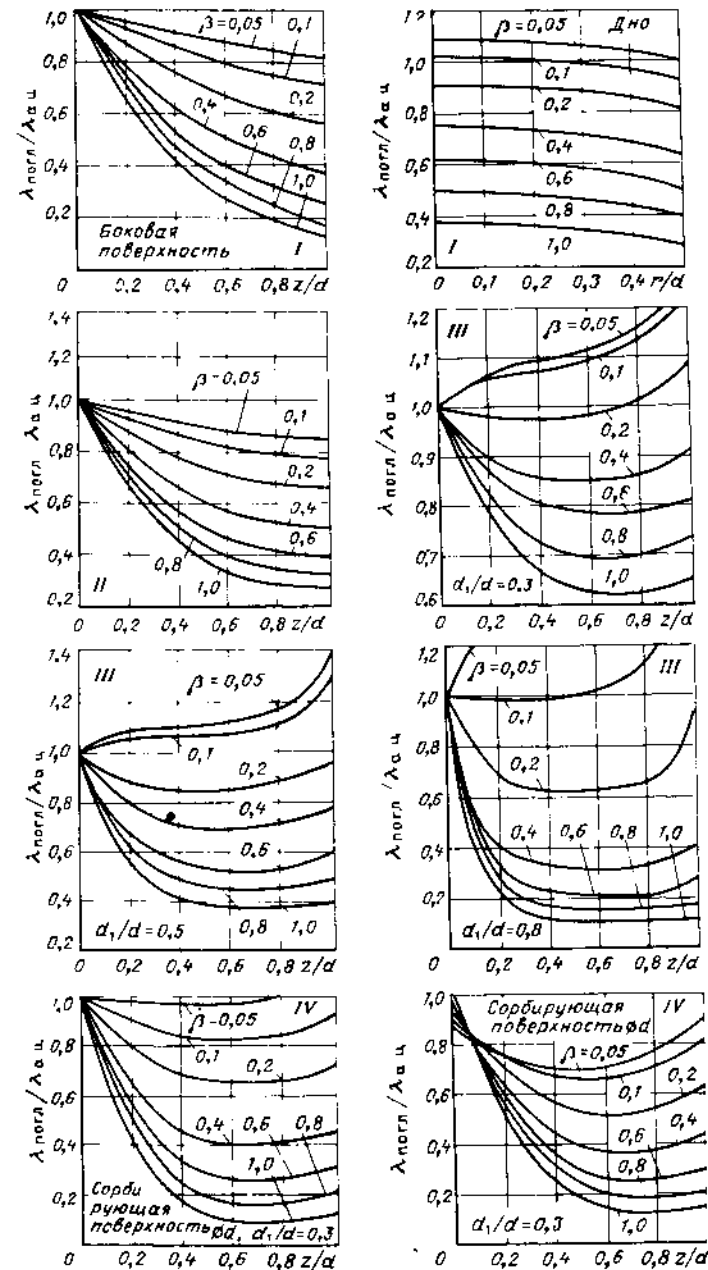


Рис. 2.7. Функция $\lambda_{\text{погл}}/\lambda_{a,z} \equiv \lambda_{\text{погл}}$ для ЭФН с однородным заранее сформированным геттерным слоем при различных значениях коэффициента прилипания

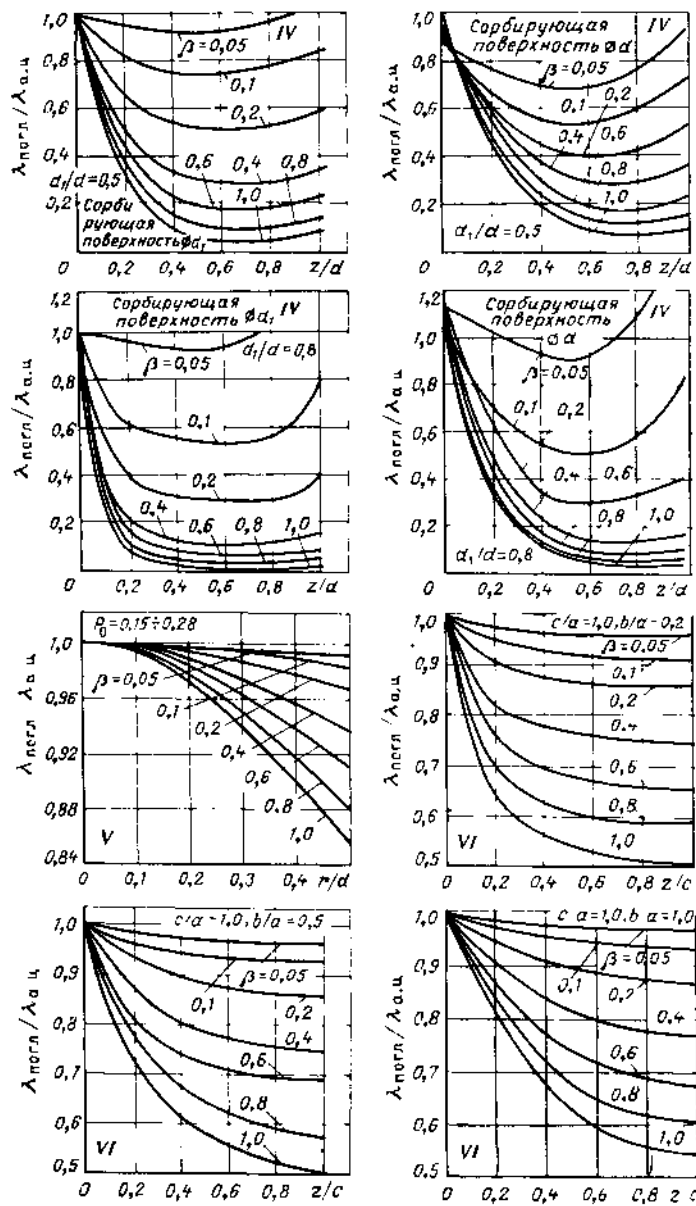


Рис. 2.7 (продолжение)

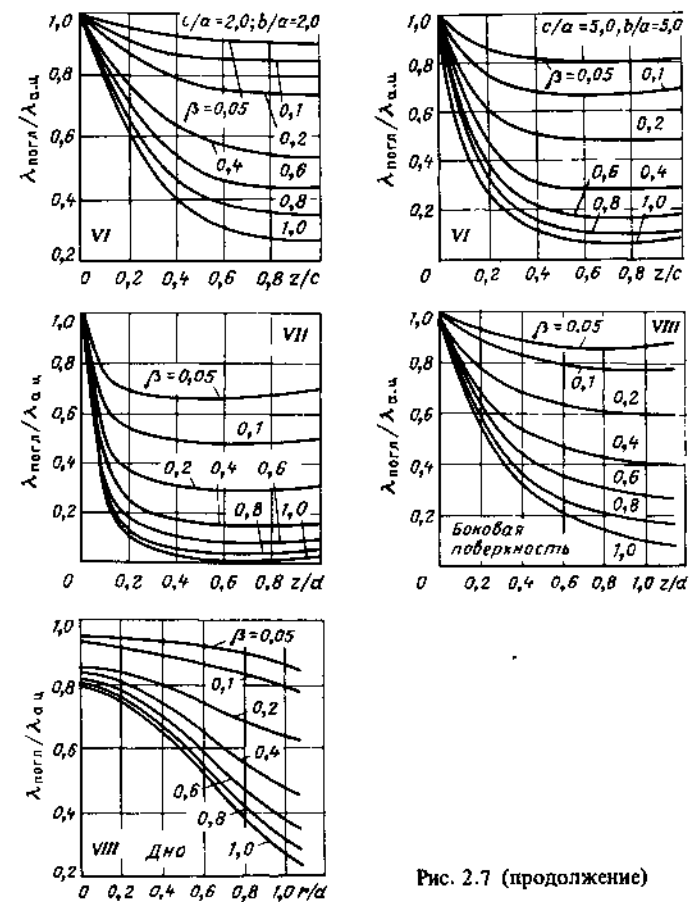


Рис. 2.7 (продолжение)

ния; приведенные кривые относятся к этой же части. По мере приближения к отражающим поверхностям значения $\lambda_{\text{погл}}/\lambda_{\text{а.ц}}$ несколько возрастают: их максимальное увеличение в пределах интервалов c/a и b/a , в которых сделаны вычисления, не превышает 6%.

Расчеты $\lambda_{\text{погл}}/\lambda_{\text{а.ц}}$ для ЭФН по схеме VII выполнены для вкладыша с шагом $\delta/d = 0,1$ и толщиной ленты $t/d = 0,0125$; спираль условно развернута в щель. Расчеты для насоса по схеме VIII выполнены для $a = 30^\circ$ при $l/d = 1,0$.

При вычислении характеристик ЭФН с возобновляемым геттерным слоем (схемы IX–XIV) рассматривалось два возможных режима их работы – непрерывное воспроизведение (напыление) пленок геттера и пауза, когда газ поглощается сформированным на этапе испарения геттерным слоем.

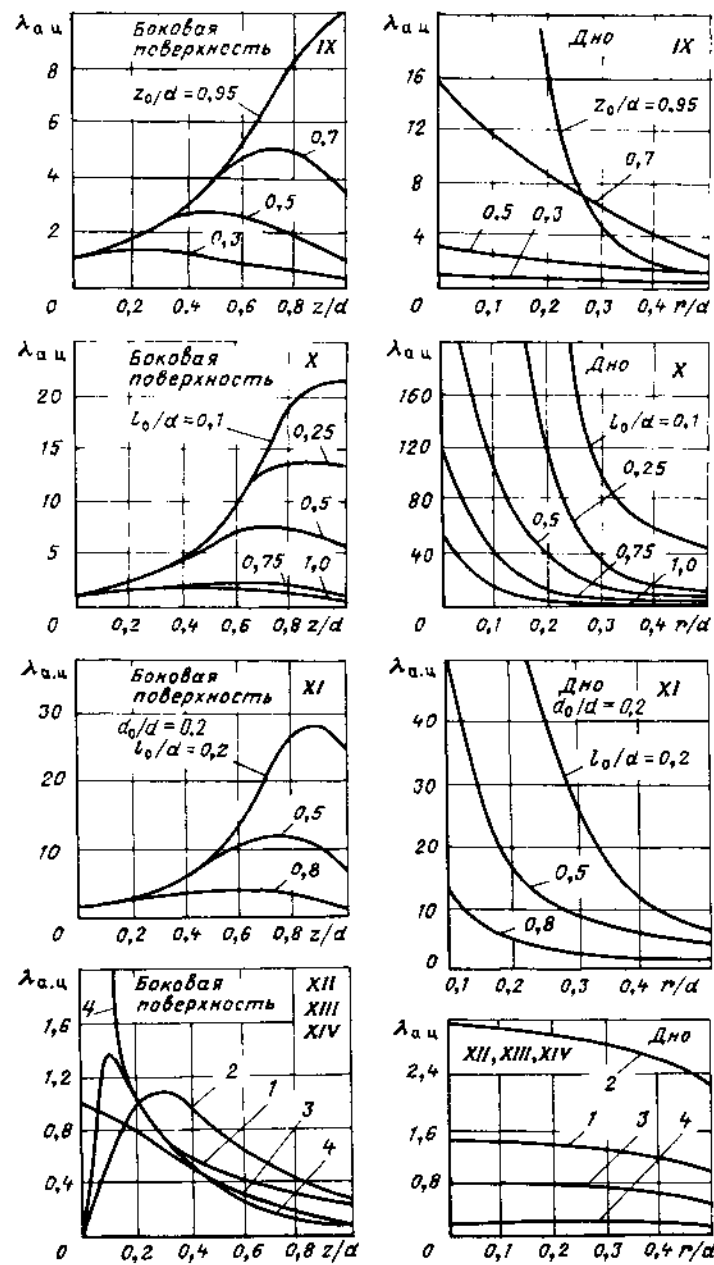


Рис. 2.8. Функция $\lambda_{a,ц}$ для ЭФН с возобновляемым геттерным слоем в режиме паузы в зависимости от их геометрической структуры (см. пояснение в тексте):
 1 – схема XII ($d_1/d = 0,7; d_0/d = 0,8$); 2 – схема XII ($d_1/d = 0,9; d_0/d = 1,0$);
 3 – схема XIII; 4 – схема XIV

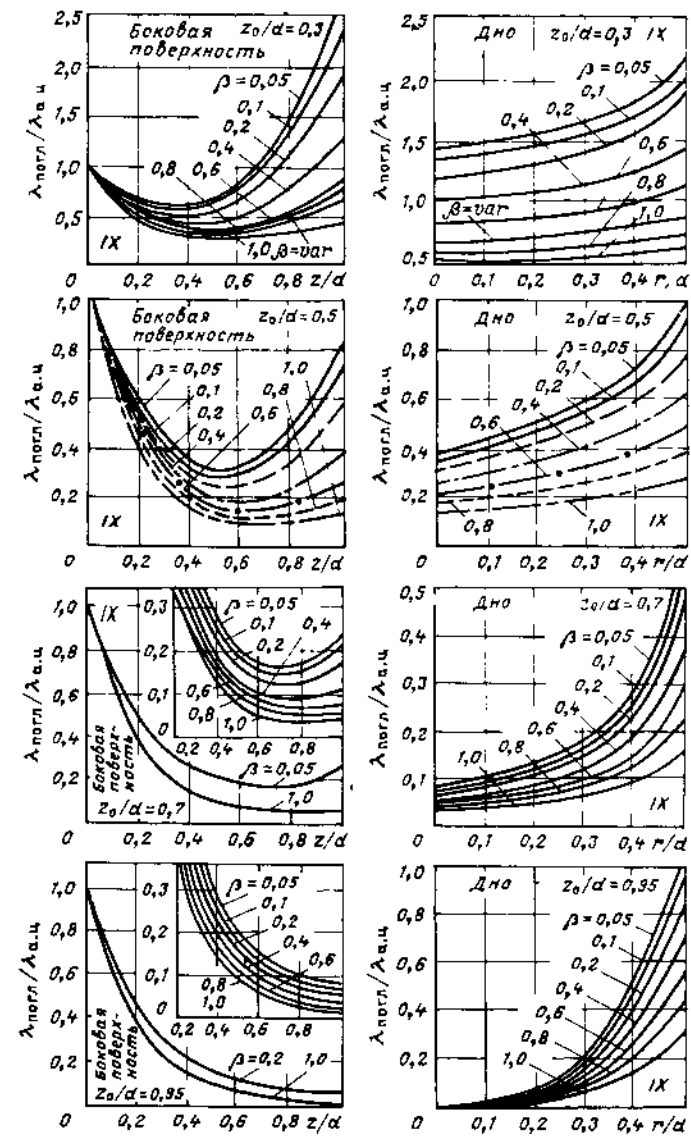


Рис. 2.9. Функция $\lambda_{полг}/\lambda_{a,ц}$ для ЭФН с возобновляемым геттерным слоем в режиме паузы при различных геометрических соотношениях в зависимости от коэффициентов прилипания

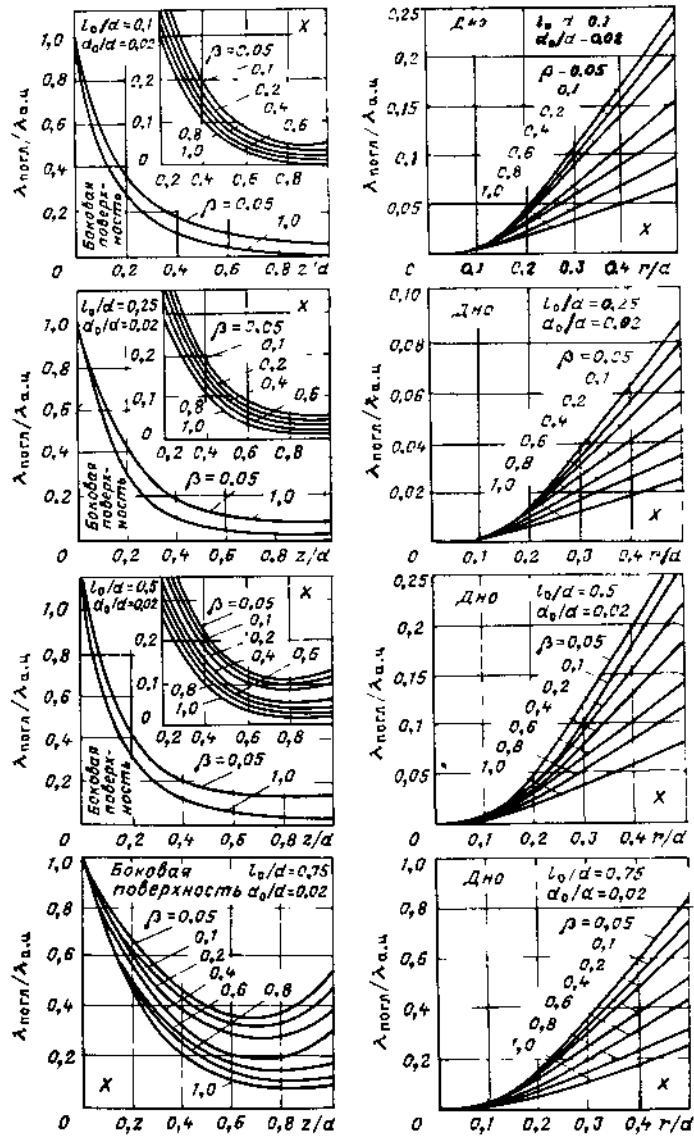


Рис. 2.9 (продолжение)

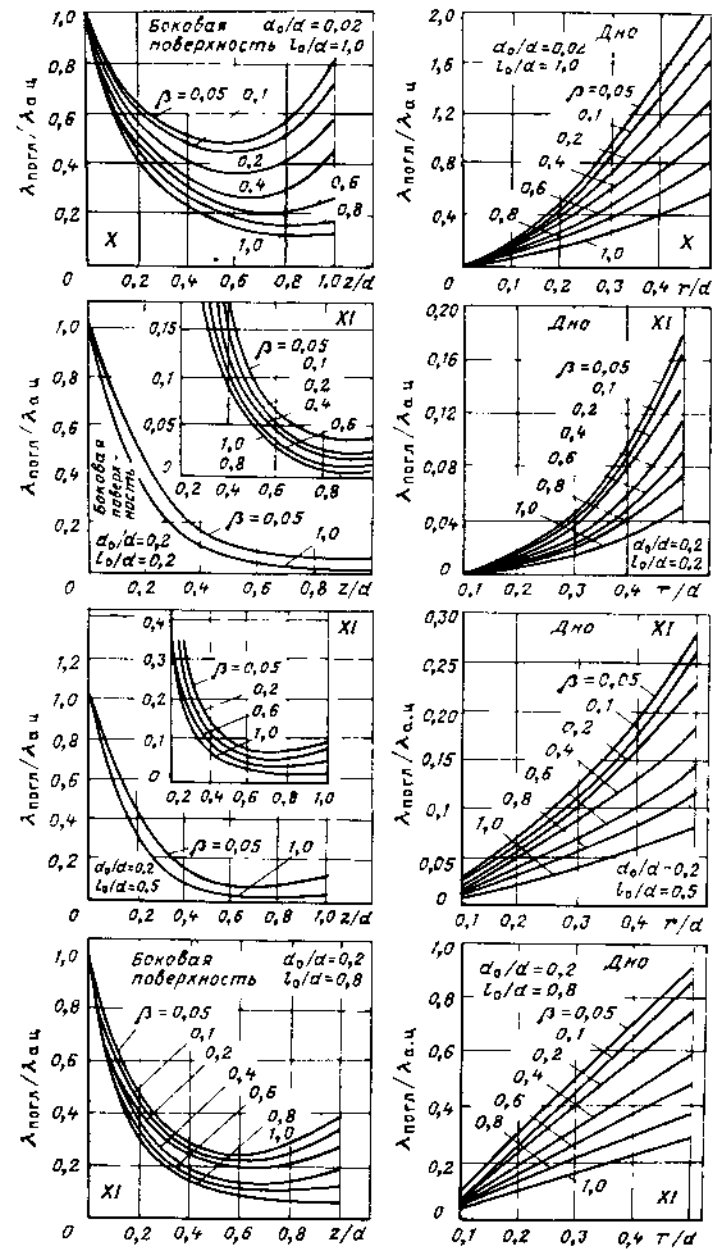


Рис. 2.9 (продолжение)

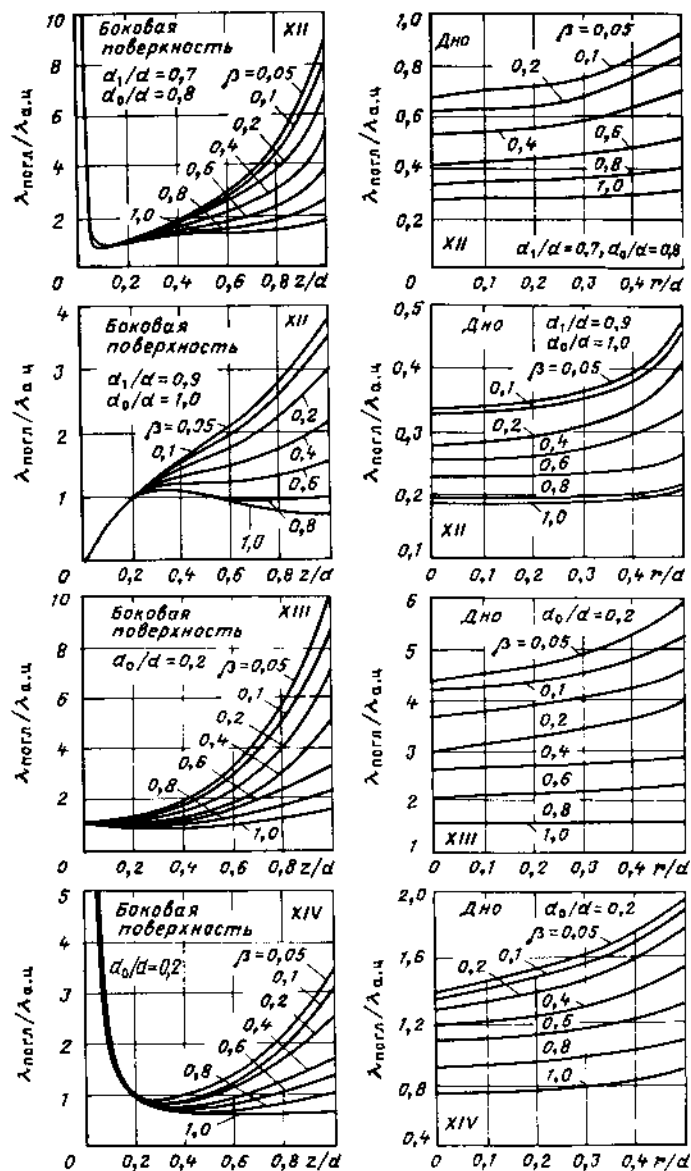


Рис. 29 (продолжение)

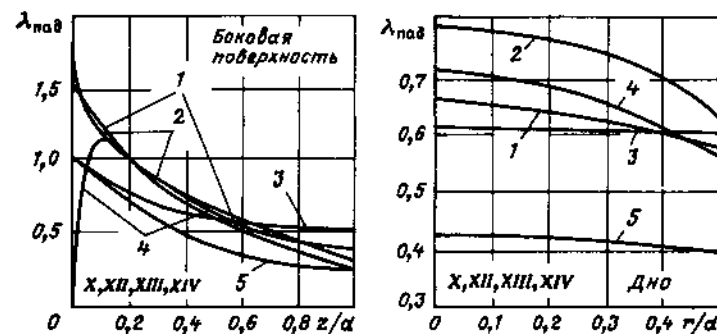


Рис. 2.10. Распределение относительной плотности падающих молекулярных потоков на сорбирующих поверхностях ЭФН с непрерывным возобновлением геттерных пленок в зависимости от их геометрической структуры.

1 – схема XII ($d_1/d = 0.7; d_0/d = 0.8$); 2 – схема XII ($d_1/d = 0.9; d_0/d = 1.0$); 3 – схема XIII; 4 – схема XIV; 5 – схема X ($z_0/d = 0.3$)

Режим паузы. Принималось, что геттерный слой в этом режиме далек от насыщения и коэффициент прилипания одинаков на всех сорбирующих поверхностях ($\lambda_{\beta} = 1$). Результаты расчета представлены в табл. 2.4 и на рис. 2.8, 2.9. Символом μ_0 в табл. 2.4 обозначена плотность потока атомов геттера с поверхности испарителя. За нулевую зону в насосах по схемам XII и XIII принят узкий пояс вокруг сечения $z/d = 0.2$.

Режим непрерывного напыления геттерных пленок (см. табл. 2.5, рис. 2.10). При расчете принималось, что в нулевой зоне выполняются условия $q_{\text{в.ч.}} = \kappa q_{\text{пад}0}, \beta = 1.0$. С учетом распределения $\lambda_{\text{в.ч}}$ в насосах по схемам IX, X (кроме первого) и XI КЗ равен 1. Поэтому расчет для этого режима выполнен только для ЭФН по схемам XII и XIII.

При конструировании могут быть полезны аналитические соотношения между плотностями молекулярных потоков, падающих на различные области ЭФН. В частности, для насоса по схеме I при $l/d = 1$ с погрешностью менее 5% справедливы следующие аппроксимирующие функции:

$$\text{для цилиндрической поверхности в пояске } z \approx 0 \\ q_{\text{пад}}/q_0 = 0.18/(0.28 + \beta) + 0.36; \quad (2.40a)$$

$$\text{для цилиндрической поверхности в пояске } z \approx l \\ q_{\text{пад}}/q_0 = 0.22/(0.19 + \beta) - 0.12; \quad (2.40б)$$

$$\text{для торца} \\ q_{\text{пад,ср}}/q_0 = 0.21/(0.22 + \beta). \quad (2.40в)$$

Таблица 2.3 Интегральные структурно-геометрические характеристики ЭФН с однородным заранее сформированным геттерным слоем

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta=0,05$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
I	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,90	0,83	0,73	0,62	0,56	0,52	0,50
		Γ	0,21	0,36	0,56	0,76	0,88	0,96	1,00
		Λ^*	0,91	0,87	0,77	0,63	0,54	0,47	0,42
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$	0,92	0,87	0,77	0,63	0,54	0,47	0,42
		$\Lambda_{\text{с п}} = \Lambda_{\text{геом}}$	0,99		1,00				
II	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,96	0,88	0,78	0,66	0,59	0,55	0,52
		Γ	0,17	0,31	0,49	0,71	0,83	0,91	0,97
		$\Lambda^* = \Lambda_{\text{ЭН}}$	0,91	0,87	0,79	0,67	0,58	0,52	0,48
		$\Lambda_{\text{с п}}$			1,00				
		$\Lambda_{\text{геом}}$			0,80				
III	$\frac{d_1}{d} = 0,3$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,97	0,95	0,92	0,85	0,80	0,75	0,72
		Γ	0,06	0,11	0,20	0,34	0,44	0,52	0,58
		Λ^*	0,90	0,92	0,98	0,89	0,84	0,78	0,71
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$	1,00	1,00	0,99	0,89	0,84	0,78	0,71
		$\Lambda_{\text{с п}}$	0,90	0,92	0,99		1,00		
$\Lambda_{\text{геом}}$	0,17	0,18							
	$\frac{d_1}{d} = 0,5$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,96	0,90	0,85	0,75	0,72	0,70	0,65

Табл 2.3 (продолжение)

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta=0,05$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	$\frac{d_1}{d} = 0,8$	Γ	0,09	0,16	0,28	0,42	0,51	0,57	0,61
		Λ^*	0,89	0,92	0,89	0,77	0,63	0,56	0,50
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$	1,00	1,00	0,89	0,77	0,63	0,56	0,50
		$\Lambda_{\text{с п}}$	0,89	0,92		1,00			
		$\Lambda_{\text{геом}}$	0,25	0,26		0,29			
	$\frac{d_1}{d} = 0,3$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,96	0,88	0,80	0,70	0,62	0,60	0,56
		Γ	0,11	0,17	0,24	0,30	0,32	0,34	0,34
		Λ^*	0,61	0,91	0,73	0,43	0,34	0,28	0,23
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$	1,00	1,00	0,73	0,43	0,34	0,28	0,23
		$\Lambda_{\text{с п}}$	0,61	0,91		1,00			
$\Lambda_{\text{геом}}$	0,24	0,35		0,39					
IV	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,53	0,52	0,51
		Γ	0,21	0,35	0,53	0,71	0,80	0,86	0,89
		Λ^*	0,91	0,82	0,66	0,54	0,44	0,38	0,33
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$	0,92	0,82	0,66	0,54	0,44	0,38	0,33
		$\Lambda_{\text{с п}}$	0,99		1,00				
$\Lambda_{\text{геом}}$	0,83		0,84						
	$\frac{d_1}{d} = 0,5$	$q_{\text{пад}0}/q_0$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,54	0,51	0,50

Табл. 2.3 (продолжение)

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$						
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
V	$\frac{d_1}{d} = 0,8$	Γ	0,25	0,35	0,50	0,63	0,69	0,72	0,75
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,89	0,75	0,60	0,45	0,37	0,32	0,27
		$\Lambda_{с.п}$	0,99			1,00	1,00		
		$\Lambda_{геом}$	0,85			0,86			
		$q_{пад} \sigma / q_0$	0,85	0,75	0,64	0,58	0,53	0,50	0,50
VI	$\frac{f}{d} = 0,5$ $P = 0,2$	Γ	0,80	0,70	0,55	0,37	0,28	0,23	0,20
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,04	0,07	0,11	0,14	0,16	0,17	0,18
		$\Lambda_{с.п}$	1,00	0,99	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94
		$\Lambda_{геом}$			1,00	1,00			
		$q_{пад} \sigma / q_0$	0,93	0,90	0,87	0,75	0,70	0,67	0,63
VI	$\frac{b}{a} = 0,2$ $\frac{c}{a} = 1,0$	Γ	0,02	0,04	0,08	0,15	0,21	0,27	0,32
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,97	0,94	0,89	0,80	0,73	0,66	0,56
		$\Lambda_{с.п}$				1,00			
		$\Lambda_{геом}$				0,33			
		$q_{пад} \sigma / q_0$	0,93	0,90	0,87	0,75	0,70	0,67	0,63

Табл. 2.3 (продолжение)

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$						
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
VI	$\frac{b}{a} = 0,5$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,93	0,90	0,85	0,77	0,71	0,67	0,63
		Γ	0,05	0,10	0,18	0,32	0,43	0,52	0,60
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,97	0,95	0,90	0,82	0,76	0,69	0,64
		$\Lambda_{с.п}$				1,00			
		$\Lambda_{геом}$				0,29			
VI	$\frac{c}{a} = 1,0$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,93	0,89	0,84	0,75	0,70	0,65	0,60
		Γ	0,09	0,17	0,31	0,50	0,63	0,73	0,80
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,97	0,95	0,92	0,85	0,78	0,73	0,69
		$\Lambda_{с.п}$				1,00			
		$\Lambda_{геом}$				0,40			
VI	$\frac{c}{a} = 2,0$ $\frac{b}{a} = 2,0$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,95	0,87	0,77	0,67	0,61	0,57	0,54
		Γ	0,17	0,28	0,48	0,68	0,80	0,87	0,92
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,93	0,83	0,81	0,68	0,59	0,53	0,46
		$\Lambda_{с.п}$				1,00			
		$\Lambda_{геом}$				0,57			
VI	$\frac{c}{a} = 5,0$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,86	0,75	0,62	0,57	0,53	0,52	0,50
		Γ	0,34	0,52	0,70	0,85	0,92	0,96	0,98

Табл. 2.3 (продолжение)

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	$\frac{b}{a} = 5,0$	$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,84	0,73	0,58	0,41	0,32	0,24	0,20
	$\frac{c}{a} = 5,0$	$\Lambda_{с.п}$				1,00			
		$\Lambda_{геом}$				0,77			
VII	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,70	0,62	0,57	0,55	0,53	0,51	0,50
		Γ	0,43	0,58	0,71	0,79	0,82	0,84	0,85
	$\delta = 0,1$	$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,72	0,55	0,39	0,27	0,21	0,16	0,14
		$\Lambda_{с.п}$				1,00			
	$\frac{l}{d} = 0,0125$	$\Lambda_{геом}$				0,95			
VIII	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{пад} \sigma / q_0$	0,80	0,60	0,45	0,37	0,31	0,27	0,25
	$\alpha = 30^\circ$	Γ	0,39	0,56	0,75	0,89	0,94	0,97	1,00
		$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,90	0,85	0,72	0,60	0,53	0,47	0,43
		$\Lambda_{с.п} = \Lambda_{геом}$				1,00			

Таблица 2.4. Интегральные структурно-геометрические характеристики ЭФН с возобновляемым геттерным слоем в режиме паузы

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
IX	$\frac{l}{d} = 1,0$	Γ	0,21	0,36	0,56	0,76	0,88	0,96	1,00	
		Λ^*	0,68	0,69	0,69	0,69	0,63	0,53	0,44	
		$q_{а.п0} / \mu_0$			$2,5 \cdot 10^{-4}$					
		$\Lambda_{Эн}$	0,86	0,84	0,80	0,72	0,65	0,53	0,44	
		$\Lambda_{с.п} = \Lambda_{геом}$	0,86	0,88	0,90	0,97	0,98	1,00	1,00	
	$\frac{z_0}{d} = 0,5$	$q_{а.п0} / \mu_0$			$1,4 \cdot 10^{-4}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,58	0,52	0,47	0,39	0,33	0,30	0,27	
		$\Lambda_{с.п} = \Lambda_{геом}$	1,00	1,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		$q_{а.п0} / \mu_0$			$7,8 \cdot 10^{-5}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,33	0,31	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	
X	$\frac{l}{d} = 1,0$	$\Lambda_{с.п} = \Lambda_{геом}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		$q_{а.п0} / \mu_0$			$4,0 \cdot 10^{-5}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{Эн}$	0,33	0,32	0,30	0,27	0,24	0,22	0,21	
		$\Lambda_{с.п} = \Lambda_{геом}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		Γ	0,21	0,36	0,56	0,76	0,88	0,96	1,00	
	$\frac{l_0}{d} = 1,0$	$q_{а.п0} / \mu_0$			$9,2 \cdot 10^{-3}$					

Табл. 2.4 (продолжение)

Расчет- ная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$					
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
		Λ^*	0,60	0,52	0,45	0,39	0,34	0,30
		$\Lambda_{ЭН}$	0,62	0,53	0,46	0,39	0,34	
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	
	$\frac{l_0}{d} = 0,75$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$3,9 \cdot 10^{-3}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,49	0,42	0,35	0,31	0,29	0,27
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	1,00					
	$\frac{l_0}{d} = 0,5$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$1,3 \cdot 10^{-3}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,26	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	1,00					
	$\frac{l_0}{d} = 0,25$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$3,8 \cdot 10^{-4}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,23	0,22	0,19	0,18	0,17	0,16
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	1,00					
	$\frac{l_0}{d} = 0,1$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$1,1 \cdot 10^{-4}$					
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	1,00					
XI	$\frac{l_0}{d} = 0,2$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$2,0 \cdot 10^{-3}$					
		Γ	0,21	0,36	0,56	0,76	0,88	0,96
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15
		$\Lambda_{С.П}$	1,00					
		$\Lambda_{ГЕОМ}$	0,96					
	$\frac{l_0}{d} = 0,5$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$1,0 \cdot 10^{-2}$					
		Γ	0,21	0,36	0,55	0,75	0,87	0,96
		$\Lambda^* = \Lambda_{ЭН}$	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17
		$\Lambda_{С.П}$	1,00					
		$\Lambda_{ГЕОМ}$	0,96					
	$\frac{l_0}{d} = 0,8$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$3,5 \cdot 10^{-2}$					
		Γ	0,20	0,35	0,54	0,74	0,85	0,93
		Λ^*	0,40	0,38	0,34	0,29	0,26	0,24
		$\Lambda_{ЭН}$	1,00					
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	0,96					
XII	$\frac{d_1}{d} = 0,7$	$q_{а.п.0}/\mu_0$	$5,9 \cdot 10^{-2}$					
		Γ	0,19	0,32	0,49	0,67	0,78	0,85
		Λ^*	0,50	0,50	0,51	0,52	0,57	0,59
	$\frac{d_0}{d} = 0,8$	$\Lambda_{ЭН}$	0,94	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89
		$\Lambda_{С.П} = \Lambda_{ГЕОМ}$	0,54	0,56	0,57	0,61	0,65	0,70
			0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88

Табл. 2.4 (продолжение)

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Характеристика	$\beta = 0,05$						
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
	$\frac{d_1}{d} = 0,9$	$q_{\text{алл}}/\mu_0$	$3,6 \cdot 10^{-2}$						
		Γ	0,17	0,29	0,45	0,62	0,71	0,78	0,81
	$\frac{d_0}{d} = 1,0$	Λ^*	0,53	0,54	0,57	0,62	0,68	0,70	0,64
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$ $\Lambda_{\text{с.п}} = \Lambda_{\text{геом}}$	0,77 0,69	0,76 0,70	0,76 0,74	0,76 0,80	0,74 0,87	0,71 0,98	0,66 0,98
XIII	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{\text{алл}}/\mu_0$	$1,2 \cdot 10^{-2}$						
		Γ	0,20	0,34	0,54	0,73	0,85	0,91	0,96
	$\frac{d_0}{d} = 0,2$	Λ^*	0,61	0,64	0,67	0,73	0,76	0,75	0,65
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$ $\Lambda_{\text{с.п}} = \Lambda_{\text{геом}}$	0,98 0,63	0,97 0,65	0,97 0,69	0,96 0,75	0,93 0,83	0,87 0,89	0,76 0,90
XIV	$\frac{l}{d} = 1,0$	$q_{\text{алл}}/\mu_0$	$2,0 \cdot 10^{-2}$						
		Γ	0,20	0,34	0,54	0,73	0,85	0,91	0,96
	$\frac{d_0}{d} = 0,2$	Λ^*	0,44	0,46	0,51	0,58	0,66	0,72	0,80
		$\Lambda_{\text{ЭН}}$ $\Lambda_{\text{с.п}} = \Lambda_{\text{геом}}$	1,00 0,44	1,00 0,46	1,00 0,51	0,99 0,59	0,98 0,68	0,97 0,76	0,94 0,86

Таблица 2.5. Интегральные структурно-геометрические характеристики ЭФН с возобновляемым геттерным слоем в режиме испарения

Расчетная схема	Геометрические соотношения	Γ	Λ^*	$\Lambda_{\text{ЭН}}$	$\Lambda_{\text{с.п}}$	$\Lambda_{\text{геом}}$
IX	$l/d = 1,0$ $z_0/d = 0,3$	0,98	0,52	0,52	1,00	1,00
XII	$l/d = 1,0$	0,78	0,59	0,90	0,68	0,68
XIII	$l/d = 1,0$ $d_0/d = 0,2$	0,86	0,67	0,89	0,85	0,85
XIV	$l/d = 1,0$ $d_0/d = 0,2$	0,82	0,58	0,99	0,59	0,59

Соотношения между плотностями первичного падающего потока молекул, излучаемого направленным источником, в центре входного сечения насоса (q_0') и в узком цилиндрическом пояске у входного сечения ($q'_{\text{пад}0}$) имеют вид:

для точечного источника, излучающего пропорционально кубу косинуса угла отклонения от оси,

$$q'_{\text{пад}0}/q_0' = 32l^5 d / (4l^2 + d^2)^3; \quad (2.41a)$$

для точечного источника с однородным угловым распределением излучаемого потока

$$q'_{\text{пад}0}/q_0' = 2l^2 d / (4l^2 + d^2)^{3/2}. \quad (2.41b)$$

Эти формулы соответствуют расположению источника на продолжении оси ЭФН на расстоянии l от его входного сечения; d — диаметр входного сечения.

Приведенные данные определяют кинетику массообмена в вакуумной системе, эволюцию коэффициентов прилипания и другие параметры, необходимые при проектировании ЭФН и прогнозировании его эксплуатационных параметров. Примеры их использования даны в § 2.5 и в последующих главах.

2.5. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ

Высказанные в предыдущих параграфах соображения лежат в основе алгоритма проектирования оптимального ЭФН. Одновременно этот алгоритм иллюстрирует плодотворность и практические возможности методов детального анализа молекулярных потоков в сложных вакуумных структурах. Необходимо подчеркнуть, что при проектировании оптимального ЭФН неизбежен итерационный подход.

Ключевой этап проектировочного расчета — нахождение пространственного распределения молекулярных потоков и потоков активных центров в полости проектируемого насоса. Анализ этого распределения может быть выполнен уже названным методом угловых коэффициентов либо другими методами — *Монте-Карло, интегрально-кинетическим, эквивалентных поверхностей*. Здесь будем использовать метод угловых коэффициентов. При анализе простых структур с числом поверхностей не более пяти (а именно такой структурой является обычно ЭФН) этот метод предпочтителен: он наиболее нагляден, его применение основано на табулированных структурно-геометрических характеристиках ЭФН и не требует громоздких вычислений. При расчете более сложных структур, например геометрически разветвленных систем на основе электрофизических средств откачки, необходимо переходить к другим методам.

Проектируемый ЭФН представляет собой совокупность нескольких поверхностей с заданными свойствами. В простейшем случае это цилиндрический сосуд с частично экранированным входным сечением и закрытым торцом и источник активных центров. Из камеры на входное сечение насоса $F_{0н}$ падает однородный молекулярный поток с плотностью q_0 . Поток активных центров, эмитируемых поверхностью источника $F_{исп}$, также будем полагать однородным с плотностью μ_0 . Неоднородность распределения молекулярных потоков и потоков активных центров не меняет существа излагаемого метода. Усложняется лишь процедура вычислений. Всем точкам, принадлежащим входному сечению, будем присваивать индекс 1, а поверхности испарителя — индекс "исп".

Распределение молекулярных потоков и потоков активных центров в полости насоса существенно неоднородно. Поэтому, используя дифференциальные структурно-геометрические характеристики, плотность молекулярного потока, падающего на элементарную площадку $dF(\bar{r}_i)$ вокруг точки \bar{r}_i , можно представить в форме

$$q_{пад}(\bar{r}_i) = \int_{\Sigma F} q(\bar{r}_k) \Phi[dF(\bar{r}_i), dF(\bar{r}_k)] dF(\bar{r}_k), \quad (2.42)$$

где $q(\bar{r}_k)$ — плотность "собственного" молекулярного потока, излучаемого площадкой вокруг точки \bar{r}_k ; $\Phi[dF(\bar{r}_i), dF(\bar{r}_k)]$ — коэффициент полного молекулярного обмена между площадками $dF(\bar{r}_k)$ и $dF(\bar{r}_i)$, т. е. относительное количество молекул из числа эмитируемых площадкой $dF(\bar{r}_k)$, которые непосредственно или после переотражения на других поверхностях насоса попадут на площадку $dF(\bar{r}_i)$ (для коэффициентов Φ используется также термин *разрешающие угловые коэффициенты*). В дальнейшем для упрощения записи коэффициент полного молекулярного обмена между площадками $dF(\bar{r}_k)$ и $dF(\bar{r}_i)$ будем записывать в виде $\Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_k)$.

Распределение молекулярных потоков по всем поверхностям насоса определяется решением системы интегральных уравнений вида (2.42).

Точный расчет коэффициентов Φ представляет собой громоздкую вычислительную операцию по определению суммы медленно сходящегося функционального ряда. В инженерной практике для их вычисления разработаны простые приближенные методы, рассмотренные в § 3.2. Пока лишь отметим, что они рассчитываются из системы алгебраических уравнений, в которые входят коэффициенты непосредственного молекулярного обмена** $\varphi[dF(\bar{r}_i), dF(\bar{r}_k)]$. Эти коэффициенты численно равны относительному количеству молекул из числа эмитируемых площадкой $dF(\bar{r}_k)$, которые попадают непосредственно на площадку $dF(\bar{r}_i)$. В дальнейшем для упрощения записи коэффициент молекулярного обмена между площадками $dF(\bar{r}_k)$ и $dF(\bar{r}_i)$ будем записывать в виде $\varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_k)$.

Система уравнений (2.42) в большинстве случаев может быть существенно упрощена, поскольку все "собственные" потоки, кроме "излучаемого" входным сечением молекулярного потока $q_0 F_{0н}$, пренебрежимо малы или вообще отсутствуют. Тогда плотности молекулярных потоков, падающих и поглощаемых площадкой $dF(\bar{r}_i)$, выразятся

* "Собственный" поток в данном контексте — все виды эмитируемых поверхностью молекулярных потоков, не связанные с падающими на нее потоками молекул с других поверхностей. Иными словами, это первичный молекулярный поток с поверхности. К "собственным" относятся потоки тепловой, ионно-, электронно- и фотостимулированной десорбции, потоки молекул газа, инжектируемых с рассматриваемой поверхности в вакуум, и т. п. Для входного сечения условно собственным является молекулярный поток $q_0 F_{0н}$, падающий сквозь него в полость насоса из откачиваемой камеры. Обратный поток, уходящий сквозь входное сечение из полости ЭФН в откачиваемую камеру, формируется молекулами, отраженными сорбирующими поверхностями насоса. Для входного сечения обратный поток является "поглощаемым".

** Используется также термин *геометрические угловые коэффициенты*.

соотношениями

$$q_{\text{пад}}(\bar{r}_i) = q_0 \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1); \quad (2.42a)$$

$$q_{\text{погл}}(\bar{r}_i) = \beta_i q_0 \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1). \quad (2.43)$$

В соответствии с формулой (2.43) плотность потока, "поглощаемого" входным сечением насоса, т. е. потока, отраженного в откачиваемую камеру, составляет

$$q_{\text{погл}}(\bar{r}_1) = q_{\text{отр}} = q_0 \Phi(\bar{r}_1, \bar{r}_1). \quad (2.43a)$$

Коэффициент полного молекулярного обмена $\Phi(\bar{r}_1, \bar{r}_1)$ входящий в эту формулу, есть вероятность возвращения в камеру через входное сечение насоса молекул, ранее влетевших туда через это сечение.

Аналогично определяется пространственное распределение потока активных центров, формируемых на сорбирующих поверхностях. Поскольку для них коэффициенты прилипания близки к 1, промежуточным пренебрежением можно пренебречь. Поэтому плотность потоков активных центров, падающих и конденсирующихся на сорбирующих поверхностях насоса, составляет

$$q_{\text{а.ц}}(\bar{r}_i) = \mu_0 \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_{\text{исп}}). \quad (2.44)$$

Перейдем теперь к изложению собственно алгоритма. Исходными при проектировании насоса являются поток откачиваемого газа Q , его молекулярная масса M , допустимое максимальное давление в откачиваемой камере $p_{\text{макс}}$, тип испарителя и, следовательно, μ_0 и β_0 . Кроме того, обычно бывают заданы поперечный характеристический размер насоса D , его предельная длина $L_{\text{макс}}$ и эксплуатационные ограничения, в частности продолжительность непрерывной эксплуатации насоса $t_{\text{экс}}$. Как правило, на первом этапе проектирования принимают, что откачиваемый газ находится в термодинамическом равновесии со стенками при температуре T_r ; распределение потоков в камере примерно однородное.

Алгоритм проектировочного расчета включает следующие этапы:

1. Определение минимально допустимых быстроты действия

$$S_{\text{н.мин}} > Q/p_{\text{макс}} \quad (2.45)$$

и КЗ насоса

$$\Gamma_{\text{мин}} = S_{\text{н.мин}}/F_{\text{он}}V_0. \quad (2.46)$$

2. Выбор по табличным данным (см. § 2.3) компоновочных схем ЭФН, заведомо обеспечивающих при заданных D и $L_{\text{макс}}$ найденный КЗ и отбор той из них, которая наилучшим образом отвечает совокупности качественных конструктивно-технологических и эксплуатационных критериев. Результатом этого этапа является определение в первом

приближении основных размеров и компоновки проектируемого насоса и оценка по графическим и табличным данным, приведенным в § 2.4, его структурно-геометрических характеристик, включая числовые значения потоков $q_{\text{пад}}$ и $q_{\text{а.ц}}$ и функций $\lambda_{\text{пад}}(\bar{r})$, $\lambda_{\text{погл}}(\bar{r})$ и $\lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r})$.

3. Расчет по результатам этапа 2 номинальных* значений интегральных характеристик насоса. КЗ определяется непосредственно из графических зависимостей на рис. 2.2 и 2.3 либо с учетом (2.43a) рассчитывается по формуле

$$\Gamma_{\text{он}}^I = 1 - q_{\text{отр}}/q_0 = 1 - \Phi_0(\bar{r}_1, \bar{r}_1). \quad (2.47)$$

Быстрота действия определяется из соотношения

$$S_{\text{он}}^I = \Gamma_{\text{он}}^I V_0 (1 - \xi) F_{\text{он}}, \quad (2.48)$$

где ξ — относительная доля площади входного сечения насоса, занятая экраном, который предотвращает поступление активных центров в откачиваемую камеру.

4. Если типовые компоновочные схемы не отвечают специфическим требованиям к проектируемому ЭФН, разработка новой схемы с приближенной оценкой ее интегральных и структурно-геометрических характеристик. Для этого можно использовать метод приведения, изложенный в § 2.3, и сопоставление с наиболее близкими из подобных схем.

5. Уточнение основных размеров насоса и выбор режима работы источника активных центров на основе изложенных в § 2.2 принципов и критериев структурно-геометрической оптимизации ЭФН.

Рассмотрим этот вопрос более подробно. С учетом (2.43) и (2.44) представим критерий оптимизации для элементарной площадки вокруг точки \bar{r}_i , выраженный соотношением (2.1), в виде

$$\frac{\beta_i q_0}{\mu_0} \frac{\Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1)}{\varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_{\text{исп}})} \leq \eta_{\text{кр}}. \quad (2.49)$$

Входящие в эту формулу величины q_0 и μ_0 заданы. Константы β_i и $\eta_{\text{кр}}$ определяются родом газа, температурой и свойствами сорбирующих поверхностей и, следовательно, тоже заданы. Коэффициенты полного молекулярного обмена Φ , как отмечалось ранее, выражаются через коэффициенты φ . Таким образом, вариации размеров насоса отра-

* Номинальными будем называть характеристики, отвечающие начальным, т. е. максимально возможным для данной пары газ-поверхность коэффициентам прилипания на всех сорбирующих поверхностях. В формуле (2.47) это отражено нулевым индексом при коэффициенте Φ . Индексацией римскими цифрами будем отмечать номер приближения при вычислении $\Gamma_{\text{он}}$ и $S_{\text{он}}$.

жаются на его структурно-геометрических характеристиках только через коэффициенты непосредственного молекулярного обмена φ . Эти последние есть функции формы, размеров и взаимной ориентации участвующих в молекулярном обмене поверхностей; для наиболее распространенных типов ЭФН они представлены в § 3.2.

Графическую интерпретацию изменения φ с координатой области осаждения активных центров для ЭФН по схемам IX–XIV дают кривые на рис. 2.8. Для определения φ их помощью абсолютной скорости осаждения на произвольной элементарной площадке ордината этой площадки должна быть умножена на коэффициент непосредственного молекулярного обмена для нулевой зоны $\varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})$ и плотность потока активных центров на поверхности их источника μ_0 . Числовое значение $\varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})$ для ряда геометрических структур ЭФН представлено в табл. 2.4; (строки $q_{а.ц0}/\mu_0$).

Критерий оптимизации (2.49) можно записать в общем виде для насоса в целом, используя введенные в § 2.2 функции $\lambda_{пад}(\bar{r}_i)$, $\lambda_{погл}(\bar{r}_i)$ и $\lambda_{а.ц}(\bar{r}_i)$.

Вначале рассмотрим режим непрерывного осаждения активных центров на сорбирующих поверхностях. Введем нормированные по всем поверхностям функции $\tilde{q}_{пад}(\bar{r})$ и $\tilde{q}_{а.ц}(\bar{r})$, отвечающие условиям:

$$\tilde{q}_{пад}(\bar{r}) = \frac{1}{F_{\Sigma}} \int_{\Sigma F} q_{пад}(\bar{r}_i) dF_i = \frac{q_{пад}(\bar{r}_0)}{F_{\Sigma}} \int_{\Sigma F} \lambda_{пад}(\bar{r}_i) dF_i, \quad (2.50)$$

$$\tilde{q}_{а.ц}(\bar{r}) = \frac{1}{F_{\Sigma}} \int_{\Sigma F} q_{а.ц}(\bar{r}_i) dF_i = \frac{q_{а.ц}(\bar{r}_0)}{F_{\Sigma}} \int_{\Sigma F} \lambda_{а.ц}(\bar{r}_i) dF_i. \quad (2.51)$$

Интегрирование здесь ведется по всем поверхностям проектируемого насоса ΣF общей площадью F_{Σ} . В соответствии с (2.42а) и (2.44) $q_{пад}(\bar{r}_0) = q_0 \Phi(\bar{r}_0, \bar{r}_1)$ и $q_{а.ц}(\bar{r}_0) = \mu_0 \varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})$. Теперь критерий (2.49) для насоса в целом можно представить как

$$\tilde{c}(\bar{r}) = \frac{\tilde{q}_{пад}(\bar{r})}{\tilde{q}_{а.ц}(\bar{r})} = \frac{q_0}{\mu_0} \frac{\Phi(\bar{r}_0, \bar{r}_1)}{\varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})} \frac{\int_{\Sigma F} \lambda_{пад}(\bar{r}_i) dF_i}{\int_{\Sigma F} \lambda_{а.ц}(\bar{r}_i) dF_i} \leq c_{кр}. \quad (2.52)$$

Радиус-вектором \bar{r}_0 в формулах (2.50) – (2.52) обозначены точки, принадлежащие нулевой зоне насоса в смысле, ясном из § 2.2. Напомним, что в этой зоне $q_{а.ц0} = \kappa q_{пад0}$. Критическое значение $c_{кр}$ определяется из экспериментальных кривых, подобных приведенным на рис. 1.8.

Используя найденный интегральный критерий (2.52) и заданный поток Q , нетрудно в обобщенной форме записать условие, которому должны отвечать параметры и характеристики оптимизируемого ЭФН. Поскольку в (2.52) $q_0 = Q/(1 - \xi)F_{он}$, это условие имеет вид

$$\frac{Q}{\mu_0 c_{кр}} \frac{\Phi_0(\bar{r}_0, \bar{r}_1)}{(1 - \xi)F_{он} \varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})} \times \frac{\int_{\Sigma F} \lambda_{пад}(\bar{r}_i) dF_i}{\int_{\Sigma F} \lambda_{а.ц}(\bar{r}_i) dF_i} \leq 1. \quad (2.53)$$

Для более наглядной интерпретации полученного условия (2.53) выразим его в следующем виде:

$$q_{0макс} = \frac{Q_{макс}}{(1 - \xi)F_{он}} \leq \mu_0 c_{кр} \Lambda; \quad (2.54)$$

$$\Lambda = \frac{\varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп}) \int_{\Sigma F} \lambda_{а.ц}(\bar{r}_i) dF_i}{\Phi_0(\bar{r}_0, \bar{r}_1) \int_{\Sigma F} \lambda_{пад}(\bar{r}_i) dF_i}. \quad (2.55)$$

Здесь $Q_{макс}$, $q_{0макс}$ – максимальный газовый поток, который может откачиваться проектируемым насосом при фиксированных значениях μ_0 и $\lambda_{а.ц}(\bar{r})$, и его плотность соответственно. Числовое значение Λ зависит только от структурно-геометрических характеристик ЭФН и коэффициентов прилипания. Легко видеть, что при заданной плотности потока эмитируемых активных центров и для данной пары газ–металл максимальная производительность насоса тем выше, чем больше Λ . Это позволяет интерпретировать ее как *интегральный коэффициент производительности*, т. е. универсальный показатель структурно-геометрического совершенства насоса в режиме непрерывного осаждения активных центров. Оптимизация насоса на этом этапе его проектирования, следовательно, сводится к машинному многопараметрическому анализу функции Λ и отбору геометрических соотношений, отвечающих ее максимизации.

Обратим внимание на одну важную деталь. Найденные оптимальные геометрические соотношения не обязательно тождественны соотношениям, отвечающим номинальным значениям $S_{он}$ и $\Gamma_{он}$ и абсолютному

максимуму коэффициента производительности. Совпадение тех и других геометрических соотношений возможно лишь в том случае, если нулевая зона ЭФН выбрана в той его области, где

$$c(\bar{r}_i) = c(\bar{r}) |_{\text{макс}}. \quad (2.56)$$

Однако при таком выборе нулевой зоны будет заведомо мал интегральный коэффициент $\Lambda'_{\text{ЭН}}$, и проектируемый насос будет иметь низкую энергетическую эффективность. Поэтому геометрические соотношения следует выбирать с учетом приоритетности используемых критериев. Если главную роль играет требование разработать ЭФН с максимально возможными при заданном D производительностью и быстротой действия, то нулевая зона должна выбираться в области насоса, отвечающей условию (2.56). Если же приоритетным требованием является экономичность проектируемого насоса, то нулевую зону надо выбирать в той области насоса, где плотность падающего молекулярного потока максимальна.

Перейдем теперь к насосам с заранее сформированным слоем активных центров. Для испарительных насосов это режим паузы между двумя последовательными циклами напыления, на протяжении которой геттерная пленка постепенно насыщается поглощаемым газом.

Количество газа, поглощенного единицей площади сорбирующей поверхности вокруг точки \bar{r}_i за время Δt , с учетом соотношения (2.43) составляет

$$G_0 = q_{\text{погл}}(\bar{r}_i) \Delta t = \beta_i q_0 \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1) \Delta t. \quad (2.57)$$

Как видно из формулы (1.6а) и экспериментальных кривых на рис. 1.5 и 1.6, коэффициенты прилипания вплоть до некоторого критического значения $G_{0\text{кр}}$ практически не зависят от количества поглощенного газа и сохраняют свои начальные значения β_0 . Временная граница, за которой коэффициент β начинает падать, равна

$$t_{\text{кр}} = G_{0\text{кр}}(\bar{r}_i) / \beta_{0i} q_0 \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1). \quad (2.58)$$

При продолжении откачки коэффициенты прилипания резко падают.

Введем нормированную функцию

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{\text{погл}}(\bar{r}) &= \frac{1}{F_{\text{с.п}} \Sigma} \int_{\Sigma F_{\text{с.п}}} q_{\text{погл}}(\bar{r}_i) dF_i = \\ &= \frac{q_{\text{погл}}(\bar{r}_0)}{F_{\text{с.п}} \Sigma} \int_{\Sigma F_{\text{с.п}}} \lambda_{\text{погл}}(\bar{r}_i) dF_i. \end{aligned} \quad (2.59)$$

Интегрирование здесь ведется по всем сорбирующим поверхностям проектируемого насоса $\Sigma F_{\text{с.п}}$ общей площадью $F_{\text{с.п}} \Sigma$. Радиус-вектором \bar{r}_0 обозначены точки, принадлежащие нулевой зоне насоса в смысле, ясном из § 2.2.

Теперь зависимость (2.58) можно обобщить для насоса в целом, записав ее в виде

$$t_{\text{кр}} = \frac{G_{0\text{кр}}}{\beta_0 q_0 \Phi(\bar{r}_0, \bar{r}_1)} \frac{F_{\text{с.п}} \Sigma}{\int_{\Sigma F_{\text{с.п}}} \lambda_{\text{погл}}(\bar{r}_i) dF_i} = \frac{G_{0\text{кр}}}{q_0} \Lambda'. \quad (2.60)$$

Числовое значение Λ' зависит только от структурно-геометрических характеристик проектируемого насоса и коэффициентов прилипания. Видно, что при заданной плотности откачиваемого газового потока для данной пары газ-металл цикл поглощения газа с начальной скоростью тем продолжительнее, чем больше функция Λ' . При фиксированной продолжительности цикла может быть пропорционально увеличена плотность откачиваемого потока q_0 , т. е. производительность насоса. Это дает основание трактовать функцию Λ' как универсальный показатель структурно-геометрического совершенства насоса, рассматривая ее в качестве *интегрального коэффициента производительности* ЭФН с заранее сформированными сорбирующими поверхностями.

Следовательно, оптимизация насоса сводится к машинному многопараметрическому анализу функции Λ' и отбору геометрических соотношений, отвечающих ее максимизации. Этот экстремум в отличие от ранее обсуждавшейся ситуации для ЭФН с непрерывным осаждением активных центров дает абсолютный максимум интегральных характеристик.

Результатом данного этапа является определение во втором приближении компоновочной схемы и основных размеров насоса, вычисление на этой основе его уточненных структурно-геометрических характеристик и их сопоставление с принятыми на этапе 2. В случае значительного расхождения необходимо повторить итерационный процесс в поисках третьего приближения.

6. Расчет по результатам этапа 5 уточненных номинальных значений коэффициента захвата $\Gamma_{0\text{н}}^{\text{II}}$ [см. (2.47)] и быстроты действия $S_{0\text{н}}^{\text{II}}$ [см. (2.48)].

7. Окончательный выбор конструктивно-технологических параметров и расчет основных кинетических и эксплуатационных характеристик насоса.

Критические степени насыщения $s_{\text{кр}}$ и $G_{0\text{кр}}$ для разных газов могут не совпадать; они меняются также при эволюции теплофизических режимов и переходе к откачке многокомпонентных газовых смесей. Поэтому необходим многовариантный расчет ЭФН с последующим отбором проектно-конструкторских решений, отвечающих наиболее жестким условиям.

В § 3.2 изложенный алгоритм детализирован на уровне, необходимом для выполнения инженерно-технических расчетов.

ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ И ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ С ТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ ГЕТТЕРНЫХ ПЛЕНОК

3.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПАРИТЕЛЕЙ

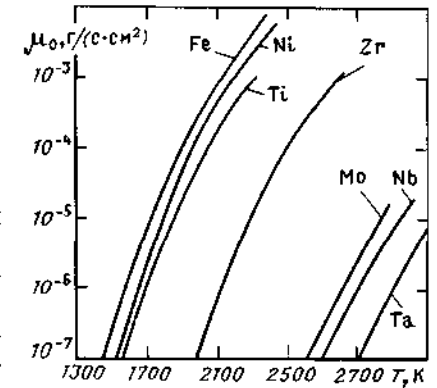
По разнообразию конструктивно-физических решений насосы с термическим напылением геттерных пленок — наиболее многочисленный класс современных электрофизических средств откачки. Из нескольких десятков разработанных модификаций в промышленных масштабах выпускается лишь сравнительно небольшая часть. Требуемая скорость испарения геттера зависит от газовой нагрузки и необходимой степени разрежения. Ее можно варьировать от максимальной практически до нуля, уменьшая подводимую мощность и соответственно температуру геттера (табл. 3.1, рис. 3.1).

Режим пониженной мощности, однако, энергетически невыгоден. Основную долю энергетических затрат в испарителях составляет поток лучистой энергии с поверхности. Мощность этого потока в расчете на единицу скорости испарения резко падает с ростом температуры геттера. Поэтому энергетическая эффективность испарителей, т. е. скорость испарения геттера на единицу вводимой мощности, возрастает в ряду резистивные твердофазные испарители ($T_p \approx 1500$ К) → жидкофазные испарители с нагревом электронным пучком ($T_p \approx 2100$ К) → дуговые испарители ($T_p \approx (5 \div 6) \cdot 10^3$ К) → лазерные испарители ($T_p \approx 10^4$ К).

Таблица 3.1. Усредненные характеристики промышленных испарителей различных типов (геттер—титан)

Тип испарителя	Удельная скорость испарения, $g/(c \cdot cm^2)$	Энергетическая эффективность, $10^{-7} g/(c \cdot Вт)$	Коэффициент использования геттера
Твердофазный:			
резистивный прямонакальный	$0-10^{-5}$	1-2	0,3-0,7
резистивный с косвенным накалом	$0-2 \cdot 10^{-5}$	0,5-1,5	0,6-0,7
с нагревом электронным пучком	$0-2 \cdot 10^{-5}$	0,3-1,5	0,6-0,9
Жидкофазный электронно-лучевой	$0-10^{-3}$	1-3	0,8-0,9

Рис. 3.1. Удельная скорость испарения металлических геттеров в зависимости от температуры



Рабочие температуры указаны для титана. В насосах с регулируемой скоростью напыления энергетически предпочтителен периодический режим: испаритель включают на короткое время при наибольшей температуре. Продолжительность испарения зависит от площади и температуры запыляемой поверхности (поверхности напыления), скорости испарения и рода откачиваемого газа. Длительность паузы лимитируется насыщением геттерного слоя.

Переход к периодическому режиму испарения целесообразен обычно при давлениях, меньших 10^{-4} Па. К примеру, для электронных накопителей и других сверхвысоковакуумных установок, работающих без напуска газа, типичен режим разового испарения продолжительностью несколько минут в течение 20–30 сут. Газовую нагрузку в таких установках составляют лишь потоки тепловой и стимулированной десорбции.

На скорость испарения геттера наряду с температурой влияют также состав и молекулярная концентрация откачиваемых газов. При температурах 1400–1600 К титан активно сорбирует азот и на его поверхности формируется устойчивая пленка нитридов, снижающая скорость испарения. Сходные процессы протекают и при работе испарителя в среде кислорода и оксида углерода. Эти процессы ограничивают допустимое давление активных газов при эксплуатации испарителей значением 10^{-2} Па. В инертных газах включение испарителей возможно при гораздо более высоких давлениях.

Основным функциональным элементом ГН и ИГН с термическим напылением геттерных пленок является испаритель. В современных насосах используются как сублимационные испарители, в которых температура распыляемого геттера ниже точки плавления, так и жидкофазные испарители. Испаритель определяет максимальную производительность насоса и его ресурс. К числу важнейших параметров испарителей относятся: скорость испарения геттера и пределы ее регулирования; предельно допустимое давление, при котором возможно включение испарителя; энергетическая эффективность; коэффициент использования геттера, равный отношению массы испаренного геттера к концу эксплуатации испарителя к его начальной массе (см. табл. 3.1).

Одна из важнейших вакуумных характеристик геттера — насыщенность растворенными газами (табл. 1.6, 3.2). Как видно, далеко не все технологии позволяют получать титан с приемлемыми по этому критерию свойствами. Наименьшее количество примесей содержит иодидный титан.

Широкое распространение в современных промышленных насосах получили твердофазные резистивные испарители. В отечественных насосах типа ГИН и НИБ используется прямонакальный испаритель из биметаллической проволоки: на молибденовый kern диаметром d_0 иодидным методом осажден слой титана толщиной $\delta = 0,5d_0$. Выпускаемая проволока имеет диаметры $d_0 = 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ мм; отклонение внешнего диаметра от номинального размера может достигать 20%. Рабочий ток испарителя — до 200 А; наибольшая эксплуатационная скорость испарения геттера достигается при подводимой мощности около 18 Вт/см².

Ряд зарубежных фирм выпускает резистивные проволочные испарители из титан-никелевых и титан-молибденовых сплавов. По сравнению с биметаллическими испарителями, имеющими тугоплавкий kern и титановое покрытие либо навитую титановую проволоку, такие испарители более однородны и поэтому меньше подвержены перегреву и оплавлению; коэффициент использования титана достигает 0,7. Их включение возможно при давлении до 10 Па.

Испаритель фирмы PERKIN-ELMER представляет собой четыре спиральки из сплава 85% Ti + 15% Mo, навитые из проволоки диаметром 2,1 мм и установленные на фланце с токоподводами. Длина проволоки 219 мм, ее масса 3,4–3,6 г, из которых 1,5 г — масса распыляемого титана; рабочий ток 55 А при напряжении 8 В. Большой запас распыляемого геттера (до 3 г) имеют испарители аналогичной конструкции,

выпускаемые фирмой BALZERS. Их длина 313–430 мм, количество спиралек на фланце — три, максимальная скорость испарения — до 6×10^{-2} мг/с, рабочий ток 30–50 А при напряжении 3–6 В. Сходные характеристики имеют проволочные испарители фирмы LEYBOLD-HERAEUS и ряда других фирм.

Перспективно использование проволочных испарителей из сплава 94% Ti + 6% Pd. Каталитическое действие палладия, в особенности при откачке водорода, позволяет снизить предельное остаточное давление откачиваемых газов.

Резистивные прямонакальные испарители предельно просты по конструкции и схеме электропитания, однако имеют низкий коэффициент использования и малый ресурс. Несколько лучшими эксплуатационными характеристиками обладают резистивные испарители косвенного нагрева. Полая цилиндрическая или сферическая оболочка из геттерного материала либо из биметалла нагревается лучистым потоком, эмитируемым проволочным нагревателем в ее полости. Типичная модель этого типа — испаритель Ti-BALL™, выпускаемый фирмой VARIAN. Испаритель представляет собой титановую сферу диаметром 32 мм, в полости которой установлен нагреватель. К сфере приварены проволочные держатели, установленные на резьбовой втулке; внутри втулки проходит токопровод. Втулка имеет резьбовое соединение с трубчатой стойкой, закрепленной на фланце с токоподводами. При выходе испарителя из строя демонтируется фланец и производится замена втулки с испарителем. Начальная масса титановой сферы 50 г, из которых 35 г — масса испаряемого геттера; полная масса втулки и испарителя 0,57 кг. Скорость испарения определяется подводимой мощностью и режимом нагрева; она может регулироваться в пределах от $3 \cdot 10^{-3}$ до 0,15 мг/с, что соответствует ресурсу

Таблица 3.2. Среднее содержание, $10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$, газовых примесей в промышленном титане, полученном разными методами

Метод получения, марка титана	Водород	Азот	Кислород
Гидридно-кальциевый:			
ПТК	46,6	0,7	—
ИМП-1А	—	0,8	2,1
Магниево-термический:			
ВТ-1-1	1,6	0,5	1,2
ВТ-1-0	1,3	0,4	1,0
ВТ-1-00	1,1	0,4	0,8
Лента, прокатанная из порошка	0,4	$5 \cdot 10^{-2}$	0,5
Вторичная рафинировка	1,3	$9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Иодидный	—	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$

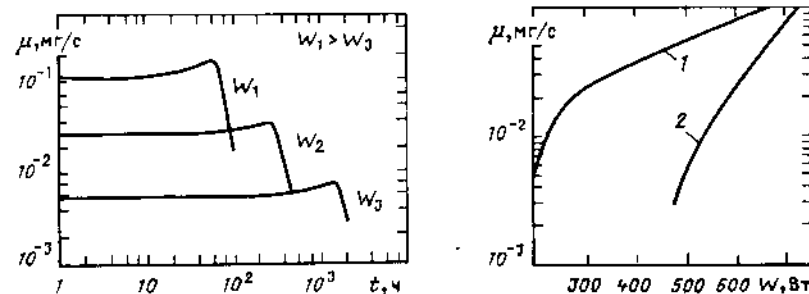


Рис. 3.2. Скорость испарения титана в зависимости от продолжительности работы испарителя Ti-BALL™ при различной мощности

Рис. 3.3. Скорость испарения титана в испарителе Ti-BALL™ в зависимости от подводимой мощности для двух режимов нагрева — циклического с подводом от 200 до 750 Вт (кривая 1) и непрерывного (кривая 2)

от 3500 до 70 ч (рис. 3.2, 3.3). Максимальное рабочее давление зависит от скорости испарения геттера μ и для стандартной газовой среды составляет 0,3 Па ($\mu=0,15$ мг/с), 3 Па ($\mu=0,06$ мг/с), 7 Па ($\mu=0,03$ мг/с). В среде аргона испаритель может эксплуатироваться при давлении до 10 Па.

Блоком питания и управления и таймером задают рабочий цикл и обеспечивают контроль за скоростью и суммарной продолжительностью испарения. Она может устанавливаться в пределах от 3 до 12 мин; цикличность — от 15 мин до 24 ч. В паузе на испаритель подается мощность 200 Вт.

Фирмой VARIAN выпускается также аналогичный испаритель меньших размеров с полезным запасом титана 15 г — MINI-Ti-BALL™. Собственно испаритель в этой конструкции имеет полусферическую форму диаметром 21 мм. Основные характеристики испарителя таковы: полная длина 229 мм, максимальные потребляемая мощность и рабочий ток 380 Вт и 50 А, масса испарителя в целом 0,91 кг, в том числе масса сменной части 0,45 кг. Испаритель взаимозаменяем с резистивными прямонакальными испарителями этой же фирмы и может быть скомпонирован с диодными и триодными МЭРН ее производства.

Скорость испарения геттера в твердофазных испарителях обычно контролируют по подводимой мощности или рабочему току в соответствии с зависимостями типа представленных на рис. 3.3, 3.4. Однако размеры собственно испарителя и свойства геттера в процессе эксплуатации довольно заметно меняются: сильно и к тому же неравномерно уменьшается диаметр проволочных прямонакальных испарителей, нарушается форма и структура поверхности резистивных испарителей косвенного накала, в результате осаждения геттерных пленок и насыщения геттера откачиваемыми газами меняются теплофизические характеристики. Это приводит к нарушению оптимальных тепловых режимов и заставляет корректировать подводимую мощность, особенно в конце срока службы испарителя.

Для непрерывного слежения за тепловым режимом испарителя используют несколько способов. Наилучшие результаты дают прямые измерения скорости испарения (осаждения) атомов геттера. Применяемые для этого ионизационные или кварцевые измерители, однако, сравнительно громоздки и имеют низкую чувствительность. Более удобны косвенные методы, основанные на эффекте термоэлектронной эмиссии.

Один из методов основан на подобию температурных зависимостей скорости испарения и тока термоэлектронной эмиссии нагретого тела (рис. 3.5). Контролируя ток эмиссии, можно стабилизировать в течение длительного времени скорость испарения, увеличив тем самым коэффициент использования геттера. Для измерения термоэлектронного тока вокруг испарителя устанавливают сетчатый коллектор, на который для снятия с испарителя полного тока эмиссии подан поло-

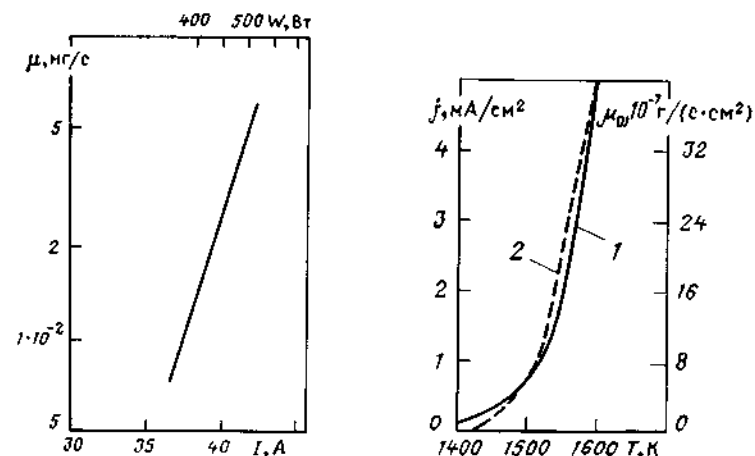


Рис. 3.4. Скорость испарения титана в резистивном испарителе косвенного накала модели TSC-20 в зависимости от рабочего тока и мощности нагревателя. Запас титана в испарителе 20 г, скорость испарения в рекомендуемом режиме 0,01 мг/с

Рис. 3.5. Температурные зависимости плотности тока термоэлектронной эмиссии j (1) и удельной скорости испарения титана μ_0 (2) для титан-молибденовой проволоки

жительный потенциал 1–1,5 кВ. Применение этого метода в промышленных проволочных испарителях обеспечивает устойчивую эксплуатацию насосов при коэффициенте использования геттера до 0,6; колебания скорости испарения не превышают 20% номинального значения.

Еще лучшую воспроизводимость дает метод, основанный на эффекте умножения термоэлектронного тока в активированных биметаллических катодах; активирующую роль играет напыляемая пленка. Для таких катодов справедливы соотношения

$$k = \frac{j_{W-Ti}}{j_W} = \frac{A_{W-Ti}}{A_W} \exp\left(-\frac{C}{T}\theta\right); \quad (3.1)$$

$$\theta = Bq_{Ti} / (1 + Bq_{Ti}). \quad (3.2)$$

Здесь j_{W-Ti} , j_W — плотности тока термоэлектронной эмиссии с поверхности вольфрама, покрытой слоем адсорбированных атомов титана, и чистой вольфрамовой нити, A , B , C — константы; T — температура вольфрама, соответствующая равновесной концентрации адсорбированных атомов титана при плотности потока осаждаемых атомов q_{Ti} . Выбирая температуру T таким образом, чтобы равновесный коэффициент заполнения подложки θ отвечал требованию $Bq_{Ti} \ll 1$, можно

добиться квазилинейной зависимости между коэффициентом умножения термоэлектронного тока k и плотностью потока осаждаемых атомов титана q_{Ti} .

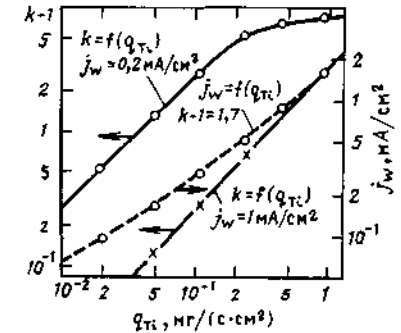
Таким образом, простейший измеритель представляет собой диод с вольфрамовым катодом, доступным для испаряемых атомов. Однако точность такого измерителя невысока из-за температурной нестабильности. Значительно лучшие характеристики имеет дифференциальная измерительная схема. Наряду с основным измерительным диодом устанавливается ему подобный, но полностью экранированный от паров титана; катоды обоих диодов идентичны и образуют последовательную электрическую цепь. Мерой плотности потока осаждаемых атомов может быть разность токов термоэлектронной эмиссии измерительного и экранированного диодов или отношение этих токов.

Кривые на рис. 3.6 иллюстрируют результаты, полученные на экспериментальном образце измерителя при различной плотности термоэлектронного тока экранированного диода j_w . Штриховой линией показан ход требуемого изменения уставки этой плотности, обеспечивающего постоянство коэффициента умножения q_{Ti} ; кривая построена для произвольно выбранного соотношения $k - 1 = 1,7$. Видно, что линейность зависимости $k = f(q_{Ti})$ сохраняется в широком интервале значений q_{Ti} . Давление в исследованном диапазоне $10^{-5} - 10^{-1}$ Па на метрологические характеристики измерителя не влияет; его инерционность оценивается временной задержкой 0,5–5 с, уменьшающейся с увеличением q_{Ti} . Температура катодов сравнительно низка (1700–2100 К), что обеспечивает их долговечность.

Наилучшие энергетические характеристики и максимальный коэффициент использования геттера имеют электронно-лучевые испарители. В первых отечественных насосах на их базе (сорбционный титановый охлаждаемый насос модели СТОН и сверхвысоковакуумный агрегат на его основе АВТО-20М) использован жидкофазный электронно-лучевой испаритель, в котором необходимый ресурс обеспечивается периодической подачей в зону расплава титановой проволоки. Испаритель представляет собой электронную пушку с прямокальным вольфрамовым катодом и титановым анодным электродом-мишенью, помещенную в поперечное магнитное поле. Ускоряющее напряжение составляет несколько киловольт. Магнитное поле, формируемое с помощью электромагнита, поворачивает электронный пучок почти на 270° . Это позволяет полностью вынести катод и электродную систему пушки из зоны напыления титана, повысив, тем самым, их срок службы и эксплуатационную надежность. Титановая проволока диаметром 1,5 мм размещена на барабане механизма подачи; ее запаса достаточно для работы испарителя в течение нескольких тысяч часов.

Испаритель монтируется на фланце в горизонтально ориентированном патрубке по оси насоса на крышке прогретаемого корпуса. Для

Рис. 3.6. Коэффициент умножения термоэлектронного тока при различных значениях его плотности в зависимости от плотности потока падающих на катод атомов титана



защиты откачиваемой камеры от запыления геттером входное сечение насоса экранируется диском, установленным непосредственно над испарителем. Титан конденсируется на стенках цилиндрического двухстенного вкладыша, коаксиального корпусу; в полость вкладыша из накопителя подается жидкий азот. При скорости испарения титана 0,1 мг/с быстрота действия насоса составляет соответственно 30 (H_2) и 10 (N_2, O_2) m^3/c . Предельное остаточное давление насоса после высокотемпературного обезгаживания – менее 10^{-9} Па; энергопотребление 1,7 кВт; расход жидкого азота при включенном испарителе – около 4 $dm^3/час$. Агрегат АВТО-20М на базе насоса СТОН включал паромасляный диффузионный насос с азотной ловушкой для откачки инертных газов; быстрота действия по аргону 90 dm^3/c . Для зависимости быстроты действия агрегата от давления откачиваемых газов характерно широкое плато; падение быстроты действия начинается лишь с давлений $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па (H_2) – $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($N_2, O_2, воздух$).

В моделях электронно-лучевых испарителей фирмы PERKIN-ELMER применены стержневые аноды из титана. Их торец нагревается сфокусированным электронным пучком, эмитируемым неподвижным накаленным катодом. По мере испарения торца стержня перемещаются с помощью винтового механизма, так что взаимное положение анода и катода остается неизменным. Это обеспечивает эффективную фокусировку электронного пучка и поддержание нужной скорости испарения при относительно низких затратах мощности. При максимальной скорости испарения титана 0,14 мг/с (модель EBS) и 0,3 мг/с (модель BTS) испарители потребляют соответственно 0,5 и 2 кВт; полезный запас титана составляет 40 и 500 г. Испаритель BTS предназначен для насосов с быстротой действия до $10^2 m^3/c$. Его максимальный диаметр 203 мм, полная длина 800 мм, в том числе около 400 мм в вакууме.

Твердофазные испарители с нагревом рассеянным электронным пучком описаны в § 3.4.

3.2. ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ

Излагаемая методика детализирует изложенный в § 2.5 алгоритм проектирования ЭФН в приложении к испарительным насосам.

Будем полагать, что на предыдущих этапах проектирования с учетом эксплуатационных условий, конструктивных соображений и на

основе предварительных количественных оценок уже выбраны тип испарителя, компоновочная схема и некоторый интервал геометрических соотношений (размеров), в который необходимо "уложить" конструируемый насос. Целью расчета будет уточнение этих соотношений и определение основных характеристик насоса — быстроты действия и ее кинетических зависимостей, предельно достижимого давления, оптимального временного режима и ресурса испарителя и т. п.

В процессе расчета необходимо вычислить пространственное распределение молекулярных потоков, потоков атомов геттера, коэффициенты непосредственного и полного молекулярного обмена и ряд других структурно-геометрических характеристик проектируемого насоса. Большая часть искомых характеристик имеет непрерывное распределение по поверхностям насоса, поэтому математически безупречный подход к этим вычислениям должен опираться на довольно громоздкое решение системы интегральных или интегродифференциальных уравнений. Цена достигаемого при строгом подходе эффекта с практической точки зрения непомерно высока.

Чтобы избежать вычислительных трудностей, заменим непрерывное распределение потоков по поверхностям насоса дискретным. Разделим эти поверхности на несколько зон; в пределах каждой зоны будем принимать распределение молекулярных потоков и потоков атомов геттера однородным. Это позволит резко упростить задачу, перейдя от интегродифференциальных уравнений к алгебраическим.

Разбиение на зоны должно осуществляться таким образом, чтобы требование однородности распределения с некоторым приближением действительно выполнялось. Для компоновочных схем, приведенных в табл. 2.3 и 2.4, это можно сделать очень просто: каждой зоне должен соответствовать участок, в пределах которого $\lambda_{\text{пад}}(\bar{r}) \approx \text{const}$ и $\lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}) \approx \text{const}$. Для иных компоновочных схем это делается на основе эвристических соображений и уточняется на последующих этапах расчета. Число зон должно быть достаточно велико в местах резкого изменения геометрической структуры — сужения, расширения, поворотах; точность расчетов с увеличением числа зон возрастает. Стремление повысить точность, увеличивая число зон, должно быть, однако, разумным. Число уравнений в решаемой системе возрастает как квадрат числа зон, тогда как погрешность в первом приближении лишь обратно пропорциональна ему.

Во всех дальнейших записях для сохранения единства с символикой, принятой в § 2.5, принадлежность участка поверхности к i -й зоне будет обозначаться символом \bar{r}_i .

Распределение плотностей потоков. Искомые плотности молекулярных потоков определяются решением системы уравнений вида

$$q_{\text{пад}}(\bar{r}_i) = \sum_{k=1}^n q(\bar{r}_k) \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_k), \quad (3.3)$$

где $q_{\text{пад}}(\bar{r}_i)$ — плотность потока, падающего на i -ю зону; $q(\bar{r}_k)$ — плотность собственного молекулярного потока, излучаемого k -й зоной; n — общее число зон; $\Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_k)$ — локальный коэффициент полного молекулярного обмена между зонами \bar{r}_i и \bar{r}_k с учетом возможных переотражений молекул на других (j -х) поверхностях. Локальные коэффициенты рассчитываются из системы алгебраических уравнений вида

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_k) &= \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_k) + \sum_{j=1}^n (1 - \beta_j) \varphi_{ij} \Phi(\bar{r}_j, \bar{r}_k) = \\ &= \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_k) + \sum_{j=1}^n (1 - \beta_j) \varphi_{jk} \Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_j), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где φ — коэффициент непосредственного молекулярного обмена между соответствующими зонами; β_j — коэффициент прилипания газа на j -й зоне насоса.

Коэффициенты непосредственного молекулярного обмена различных рангов вычислены и в большинстве случаев представлены в аналитической форме практически для всех комбинаций элементарная площадка — элементарная площадка, элементарная площадка — поверхность конечных размеров и поверхность — поверхность, которые могут встретиться при проектировании ЭФН (табл. 3.3).

Плотности молекулярного потока, падающего на i -ю зону и поглощаемого ею, выражаются соотношениями (2.42а) и (2.43), причем

$$\Phi(\bar{r}_i, \bar{r}_1) = \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_1) + \sum_{j=1}^n (1 - \beta_j) \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \Phi(\bar{r}_j, \bar{r}_1). \quad (3.5)$$

Плотность потока, возвращающегося из насоса в откачиваемую камеру, рассчитывается по формуле (2.43а), а распределение плотности атомов геттера, напыляемых на сорбирующие поверхности, — по формуле (2.44).

На этом этапе расчета при вычислении коэффициентов Φ , функций $q_{\text{пад}}(\bar{r}_i)$ и производных от них функций коэффициенты прилипания на всех сорбирующих поверхностях β_i принимаются одинаковыми и равными их начальному значению β_0 .

Таким образом, к концу первого этапа проектирования для обоих режимов эксплуатации насосов — непрерывного напыления геттерных пленок и паузы — становятся известны ориентировочные значения плотностей падающих и поглощаемых молекулярных потоков на всех поверхностях, примерное распределение потоков напыляемых атомов геттера, производные функции $\lambda_{\text{пад}}(\bar{r}_i)$, $\lambda_{\text{полг}}(\bar{r}_i)$, $\lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}_i)$ и коэффициенты φ и Φ . Последние наименее чувствительны к структур-

Таблица 3.3. Расчетные формулы для вычисления коэффициентов непосредственного молекулярного обмена в типовых структурах ЭФН

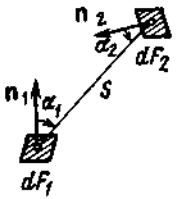
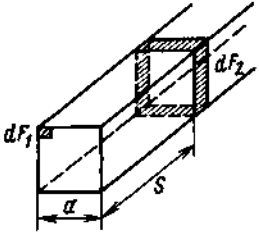
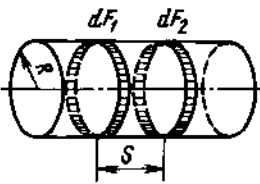
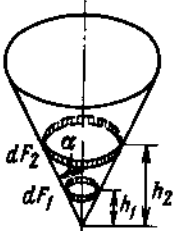

Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Две произвольно ориентированные элементарные площадки</p> $d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{\cos\alpha_1 \cos\alpha_2}{\pi s^2} dF_2$
	<p>Расположенный в углу элемент торца канала квадратного сечения и элемент поверхности канала</p> $d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{as}{\pi(a^2+s^2)^{3/2}} \times \left[\arctg \frac{a}{\sqrt{a^2+s^2}} + \arctg \frac{a\sqrt{a^2+s^2}}{s^2+2a^2} \right] ds$
	<p>Два кольцевых элемента на внутренней поверхности прямого кругового цилиндра</p> $d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{1}{2R} \left[1 - \frac{s(s^2+6R^2)}{(s^2+4R^2)^{3/2}} \right] ds$
	<p>Два кольцевых элемента на внутренней поверхности прямого кругового конуса</p> $d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{\cos^2\alpha}{2h_1 \sin\alpha} \left\{ 1 - h_1 - h_2 \times \frac{(h_1 - h_2)^2 + 6h_1 h_2 \sin^2\alpha}{[(h_1 - h_2)^2 + 4h_1 h_2 \sin^2\alpha]^{3/2}} \right\} dh_2$
	<p>Два бесконечно малых элемента на внутренней поверхности сферической полости</p> $d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{dF_2}{4\pi R^2}$

Таблица 3.3 (продолжение)

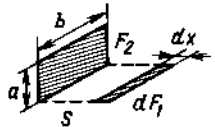
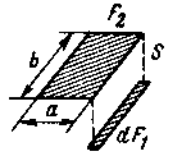
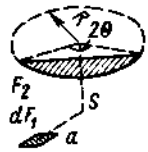
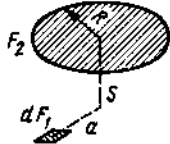
Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Элементарная полоса конечной длины и плоский прямоугольник</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \frac{b}{s} + \frac{s}{2b} \times \ln \frac{s^2(a^2+b^2+s^2)}{(s^2+a^2)(s^2+b^2)} - \frac{s}{\sqrt{a^2+s^2}} \times \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2+s^2}} \right]$
	<p>Элементарная полоса конечной длины и прямоугольник, лежащий в плоскости, параллельной полосе</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi b} \left[\sqrt{s^2+b^2} \arctg \frac{a}{\sqrt{s^2+b^2}} - s \arctg \frac{a}{s} + \frac{ab}{\sqrt{s^2+a^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{s^2+a^2}} \right]$
	<p>Элемент плоскости и параллельный ему сегмент диска</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{\theta}{2\pi} + \frac{R^2+s^2-a^2}{\pi A} \times \arctg \frac{A \operatorname{tg}(\theta/2)}{s^2+R^2+a^2-2aR} + \frac{a-R \cos\theta}{\pi \sqrt{(a-R \cos\theta)^2+s^2}} \times \arctg \frac{R \sin\theta}{\sqrt{(a-R \cos\theta)^2+s^2}} ;$ $A = \sqrt{(s^2+R^2+a^2)^2 - 4a^2 R^2}$
	<p>Элемент плоскости и параллельный ему круглый диск</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{s^2+a^2-R^2}{\sqrt{(s^2+R^2+a^2)^2 - 4a^2 R^2}} \right)$

Таблица 3.3 (продолжение)

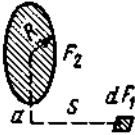
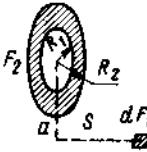
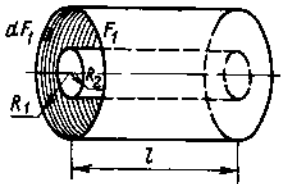
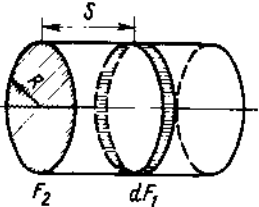
Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Элемент плоскости и перпендикулярный ему круглый диск</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{s}{2a} \left(\frac{s^2 + a^2 + R^2}{\sqrt{(s^2 + R^2 + a^2)^2 - 4a^2 R^2}} - 1 \right)$
	<p>Элемент плоскости и перпендикулярный ему кольцевой элемент</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{s}{2a} \left(\frac{s^2 + a^2 + R_2^2}{\sqrt{(s^2 + a^2 + R_2^2)^2 - 4a^2 R_2^2}} - \frac{s^2 + a^2 + R_1^2}{\sqrt{(s^2 + a^2 + R_1^2)^2 - 4a^2 R_1^2}} \right)$
	<p>Элемент на внутренней поверхности наружного цилиндра и внутренняя поверхность этого же цилиндра для системы из двух соосных цилиндров</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2} - \frac{R_2}{4R_1} + \frac{R_2}{\pi R_1} \times \left[\frac{l}{R_2} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{R_1^2 - R_2^2}}{R_2} - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{l^2 - 4(R_1^2 - R_2^2)}{4l\sqrt{R_1^2 - R_2^2}} - \frac{l^2 + 2R_1^2}{R_2\sqrt{l^2 + 4R_1^2}} \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(R_1^2 - R_2^2)(l^2 + 4R_1^2)}}{R_2 l} \right]$
	<p>Кольцевой элемент на внутренней поверхности прямого кругового цилиндра и торец цилиндра</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2R} \left[\frac{s^2 + 2R^2}{\sqrt{s^2 + 4R^2}} - s \right]$

Таблица 3.3 (продолжение)

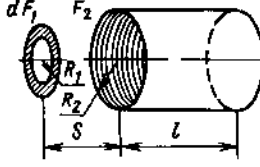
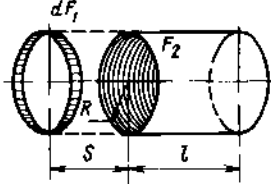
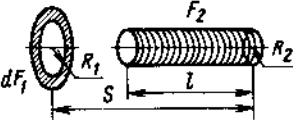
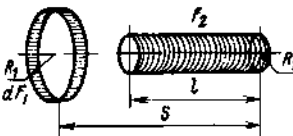
Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Плоский кольцевой элемент и внутренняя поверхность цилиндра</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{(l+s)^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{((l+s)^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} - \frac{s^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{(s^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \right]$
	<p>Кольцевой цилиндрический элемент и внутренняя поверхность цилиндра</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2R} \left[l + \frac{s^2 + 2R^2}{\sqrt{s^2 + 4R^2}} - \frac{(l+s)^2 + 2R^2}{\sqrt{(l+s)^2 + 4R^2}} \right]$
	<p>Плоский кольцевой элемент и внешняя поверхность цилиндра</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{(s-D)^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{((s-D)^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(R_1 - R_2)[(R_1 + R_2)^2 + (s-D)^2]}}{(R_1 + R_2)[(R_1 - R_2)^2 + (s-D)^2]} - \frac{s^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{(s^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(R_1 - R_2)[(R_1 + R_2)^2 + s^2]}}{(R_1 + R_2)[(R_1 - R_2)^2 + s^2]} \right\}$
	<p>Кольцевой цилиндрический элемент и внешняя поверхность цилиндра</p> $\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{R_2 (\sqrt{R_1^2 - R_2^2} - R_2 \arccos R_2/R_1)}{\pi R_1^2} \times \left[\frac{sR_1}{s^2 + R_1^2} + \operatorname{arctg} \frac{2s}{R_1} - \frac{(s-D)R_1}{(s-D)^2 + R_1^2} - \operatorname{arctg} \frac{2(s-D)}{R_1} \right]; \quad R_2/R_1 \leq 0,05$

Таблица 3.3 (продолжение)

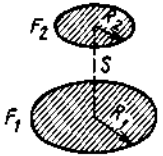
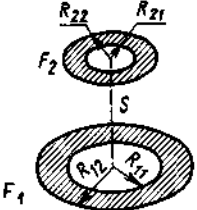
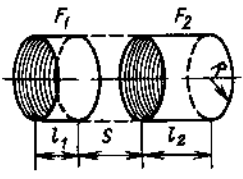
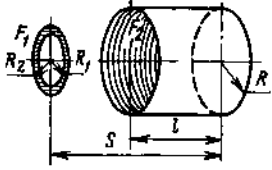
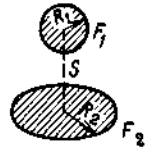
Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Два параллельных соосных диска</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{2R_1^2} [s^2 + R_1^2 + R_2^2 - \sqrt{(s^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}]$
	<p>Два параллельных соосных кольца</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{2(R_{12}^2 - R_{11}^2)} \times$ $\times [\sqrt{(s^2 + R_{12}^2 + R_{21}^2)^2 - 4R_{12}^2 R_{21}^2} - \sqrt{(s^2 + R_{11}^2 + R_{21}^2)^2 - 4R_{11}^2 R_{21}^2} - \sqrt{(s^2 + R_{12}^2 + R_{22}^2)^2 - 4R_{12}^2 R_{22}^2} + \sqrt{(s^2 + R_{11}^2 + R_{22}^2)^2 - 4R_{11}^2 R_{22}^2}]$
	<p>Два соосных цилиндра равных диаметров</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{4l_1 R} [2l_1 l_2 + (l_1 + s) \sqrt{4R^2 + (l_1 + s)^2} - s \sqrt{4R^2 + s^2} - (l_1 + l_2 + s) \times \sqrt{4R^2 + (l_1 + l_2 + s)^2} + (l_2 + s) \times \sqrt{4R^2 + (l_2 + s)^2}];$ $\varphi_{11} = 1 - \frac{1}{2R} (\sqrt{l_1^2 + 4R^2} - l_1)$
	<p>Внутренняя поверхность цилиндра и плоское кольцо</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{2(R_2^2 - R_1^2)} [\sqrt{(s^2 + R_2^2 + R^2)^2 - 4R_2^2 R^2} - \sqrt{(s - l)^2 + R_2^2 + R^2} - \sqrt{(s^2 + R_1^2 + R^2)^2 - 4R_1^2 R^2} + \sqrt{[(s - l)^2 + R_1^2 + R^2]^2 - 4R_1^2 R^2}]$

Таблица 3.3 (продолжение)

Геометрическая структура	Расчетная формула
	<p>Сфера и диск</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{s}{\sqrt{s^2 + R_2^2}} \right)$

но-геометрическим изменениям и вариациям сорбционных характеристик геттерной пленки.

Номинальные интегральные характеристики насоса. Прежде всего выбираются критерии проектирования, отвечающие наиболее вероятному режиму эксплуатации. Их выбор основывается на анализе поведения ЭФН в различных режимах с использованием расчетных соотношений из § 2.5.

Вакуумные параметры системы, откачиваемой испарительным насосом в режиме непрерывного напыления геттерных пленок, подчинены следующим закономерностям. При постоянной скорости испарения геттера, превышающей некоторое пороговое значение $\mu_{0пор}$, росту газовой нагрузки до максимального значения $q_{0макс}$ [см. (2.54)] соответствует линейный рост давления; быстрота действия насоса остается равной $S_{0н}$. При превышении максимальной нагрузки быстрота действия начинает резко падать при одновременном столь же резком увеличении давления.

Если газовая нагрузка постоянна, то при увеличении скорости испарения от нуля до порогового значения $\mu_{0пор}$ быстрота действия насоса нелинейно возрастает до $S_{0н}$; при этом давление в системе монотонно падает примерно пропорционально μ_0^{-a} . Коэффициент a меняется от 2 (при $\mu_0 \ll \mu_{0пор}$) до 1 (при $\mu_0 \approx \mu_{0пор}$). При дальнейшем увеличении скорости испарения давление и быстрота действия остаются неизменными.

Указанные вариации вакуумных параметров справедливы в интервале давлений, далеких от равновесного давления поглощенного газа над пленкой геттера. Геттерное вещество в испарителе считается свободным от растворенных газов. Принимается также, что стимулированный поток десорбции со стенок под влиянием лучистого потока с поверхности испарителя несуществен.

Пороговое значение скорости испарения определяется из соотношения

$$\mu_{0пор} = \frac{q_0}{c_{кр}} \frac{\Phi(\bar{r}_0, \bar{r}_1)}{\varphi(\bar{r}_0, \bar{r}_{исп})}, \quad (3.6)$$

где \bar{r}'_0 выбирается в соответствии с (2.56):

$$c(\bar{r}'_0) = c(\bar{r})|_{\text{макс}} \quad (3.7)$$

Зависимость (3.6) вытекает непосредственно из соотношения (2.49).

Следовательно, пороговое значение скорости испарения задается условием, что в зоне \bar{r}'_0 относительная концентрация потока атомов геттера минимально достаточна для предельно возможного захвата падающих газовых молекул. Выполнение этого условия означает, что во всех остальных зонах насоса поток атомов геттера избыточен по сравнению с необходимым, а это эквивалентно низкой энергетической эффективности испарителя. Поэтому работа насоса в таком режиме оправдана только в том случае, если приоритетным требованием является максимизация КЗ.

Если приоритет отдается энергетической эффективности, то нулевую зону \bar{r}''_0 следует выбирать из условия

$$c(\bar{r}''_0) = c_{\text{кр}} \quad (3.8)$$

для той области насоса, где поглощается большая часть газового потока. Необходимая скорость испарения геттера μ''_0 составляет

$$\mu''_{\text{пор}} > \mu''_0 = \frac{q_0}{c_{\text{кр}}} \frac{\Phi(\bar{r}''_0, \bar{r}_1)}{\varphi(\bar{r}''_0, \bar{r}_{\text{исп}})} \quad (3.9)$$

Быстрота действия $S''_{\text{он}}$ в этом случае ниже максимально возможной $S_{\text{он}}$, так как часть сорбирующих поверхностей имеет коэффициент прилипания, заведомо меньший β_0 .

После выбора нулевой зоны по формуле (3.6) или (3.9) уточняются значения скорости испарения μ_0 , скорости осаждения геттерных пленок $\mu(\bar{r}_i)$ [см. (2.44)], функции $\lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}_i)$, величины $q_{\text{пад}}(\bar{r}_i)$ [см. (2.42)], $q_{\text{погл}}(\bar{r}_i)$ [см. (2.43)] и функции $\lambda_{\text{пад}}(\bar{r}_i)$, $\lambda_{\text{погл}}(\bar{r}_i)$. В этих расчетах используют найденные ранее коэффициенты Φ и φ . Далее с помощью экспериментальных кривых, изображенных на рис. 1.8, находят уточненные значения $\beta(\bar{r}_i)$ и при их большом расхождении с ранее принятыми значениями производят пересчет коэффициентов Φ [см. (3.5)]. Затем по формулам (2.47) и (2.48) рассчитывают уточненные значения КЗ и быстроты действия проектируемого насоса.

Вакуумные параметры системы, откачиваемой насосом в режиме паузы, эволюционируют куда более простым образом. Геттерная пленка постепенно насыщается газом, что приводит к монотонному снижению коэффициентов прилипания и соответственно быстроты действия. Поэтому при фиксированной газовой нагрузке давление в камере возрастает, причем некоторый вклад дает и увеличение равновесного давления над пленкой.

В типичных условиях эксплуатации испарительных насосов можно, однако, полагать, что в интервале от нуля до некоторого критического количества поглощенного газа $G_{\text{окр}}$ коэффициенты прилипания практически постоянны; в закритической области они резко падают. Именно такая модель поглощения принята в § 1.3 и 2.5. Поэтому номинальные значения КЗ и быстроты действия вычисляются по формулам (2.47) и (2.48) с подстановкой начальных значений коэффициентов прилипания β_0 , определяемых по экспериментальным данным (см. рис. 1.4, 1.5).

Структурно-геометрическая оптимизация ЭФН. Приоритетным требованием при проектировании ЭФН в большинстве случаев является максимизация КЗ и быстроты действия. Следовательно, удельная скорость испарения в режиме непрерывного напыления геттерных пленок в соответствии с (3.6) должна устанавливаться не ниже пороговой $\mu_{\text{пор}}$; нулевую зону \bar{r}'_0 надо выбирать из условия (3.7). Тогда основные размеры проектируемого насоса, отвечающие критериям оптимизации, в соответствии с (2.55) могут быть определены путем многопараметрического анализа и максимизации функции

$$\Lambda = \frac{\varphi(\bar{r}'_0, \bar{r}_{\text{исп}}) \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}_i) F_i}{\Phi_0(\bar{r}'_0, \bar{r}_1) \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{пад}}(\bar{r}_i) F_i} = \Lambda_{\text{макс}} \quad (3.10)$$

Для режима паузы основные размеры насоса в соответствии с (2.60) выбирают максимизацией функции

$$\Lambda' = \frac{1}{\beta_0 \Phi_0(\bar{r}'_0, \bar{r}_1)} \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_{\text{погл}}(\bar{r}_i) F_i} = \Lambda'_{\text{макс}} \quad (3.11)$$

Далее в соответствии с (2.54) рассчитывают максимальную производительность насоса в режиме непрерывного напыления:

$$Q_{\text{макс}} = (1 - \xi) \mu_{\text{пор}} F_{\text{он}} c_{\text{кр}} \Lambda_{\text{макс}} \quad (3.12)$$

и в соответствии с (2.60) максимальную продолжительность режима паузы $t_{\text{п.макс}}$ при сохранении заданной производительности Q :

$$G_{\text{макс}} = Q t_{\text{п.макс}} = (1 - \xi) F_{\text{он}} G_{\text{окр}} \Lambda'_{\text{макс}} \quad (3.13)$$

Отметим, что структурно-геометрическая оптимизация ЭФН по критериям Λ и Λ' может давать различные соотношения размеров. Пред-

почтение следует отдавать критерию, отвечающему наиболее вероятному режиму эксплуатации проектируемого насоса.

Если приоритетным требованием является энергетическая эффективность ЭФН, то основные размеры насоса в соответствии с соотношением (2.10) могут быть определены путем максимизации функции:

$$\Lambda_{ЭН} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_i} \sum_{i=1}^n \min [1, \lambda_{пад}(\bar{r}_i) / \lambda_{а.д}(\bar{r}_i)] F_i = \Lambda_{ЭН.макс}. \quad (3.14)$$

Таким образом, на этом этапе расчета определяют оптимальные размеры и предельные вакуумные параметры проектируемого насоса. Затем уточняют его структурно-геометрические характеристики и при необходимости корректируют номинальные значения КЗ, быстроты действия и производительности.

Эволюция вакуумных параметров насоса в закритической области сорбционных характеристик геттерной пленки. Если максимальный газовый поток, откачиваемый насосом в режиме испарения, не превышает $Q_{макс}$, найденного по формуле (3.12), а максимальное количество поглощенного газа $G_{макс}$ в режиме паузы подчинено соотношению (3.13), то насос сохраняет стационарные вакуумные параметры вплоть до исчерпания ресурса испарителя. Превышение максимальных значений Q и G переводит насос в закритическую область, где его интегральные характеристики резко падают.

Общий принцип их расчета в этой области подобен изложенному выше, однако в расчетные формулы подставляют текущие значения коэффициентов прилипания $\beta_i(t)$, зависящие от степени насыщения геттерной пленки. Напомним, что при расчете ЭФН в докритической области коэффициенты β_0 постоянны, причем $\beta_0 > \beta_i(t)$. Степень насыщения в режиме испарения определяется сопоставлением величин $q_{пад}(\bar{r}_i)$, $q_{погл}(\bar{r}_i)$ и $q_{а.д}(\bar{r}_i)$; в паузе она оценивается по абсолютному или относительному количеству поглощенного газа. Далее по экспериментальным кривым типа приведенных на рис. 1.4, 1.5 (в паузе) или на рис. 1.8, 1.9 (в режиме испарения) находят текущие значения коэффициентов прилипания $\beta_i(t)$. Затем вычисляют структурно-геометрические характеристики, коэффициенты полного молекулярного обмена и определяют интегральные характеристики ЭФН.

Эволюция вакуумных параметров при включении испарителя. При работе в режиме испарения наряду с потоком из откачиваемой камеры возникает дополнительный газовый поток, нагружающий насос. Его основные компоненты — газы, растворенные в геттере и выделяющиеся при его испарении, а также потоки тепловой и фотостимулированной десорбции со стенок насоса, генерируемые лучистым потоком с поверхности испарителя и (или) окружающей его плазмы.

Плотность потока газов, растворенных в геттере, на поверхности испарителя составляет

$$q_p = g_0 \mu_0, \quad (3.15)$$

где g_0 — концентрация газовых примесей в геттерном веществе (см. табл. 3.2). Его распределение по поверхностям насоса в первом приближении подобно распределению напыляемых атомов геттера. Достоверность этого приближения возрастает при снижении температуры геттерной пленки. Плотность потоков тепловой ($q_{т.д}$) и фотостимулированной ($q_{ф.д}$) десорбции со стенок зависит от большого числа факторов и может быть оценена следующими зависимостями:

$$q_{т.д}(\bar{r}_i) = k q_{погл}(\bar{r}_i) \Phi_{л}(\bar{r}_i, \bar{r}_{исп}) Q_{л}, \quad (3.16)$$

$$q_{ф.д}(\bar{r}_i) = \alpha k q_{погл}(\bar{r}_i) \Phi_{л}(\bar{r}_i, \bar{r}_{исп}) Q_{л}, \quad (3.17)$$

где k — эмпирический коэффициент; $\Phi_{л}(\bar{r}_i, \bar{r}_{исп})$ — коэффициент полного лучистого обмена между i -й зоной и поверхностью испарителя; $Q_{л} = \mu_0 W_0$ — лучистый поток с поверхности испарителя; α — доля высокоэнергетичных квантов в этом потоке, имеющих энергию выше пороговой для фотодесорбции; W_0 — мощность, затрачиваемая на испарение геттера с единичной скоростью.

Учтя разнообразие возможных условий эксплуатации ЭФН, вытекающую отсюда неопределенность коэффициентов k и сравнительную малость потоков тепловой и фотостимулированной десорбции по сравнению с компонентами суммарной газовой нагрузки (q_0 и q_p), выразим суммарную плотность этих потоков в виде

$$q_{л}(\bar{r}_i) = q_{т.д} + q_{ф.д} = k_{л} \mu_0 W_0 \quad (3.18)$$

и будем полагать их равномерно распределенными по всем сорбирующим поверхностям. В (3.18) $k_{л}$ — эмпирический коэффициент, зависящий от типа испарителя.

С учетом (2.44), (3.15) и (3.18) плотность дополнительного молекулярного потока, падающего на стенки насоса, теперь можно представить в виде

$$q'_{пад}(\bar{r}_i) = q_p \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_{исп}) + q_{л}(\bar{r}_i) = \mu_0 [g_0 \varphi(\bar{r}_i, \bar{r}_{исп}) + k_{л} W_0]. \quad (3.19)$$

Эту величину необходимо добавлять к плотности откачиваемого газового потока $q_{пад}(\bar{r}_i)$ во всех ранее приведенных формулах, куда входит эта плотность.

Для грубых оценок влияния испарителя на вакуумные параметры системы можно использовать соотношение

$$p = \frac{Q + \mu_0 F_{исп} (g_0 + k_{л} W_0)}{(1 - \xi) V_0 F_{ОН} [1 - \Phi_0(\bar{r}_1, \bar{r}_1)]}, \quad (3.20)$$

где p – стационарное давление во входном сечении работающего насоса. Влияние дополнительного газового потока, возникающего при включении испарителя, отражено здесь вторым слагаемым в числителе. Формула (3.20) наглядно показывает, что в режиме испарения давление в откачиваемой камере всегда выше, чем в режиме сорбции газа насосом с той же быстротой действия, но в паузе между циклами напыления. Столь же очевидной становится необходимость выбора геттера с разумно ограниченной концентрацией газовых примесей.

Рабочий режим испарителя. Допустимая продолжительность паузы между последовательными циклами выражена соотношением (3.13). Длительность цикла напыления t_n в режиме периодического осаждения пленки определяется из условия, чтобы в любой зоне насоса ее толщина была достаточной для сорбции газа с максимально возможной начальной скоростью ($\beta_i = \beta_{0i}$). При низкотемпературной сорбции ($T = 77 \div 300$ К) необходимая толщина пленки $\delta_{\text{мин}}$ не превышает 10 монослоев. В области высоких температур адсорбция газа сопровождается его диффузионным переносом в толщу пленки. Необходимая толщина напыляемой пленки в этом случае определяется конкретными эксплуатационными факторами, обсуждавшимися в гл. 1.

Поскольку толщина геттерной пленки неоднородна, критическим параметром является величина t_n^i для зоны с минимальной скоростью напыления. Эта зона \bar{r}_0^i определена ранее условиями (2.56) и (3.7). Используя соотношение (2.44), искомую длительность цикла напыления t_n можно представить в виде

$$t_n \leq t_n^i = \delta_{\text{мин}} / \mu_{\text{пор}} \varphi(\bar{r}_0^i, \bar{r}_{\text{исп}}). \quad (3.21)$$

Толщина пленки здесь выражена в единицах массы на единицу площади. Если она задана числом монослоев \tilde{n} , то для титана ($M = 47$ а.е.м.; площадь, занимаемая одним атомом $1 \cdot 10^{-15}$ см²) справедливо соотношение

$$t_n \leq 8 \cdot 10^{-8} \tilde{n} / \mu_{\text{пор}} \varphi(\bar{r}_0^i, \bar{r}_{\text{исп}}). \quad (3.21a)$$

Здесь t_n – в с, $\mu_{\text{пор}}$ – в г/(с · см²).

В режиме паузы ($t_{\text{кр}} \gg t_n$) работают испарительные насосы большинства сверхвысоковакуумных экспериментальных установок; основным видом газовой нагрузки являются тепловые и стимулированные десорбционные потоки. Режим периодического напыления ($t_{\text{кр}} > t_n$) характерен для приборов и установок, функционирующих при давлениях менее 10^{-4} Па. Вакуумно-технологическое оборудование при более высоких давлениях эксплуатируется обычно в режиме непрерывного напыления геттерных пленок ($t_{\text{кр}} \leq t_n$).

Ресурс испарителя. Ресурс зависит от типа испарителя, режима работы и начальной массы геттера $m_{\text{нач}}$. В режиме непрерывного напыления расчетный ресурс t_p

$$t_p = m_{\text{нач}} \eta / \mu_0 F_{\text{исп}}, \quad (3.22)$$

где η – коэффициент использования геттера (см. табл. 3.1). В режиме периодического напыления

$$t_p \geq \frac{m_{\text{нач}} \eta}{\mu_0 F_{\text{исп}}} \frac{t_{\text{кр}}}{t_n}. \quad (3.23)$$

Знак $>$ в этой формуле соответствует работе насоса в закритической области кривых насыщения геттерной пленки.

Начальная масса геттера. Оценим $m_{\text{нач}}$ по заданным значениям газовой нагрузки Q и продолжительности непрерывной эксплуатации проектируемого насоса $t_{\text{экс}}$ по соотношению

$$m_{\text{нач}} \geq k C_{\text{погл}}^* Q t_{\text{экс}}, \quad (3.24)$$

где k – размерный коэффициент; $C_{\text{погл}}^*$ – атомное соотношение геттер–газ в насыщенной геттерной пленке [см. (1.21) – (1.23)].

Изложенная методика позволяет с необходимой точностью определять важнейшие вакуумные характеристики испарительных насосов и составляет основу их автоматизированного проектирования.

Перейдем теперь к конструктивно-физическим и эксплуатационным особенностям испарительных насосов различных модификаций.

3.3. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Вакуумные и эксплуатационные характеристики испарительных насосов определяются типом примененного испарителя, материалом геттера, температурой запыляемой поверхности, компоновочной схемой. Верхний предел рабочего давления ограничен образованием стойких оксидов, нитридов и карбидов непосредственно на поверхности испарителя, а также условиями стабильной и длительной работы термоэлектронных эмиттеров. При откачке активных газов он близок к 10^{-2} Па. В среде инертных газов включение испарителей возможно при давлениях до 10 Па.

Нижний предел рабочего давления определяется равновесным давлением откачиваемых газов над поверхностью геттера и скоростью каталитического синтеза новых газообразных веществ, главным образом углеводородов. При понижении температуры геттерной пленки равновесное давление снижается; одновременно замедляются процессы катализа. Предельное остаточное давление при температуре пленок около 300 К близко к $5 \cdot 10^{-8}$ Па; охлаждение пленок приводит к его существенному снижению (табл. 3.4). Одновременно возрастают коэффициенты прилипания и захвата.

Таблица 3.4. Парциальное давление метана, Па, при сорбции водорода пленками титана и тантала

Геттер	Температура пленки, К		
	273	196	77
Титан	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Тантал	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$

Таблица 3.5. Распределение молекулярных и геттерных потоков по поверхностям испарительных насосов

Компоновочная схема	Относительные размеры ($l/d = 1$)	Тип испарителя	Промышленный прототип	Распределение $q_{полл}(\bar{r}_i)/q_0$ и $\mu(\bar{r}_i)/\mu_0$ по поверхностям насоса	Боковая поверхность	Торец
	$l_0/d = 0,75$ $d_0/d = 1 \cdot 10^{-2}$	Резистивный протонный монакальный	Насос типа ГИН			
	$d_0/d = 5 \cdot 10^{-2}$	Электронно-лучевой	Насос типа СТОИ			
	$d_0/d = 5 \cdot 10^{-2}$	То же	-			
	$d_0/d = 0,2$	Резистивный косвенного накала	-			

Таблица 3.5 (продолжение)

Распределение $q_{полл}(\bar{r}_i)/q_0$ и $\mu(\bar{r}_i)/\mu_0$ по поверхностям насоса

Боковая поверхность

Торец

Компоновочная схема

Относительные размеры ($l/d = 1$)

Тип испарителя

Промышленный прототип

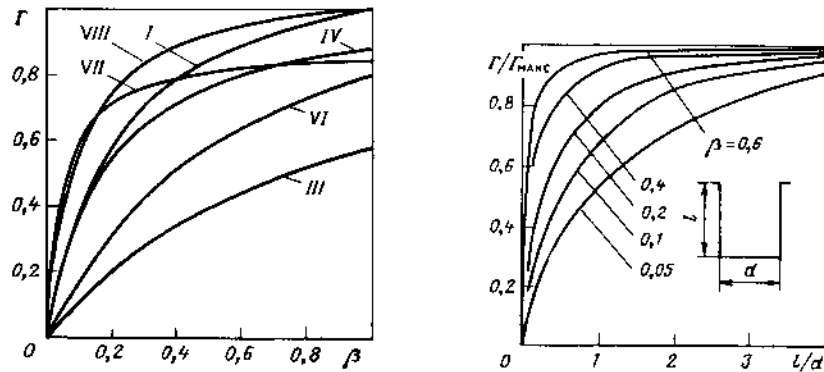


Рис. 3.7. Коэффициенты захвата испарительных насосов в зависимости от коэффициентов прилипания сорбирующих поверхностей. Номера кривых соответствуют позициям на рис. 2.2

Рис. 3.8. Коэффициенты захвата испарительного насоса в долях предельно возможного в зависимости от относительной длины запыляемой поверхности при различных значениях коэффициента прилипания

Влияние компоновочной схемы и геометрических пропорций на вакуумные характеристики насосов подробно обсуждалось в гл. 2. Очень наглядно оно иллюстрируется табл. 3.5, рис. 3.7 и 3.8. Символом Γ_{\max} на рис. 3.8 обозначен КЗ насоса при $l/d \gg 1$.

При проектировании испарительных ГН должен быть выполнен ряд специфических требований к их конструктивному исполнению. Необходимо эффективное экранирование откачиваемой камеры, предотвращающее ее запыление геттером. Площадь экранов должна быть минимальной, поскольку они снижают КЗ. Расстояние между испарителем и поверхностью осаждения следует выбирать возможно большим во избежание лучистого перегрева напыленных геттерных пленок. Насосы всегда работают в циклическом тепловом режиме: тренировочный нагрев — охлаждение (зачастую до криогенных температур) — лучистый нагрев при включении испарителя; амплитуда температурных скачков достигает 600 К. Поэтому длина сварных швов — потенциально наиболее вероятных источников течей при термоциклических нагружениях — должна быть сведена до минимума. По этой же причине следует избегать конструкций со встроенными в откачиваемую камеру панелями значительной площади, охлаждаемыми жидким азотом. В таких конструкциях сварные швы имеют большую протяженность; нарушение их герметичности в теплоизолирующих полостях, т. е. в элементах чисто технологического назначения, вызывает аварийную ситуацию для вакуумной системы в целом. Такая опасность исключена, если откачиваемая сверхвысоковакуумная камера и теплоизолирующие полости герметично разделены.

Рассмотрим на примере отечественных ГН серии НИБ конструктивные решения, вакуумные характеристики и эксплуатационно-технологические особенности испарительных ГН автономного исполнения.

В насосах этой серии используются унифицированные резистивные прямонакальные испарители на основе титан-молибденовой биметаллической проволоки. Испарители выполнены по единой конструктивной схеме и различаются только размерами и числом титан-молибденовых нитей (табл. 3.6). На фланце установлена центральная стойка, поддерживающая опорные кольца. Нити фиксируются с помощью независимых экранированных тоководов и изоляторов по периферии фланца и опорных колец. Благодаря такому исполнению испарители имеют достаточную механическую жесткость и сохраняют работоспособность при произвольной ориентации в пространстве.

Плотность мощности, подводимой к испарителю, колеблется в пределах от 10 (режим высокотемпературного обезгаживания корпусов насосов НИБ-1, НИБ-2 и НИБ-10) до 18 Вт/см² (режим испарения титана со скоростью $2 \cdot 10^{-3}$ мг/(с · см²)); полная потребляемая мощность 0,6–2,2 кВт.

Корпус, являющийся одновременно поверхностью осаждения геттерных пленок, представляет собой сварную конструкцию из двух тонкостенных обечаек. В днище имеется отверстие для монтажа испарителя. По всей длине насоса обечайки имеют взаимно перпендикулярные зиги; торцевая часть обечаек пуклевана. Профилирование и пуклевка обечаек придают корпусу необходимую осевую и радиальную устойчивость при очень малой толщине стенок (0,8–2,2 мм в зависимости от размеров насоса). В полость между обечайками подается вода либо жидкий азот для охлаждения стенок. Пространство между корпусом и наружным кожухом в насосах НИБ-1, НИБ-2 и НИБ-10 заполнено стекловолоконистой теплоизоляцией. Тренировочный прогрев корпуса в этих насосах производится с помощью испарителя. В насосах НИБ-20 и НИБ-50 про-

Таблица 3.6 Основные технические характеристики испарителей для насосов серии НИБ

Характеристика	Типоразмеры испарителей (марка насоса)			
	1 (НИБ-1)	2 (НИБ-2)	3 (НИБ-10)	4 (НИБ-20, НИБ-50)
Максимальная скорость испарения для одной нити, мг/с	0,1	0,1	0,5	0,5
Число нитей	2	2	4	7
Начальная масса титана, г	5	10	100	170

странство между корпусом и кожухом вакуумируется; там же размещен резистивный нагреватель для высокотемпературного обезгаживания стенок. Насосы снабжены съемными накопителями жидкого азота и имеют горизонтальное и вертикальное исполнение.

Для защиты откачиваемой камеры от запыления геттером в режиме испарения и взаимного теплового экранирования камеры и насоса в его входном сечении установлен поворотный дистанционно управляемый жалюзийный экран. В режиме испарения жалюзи прикрыты, в режиме паузы их створки ориентированы перпендикулярно к плоскости входного отверстия. Такая схема позволяет на 25–30% увеличить КЗ в сравнении с неподвижным оптически непрозрачным экраном.

Насосы серии НИБ перекрывают по скорости действия по водороду интервал от 1 до 200 м³/с (табл. 3.7, 3.8; рис. 3.9). Их расчетный ресурс при давлении 4 · 10⁻⁵ Па — от 1500 до 3500 ч в зависимости от производительности; максимальное давление запуска 1 · 10⁻² Па; предельное остаточное давление 5 · 10⁻⁷ Па при охлаждении корпуса водой и менее 10⁻⁸ Па при охлаждении жидким азотом.

Для откачки установок с пульсирующей газовой нагрузкой перспективны насосы с двумя типами испарителей, например резистивным и электронно-лучевым или резистивным и плазменным. Использование таких насосов придает вакуумной системе повышенную эксплуатационную гибкость: при увеличении газового потока включается дополнительно более мощный испаритель.

Одна из моделей такого насоса, предназначенная для технологической откачки кинескопов, построена по следующей схеме. Полость металлического корпуса разделена на две области дискообразной перегородкой, установленной на трубчатых опорах. Над перегородкой смонтирована диодная система термоэлектронный катод — испаряющийся анод из геттерного вещества. Под перегородкой расположен блок резистивных сублиматоров. Оба испарителя закреплены на общем фланце в нижней части корпуса.

Наряду с автономными насосами в крупных установках широко применяются испарители, встраиваемые непосредственно в откачиваемые камеры. Например, для откачки диверторной камеры токамака РДХ использовано несколько десятков твердофазных испарителей косвенного накала, подобных испарителю Ti-BALL™. На каждые 3 м² поверхности, на которую напыляется геттерная пленка, приходится четыре испарителя; расчетный ресурс испарителей 1 месяц. В вакуумной камере плазменной ловушки 2ХИВ установлены проволочные титан-молибденовые испарители с начальным диаметром 3,2 мм, занимающие последовательно каждую из 90 позиций. Процессом напыления управляет компьютер, учитывающий положение каждого испарителя, оставшийся запас титана и т. п. Общая длина испарителей составляет 500 м, что достаточно для проведения 400 плазменных экспериментов.

Таблица 3.7. Основные характеристики сверхвысоковакуумных насосов серии НИБ

Характеристика	НИБ-1	НИБ-2	НИБ-10	НИБ-20	НИБ-50
	Диаметр входного отверстия, мм	160	260	500	800
Быстродействие, м ³ /с	1	3	10	30	60
	2	6	20	50	100
Хладагент	Вода				
	N ₂ H ₂				
Жидкий азот	2	4	15	40	70
	4	10	40	100	200
Номинальный ток нагрева нити, А	30				
Продолжительность испарения, мин	1	2	5	10	15
	2	11	20	75	130
Запас жидкого азота в насосе, дм ³					
Расход жидкого азота, дм ³ /ч: испаритель включен испаритель выключен	6	10	40	50	15
	1	2,5	6	10	15
Масса насоса, кг	15	55	120	400	720

Таблица 3.8. Вакуумные параметры насосов серии НИБ в режимах непрерывного и периодического напыления геттерных пленок

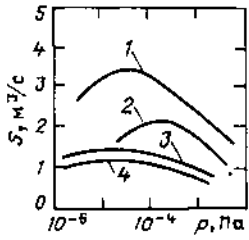
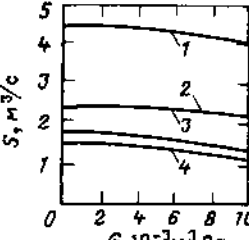
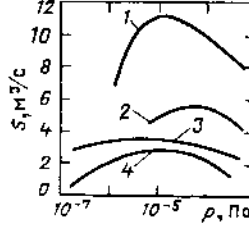
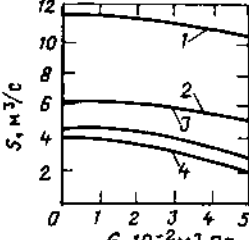
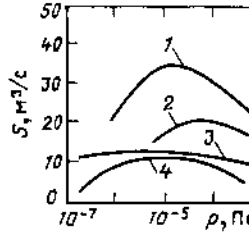
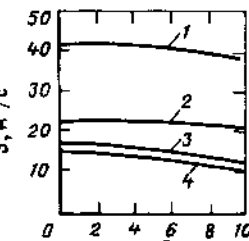
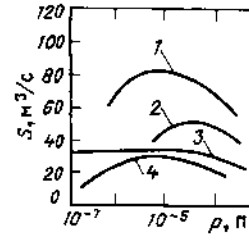
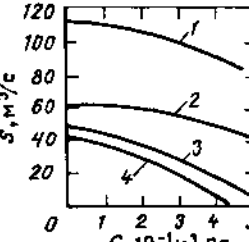
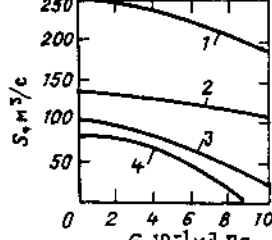
Тип насоса	Режим испарения геттера		Скорость испарения геттера, г/с
	непрерывный	периодический	
НИБ-1			$1 \cdot 10^{-4}$
			
НИБ-10			$5 \cdot 10^{-4}$
			

Таблица 3.8 (продолжение)

Тип насоса	Режим испарения геттера		Скорость испарения геттера, г/с
	непрерывный	периодический	
НИБ-50			$5 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Здесь: 1 – водород, 77 К; 2 – водород, 300 К; 3 – азот, 77 К; 4 – азот, 300 К.

Аналогичная система применена и в крупнейшей в мире амбиполярной плазменной ловушке MFTF-B. В камере объемом 4200 м³ с помощью встроенных панелей, запываемых титаном и охлаждаемых жидким азотом, и гелиевых криопанелей в присутствии плазмы поддерживается рабочее давление 10⁻⁶ Па. Общая площадь встроенных сорбирующих поверхностей превышает 10³ м²; продолжительность цикла откачки от атмосферного давления до рабочего менее 50 ч.

Применение встроенных испарителей в установках управляемого термоядерного синтеза способствует эффективно решению важных плазмофизических задач. Так, напыление на стенки разрядной камеры токамака TFTR, выполненной из нержавеющей стали, геттерирующей пленки хрома толщиной 0,01–0,1 мкм позволило на 20% увеличить плотность плазмы и на порядок уменьшить потоки газообразных примесей, эмитируемых стенкой. Эффект геттерирования сохраняется в течение многих недель. Причина столь благоприятного влияния геттерной пленки на

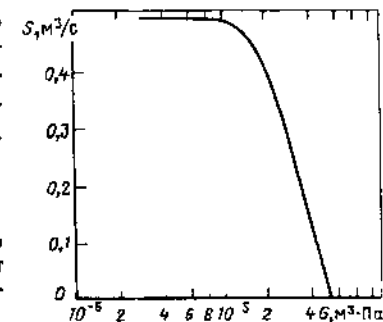


Рис. 3.9 Быстрота действия испарительного насоса НИБ-10 по аргону в зависимости от количества поглощенного газа при охлаждении корпуса жидким азотом

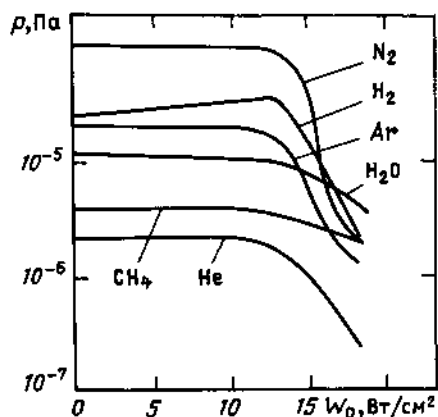


Рис. 3.10. Парциальные давления газов в системе, откачиваемой насосом НИБ-10, в зависимости от плотности мощности, подводимой к испарителю. Температура стенок насоса 290 К

плазменные параметры состоит в том, что пленка хрома и образующийся на ее поверхности слой Cr_2O_3 имеют в сравнении с нержавеющей сталью существенно меньшие коэффициенты стимулированного газовыделения под воздействием быстрых атомов водорода, бомбардирующих стенку.

Эксплуатация вакуумных систем, откачиваемых испарительными ГН, имеет некоторые особенности. Из-за чрезвычайно малых скорости действия и сорбционной емкости испарительных ЭФН по инертным газам и легким углеводородам при откачке смесей, содержащих такие газы, совместно с испарительными насосами должны использоваться вспомогательные разрядные, криогенные или компримирующие насосы малой производительности (1–3% номинальной производительности используемого испарительного насоса).

Для увеличения ресурса резистивные испарители даже в паузе между рабочими циклами необходимо поддерживать нагретыми до температур, при которых скорость испарения незначительна. Для титана этот режим соответствует плотности подводимой мощности 10–12 Вт/см². Поддержание повышенной температуры испарителя, во-первых, предотвращает термическое разрушение испарителей из-за пусковых бросков тока и, во-вторых, уменьшает количество газа, поглощаемого их поверхностью. Если такой режим неэкономичен (например, в сверхвысоковакуумных системах с очень редким включением испарителя), то увеличивать ток надо постепенно.

Включение испарителя, даже подвергавшегося тренировке и обезгаживанию, сопровождается заметной десорбцией поглощенного им водорода. Увеличение тока в нагревателе, как видно из рис. 3.10, вызывает небольшой рост давления водорода. Парциальные давления остальных газов остаются практически неизменными. При плотности подводимой мощности свыше 13 Вт/см² скорость испарения быстро возрастает, что приводит к спаду всех парциальных давлений. Уменьшение парциальных давлений инертных газов, не сорбируемых титановой пленкой при комнатных температурах, связано с интенсификацией их откачки вспомогательным разрядным насосом. Поток активных газов, попадающих в этот насос, с начала напыления геттера резко падает. Это сопровождается уменьшением ионной эрозии катодов и, сле-

довательно, скорости реэмиссии молекул инертных газов. Поэтому при откачке смесей, содержащих инертные газы, целесообразно последовательное включение испарительного и разрядного насосов.

Для испарительных ГН характерна высокая эксплуатационная устойчивость при импульсных газовых нагрузках. Усредненная за импульс быстрота действия почти не зависит от величины и формы импульса, а определяется лишь родом газа, температурой и степенью насыщения геттерной пленки. "Мгновенные" значения скорости действия при температуре титановых пленок 77 К определяются суммарным количеством поглощенного газа и в меньшей степени величиной и формой импульса газового потока. При насыщении пленки меньше критического мгновенная быстрота действия падает с увеличением газового потока; в противном случае эти характеристики подобны. При температуре пленок $T = 300$ К кинетические зависимости скорости действия и газового потока взаимно не обусловлены. При этих температурах периодическое прекращение подачи водорода способствует диффузионному рассасыванию поглощенных молекул и частичному восстановлению начального значения скорости действия (рис. 3.11).

Как показывает многолетний опыт, испарительные ГН могут устойчиво работать совместно с масляными диффузионными и форвакуумными насосами. Пары масел вследствие пиролиза на разогретых деталях разлагаются на более легкие компоненты, поэтому включение испарителей приводит к заметному уменьшению парциальной доли тяжелых углеводородов. Основными компонентами становятся метан, оксид углерода и аргон. Эта особенность позволяет использовать испарительные ГН как своеобразные ловушки тяжелых углеводородов.

Важное значение имеет стабильность сорбционных характеристик. Она определяется во многом толщиной пленки. При толщине, превышающей критическую, геттерная пленка начинает шелушиться и постепенно отслаивается под воздействием термомеханических напряжений на границе пленка – подложка. Из-за этого резко возрастает общая площадь физических поверхностей насоса. Последующая экспозиция ГН на воздухе сопровождается сорбцией водяных паров и активных газов, превращающей пленку в источник интенсивного газовыделения. При шелушении пленка теряет термический контакт с подложкой, и тепловое излучение

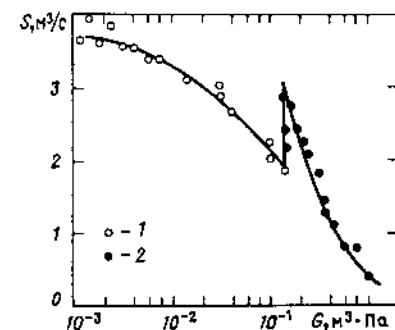


Рис. 3.11. Влияние режима напуска водорода на быстроту действия испарительного титанового насоса в зависимости от количества поглощенного газа:

1 – откачка при непрерывном напуске; 2 – откачка после 10-часовой паузы

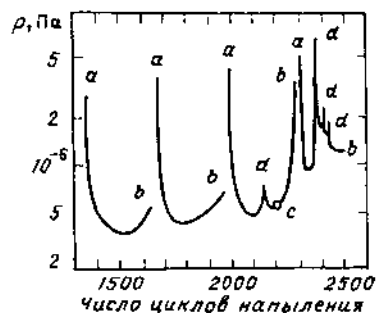


Рис. 3.12. Влияние толщины геттерной пленки на остаточное давление в откачиваемой камере при периодической экспозиции пленки на воздухе:

a – запуск насоса после экспозиции камеры на воздухе; *b* – напуск воздуха и замена испарителя; *c* – появление первых признаков шелушения пленки; *d* – скачки давления

вызывает ее сильный разогрев и десорбцию ранее поглощенного газа, в том числе в результате диссоциации гидрида титана. В отдельных случаях температура чешуек пленки поднимается до 800 К.

Экспериментальные кривые давления в камере, откачиваемой сублимационным титановым насосом, наглядно иллюстрируют эти процессы (рис. 3.12). Скорость испарения геттера составляла 0,28 мг/с. Пленка осаждалась на плоские водоохлаждаемые экраны из нержавеющей стали. Повышенное давление в точке *a* обусловлено поглощением воздуха при замене испарителя. В точке *b* ресурс испарителей исчерпан, и их заменяют. Скачки давления в точке *d* связаны с перегревом отдельных участков отслаивающейся пленки. Видно, что до начала шелушения рост фонового давления незначителен, однако затем давление быстро увеличивается.

Критическая толщина пленки, при которой начинается ее шелушение, зависит от условий напыления. Наилучшие результаты достигаются при температуре подложки 500 К. Важнейшее значение имеет состояние запыляемой поверхности: она должна быть очищена от жировых загрязнений, адсорбированных пленок жидкостей и газов, посторонних включений, оксидных и карбидных слоев. Критическая толщина многократно возрастает после предварительной бомбардировки запыляемой поверхности ионами инертных газов с энергией 1–2 кэВ, доводящей облучаемую подложку до атомарно чистого состояния. Росту критической толщины пленки способствует также напыление в среде инертных газов.

Хорошие результаты дает следующий технологический процесс подготовки запыляемой поверхности. Ее подвергают травлению или пескоструйной обработке для придания однородной шероховатости, затем наносят тонкий никелевый подслоя. Перед первым включением испарителя поверхность прогревают в течение нескольких часов при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Па и температуре 650–700 К. Начальный этап нанесения геттерной пленки осуществляют при нагретой подложке. При соблюдении указанной технологии критическая толщина пленки может достигать нескольких миллиметров.

Перечисленные требования не всегда совместимы с эксплуатационно-технологическими возможностями. Геттерные пленки обычно напыляют на подложки, находящиеся при комнатной или криогенной температуре без предварительной ионной обработки. В этих условиях в насосах с термическим распылением критическая толщина пленки на нержавеющей стали составляет 0,08–0,1 мм; средняя плотность напыленного титана близка к 30 мг/см². В насосах с плазменными источниками пленок критическая толщина значительно выше.

Во избежание шелушения и других явлений, нарушающих устойчивость вакуумных систем с испарительными насосами, необходимо периодическое удаление геттерных пленок. С этой целью обычно используют механические и химические способы. При механической очистке необходимо соблюдать меры предосторожности, исключающие возгорание и взрыв десорбируемых газов. Это особенно важно при удалении геттерных пленок после длительной откачки водорода.

Конструктивная простота и эксплуатационная гибкость испарительных ГН не могут компенсировать их непригодность для откачки газовых смесей, содержащих инертные газы и легкие углеводороды. В этом отношении более универсальны испарительные ИГН.

3.4. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

В испарительных ИГН одновременно с испарением геттера и сорбцией активных газов напыляемой пленкой происходит ионизация молекул газа. Образующиеся ионы ускоряются электрическим полем и, падая на геттерную пленку, внедряются в нее. Заметную роль играет также замуравывание падающих частиц напыляемой пленкой. Для инертных газов имплантационный механизм откачки доминирует; для активных газов он играет обычно второстепенную роль. Ионизация в большинстве случаев осуществляется термоэлектронными пучками.

В широко распространенных отечественных ионно-геттерных насосах серии ГИН используется ионизатор, состоящий из прямонакального вольфрамового катода и анодной сетки из молибденовой проволоки. На сетку подается положительный потенциал 1,2 кВ. Коллектором ионов служат стенки насоса, запыляемые геттерной пленкой. Анодная сетка используется также как резистивный нагреватель для обезгаживания насоса.

Электродная система монтируется на торцевом фланце насоса и состоит из блока прямонакальных испарителей и ионизатора. Испаритель представляет собой V-образную биметаллическую шпильку из титан-молибденовых нитей диаметром 2–3 мм; число испарителей зависит от производительности насоса (табл. 3.9, 3.10). Водоохлаждаемый корпус снабжен патрубком для форвакуумной откачки или подсоединения вспомогательного насоса, интенсифицирующего откачку инертных газов. Конструкция насосов средней производительности допускает разборку

Таблица 3.9. Основные технические характеристики испарителей для насосов серии ГИН

Характеристика	Типоразмеры испарителей (марка насоса)		
	1 (ГИН-05-1М)	2 (ГИН-2)	3 (ГИН-5)
Скорость испарения для одной шпильки, 10^{-2} мг/с	0,14 (200 Вт*); 0,42 (240 Вт*)	1,4	2,8
Диаметр нити, мм	2	3	3
Число шпилек	2	3	6
Эффективная масса титана, г	6	50	100

* Мощность, подводимая к шпильке.

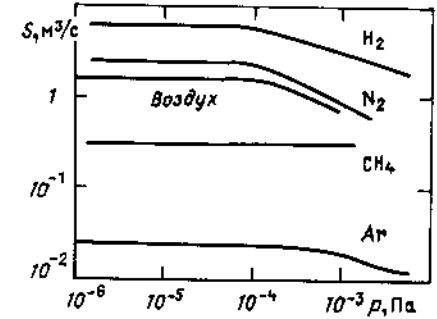
Таблица 3.10. Основные характеристики испарительных ионно-геттерных насосов серии ГИН средней производительности

Характеристика	ГИН-005Р	ГИН-05-1М	ГИН-2	ГИН-5
Диаметр входного отверстия, мм	—	160	260	500
Быстрота действия, $м^3/с$:				
по азоту	—	0,6	2,4	5,0
по воздуху	$5 \cdot 10^{-3}$	0,45	1,8	4,5
по водороду	$2 \cdot 10^{-2}$	1,5	6,0	20,0
Ресурс испарителей при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ Па, ч	600	1500	3000	3000
Площадь запляемой поверхности, $м^2$	—	0,17	0,46	1,18
Потребляемая мощность, кВт	0,13	0,85	3,5	3,5
Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$	—	0,3	0,6	0,6
Габариты, мм:				
в плане	$\phi 0,85$	364 x 280	510 x 420	770 x 680
высота	203	464	882	1100
Масса, кг	—	36	100	216

для смены шпилек и очистки стенок; насос малой производительности ГИН-005Р выполняется неразборным и не имеет водяного охлаждения.

Предельное остаточное давление насосов серии ГИН менее 10^{-7} Па; давление запуска не выше 10^{-1} Па. В спектре остаточных газов присутствуют водород, метан, пары воды, оксид углерода, аргон. Типовая за-

Рис. 3.13. Быстрота действия насоса ГИН-2 по различным газам в зависимости от давления



висимость быстроты действия от давления представлена на рис. 3.13.

Для электровacuумного приборостроения разработаны и серийно выпускаются специализированные экономичные ИГН с быстротой действия $10^{-4} - 10^{-3} м^3/с$, в которых в качестве геттера используются редкоземельные металлы гадолиний и эрбий (табл. 3.11). Сублимация геттера осуществляется электронным пучком. Насосы предназначены для финишной откачки и тренировки электровacuумных приборов повышенной надежности; они используются также для поддержания вакуума в отпаянных приборах.

Геттеры из редкоземельных элементов обладают рядом преимуществ перед титаном, имеющих принципиальное значение при создании экономичных миниатюрных ИГН. Главные из них — на 3–4 порядка большая скорость испарения и высокая термическая устойчивость соединений, образующихся при взаимодействии с откачиваемыми газами. Равновесное давление водорода над геттерной пленкой, содержащей гидриды гадолиния и эрбия, при $T=600$ К не превышает $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Предельное остаточное давление, достигаемое в этих насосах, составляет $(2 \div 5) \cdot 10^{-7}$ Па; парциальное давление водорода понижено на порядок, а метана — в 4–5 раз по сравнению с давлением в испарительных насосах с геттером из титана. Эти особенности редкоземельных металлов позволяют резко снизить мощность, затрачиваемую на испарение геттера, и дают возможность использовать насосы при повышенных температурах.

Электродная система монтируется на ножке в стеклянном или металлокерамическом корпусе; одна из модификаций выполнена в бескор-

Таблица 3.11. Основные характеристики отечественных испарительных насосов с геттером из редкоземельных металлов

Марка насоса	Быстрота действия, $10^{-3} м^3/с$		Потребляемая мощность, Вт		Габариты, мм		Масса, г
	H_2	N_2	Общая	На аноде	Диаметр	Высота	
ГИН-0,0001	0,8	0,3	3	2	16	45	28
НГ-0,1-1	0,8	0,3	3	2	16	45	22
НГ-1	8,0	2,0	13	10	36	100	100
НГ-1-2	—	—	7	5	22	51	5

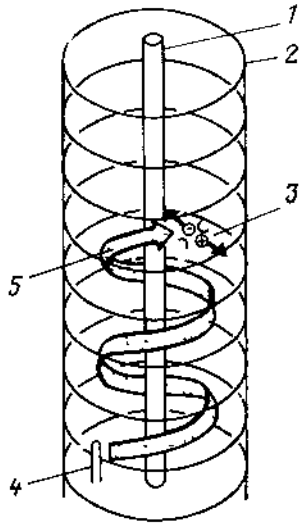


Рис. 3.14. Схема, поясняющая принцип действия орбитрона:
1 – стержневой анод; 2 – коллектор ионов;
3 – акт ионизации; 4 – катод; 5 – электронные траектории

пусном варианте (модель НГ-1-2). Анод-испаритель закреплен в центральной части электродной системы. Он представляет собой танталовый тигель, в который запрессован штабик из эрбия или гадолиния. Тигель разогревается электронным пучком с энергией 0,45–0,6 кэВ, эмитируемым прямонакальным вольфрамовым катодом с оксидно-иттриевым покрытием; ток накала – от 0,6 до 1,3 А при напряжении 1,3–1,8 В. Геттерная пленка осаждается на стенках, образуя сорбирующую поверхность

для молекул активных газов и ионов инертных газов. Ионный ток на корпус насоса или специальный электрод-коллектор может служить для индикации давления в интервале $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-2}$ Па. В зависимости от модификации насоса ионный ток при давлении $2 \cdot 10^{-4}$ Па составляет $6 \cdot 10^{-3} - 0,1$ мкА, возрастая до $8 \cdot 10^{-2} - 2$ мкА при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Па.

В описанных выше насосах из-за очень малой длины электронных траекторий вероятность ионизации молекул газа невелика. Поэтому быстрота действия по инертным газам незначительна, что затрудняет их использование при длительной откачке газовых смесей, содержащих инертные газы. Этот недостаток преодолен в испарительных насосах орбитронного типа (*орбитронах*)* (рис. 3.14).

Многokратное увеличение длины пробега электронов в орбитронах достигается радиальной и осевой асимметризацией электростатического поля. Электроны эмитируются одним или несколькими прямонакальными вольфрамовыми катодами, расположенными в торцевой части корпуса на расстоянии r_0 от оси и ориентированными под небольшим углом относительно направления на анод. Со стороны, противоположной поверхности эмиссии, катод экранируется танталовой токоподводящей лентой. Для предотвращения перехвата электронов корпусом на катод подается небольшое положительное смещение bU_a , где $b = 0,03 \div 0,15$; U_a – электрический потенциал анода. Обычно катодное смещение составляет 50–250 В. Радиальное распределение потенциала $U(r)$ опре-

деляется соотношением

$$U(r) = U_a \ln(r_1/r) / \ln(r_1/r_2), \quad (3.25)$$

где r_1 , r_2 – радиусы корпуса и анода соответственно. Расстояние

$$r_0 = 0,316 r_1^{1-2,3b} r_2^{2,3b}. \quad (3.26)$$

Величины U_a и r_0 связаны эмпирическим оптимизационным соотношением, соответствующим максимальной длине электронных траекторий. Со стороны входного сечения насоса обычно устанавливают экран. Он отражает электроны в пространство ионизации и предотвращает попадание в откачиваемую камеру атомов геттера и теплового излучения.

В электродной системе орбитрона электроны движутся по трехмерным траекториям вокруг и вдоль центрального стержневого анода. Часть электронов попадает на анод, вызывая его разогрев и сублимацию закрепленных на нем цилиндров из геттерного материала. Как источник напыляемых геттерных пленок можно использовать также дополнительный резистивный испаритель косвенного накала. Коллектором образующихся ионов служат стенки насоса или вкладыш с азотным охлаждением, запыляемые пленками геттера. Быстрота действия орбитрона по инертным газам определяется соотношением

$$S = (10^{-6} I_e / e) \bar{\lambda} \bar{\sigma} \beta, \quad (3.27)$$

где I_e – электронный ток, А; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\bar{\lambda}$ – средняя длина пробега электронов, см; $\bar{\sigma}$ – среднее сечение ударной ионизации, см²; β – вероятность захвата положительных ионов стенками.

Орбитроны работают от источников постоянного или переменного тока. Во втором случае быстрота действия по инертным газам снижается примерно вдвое. Для активных газов она остается практически неизменной. Относительная быстрота действия по различным газам в среднем составляет: по водороду 1,5–1,8; по воздуху 0,6–0,8; по аргону $(1,4 \div 1,8) \cdot 10^{-2}$. За единицу здесь принята быстрота действия по азоту.

Вакуумные параметры орбитронов существенно зависят от их вольт-амперных характеристик (ВАХ) $I_e = f(U_a)$. Эти характеристики имеют довольно сложный характер. При токах накала, меньших некоторого критического значения $I_{н,кр}$, ВАХ подобны аналогичным характеристикам вакуумных высоковольтных диодов. Мощность электронного пучка, падающего на анод, W в этом режиме недостаточна для сколько-нибудь заметного испарения геттера; орбитрон работает практически как ионный насос.

При увеличении тока накала мощность, рассеиваемая на аноде, и его температура быстро увеличиваются. Это вызывает экспоненциальный рост потока металлических паров с анода и приводит к увеличению

* Используется также термин *электростатические ионно-геттерные насосы*.

электропроводности разрядного промежутка. При $I_n > I_{n,кр}$ увеличение электропроводности оказывается настолько значительным, что ВАХ радикально меняется, принимая S-образную форму с тремя характерными участками: начальной восходящей ветвью AB , падающей ветвью BC и второй восходящей ветвью за точкой C . Начальная ветвь соответствует работе орбитрона в режиме ионного насоса. В точке B начинается испарение геттера. Участок BC , отвечающий области максимальной электропроводности разрядного промежутка, характеризуется отрицательным дифференциальным электрическим сопротивлением: приросту тока соответствует падение анодного потенциала. В точке C при достаточно больших электронных токах начинается вторая восходящая ветвь ВАХ. Токи, соответствующие точкам перегиба B и C , зависят от тока накала. Однако анодный потенциал в точке C одинаков при всех значениях I_n . Наиболее вероятная причина этого — быстрое увеличение скорости ионизационных процессов, сопровождающихся дополнительным рассеянием носителей тока.

При работе орбитрона в режиме ионного насоса ($I_n \leq I_{n,кр}$, $I_n > I_{n,кр}$; начальная ветвь ВАХ) быстрота действия пропорциональна мощности W . Предельное остаточное давление достигается при максимальном значении этой мощности, основные парциальные составляющие остаточной среды — гелий, метан, оксид углерода и аргон. При работе орбитрона во втором режиме ($I_n > I_{n,кр}$; падающая и вторая восходящая ветви ВАХ) на участке BC наблюдается резкое увеличение быстроты действия при одновременном нарушении линейного характера зависимости $S_{он} = f(W)$ и незначительном возрастании предельного остаточного давления главным образом из-за роста парциальных давлений углеводородов. За точкой C быстрота действия несколько уменьшается, и продолжается увеличение остаточного давления преимущественно за счет инертных газов.

Взаимосвязь электрофизических и вакуумных характеристик орбитронов объясняется структурными изменениями напыляемых геттерных пленок, происходящими при увеличении рассеиваемой на аноде мощности. С ее ростом происходит укрупнение зерна (средний размер зерна в пленках увеличивается от 3–4 нм вблизи точки B до 15–20 нм вблизи точки C и до 70–80 нм в конце второй восходящей ветви ВАХ); кроме того, меняется стехиометрический состав конденсата, так что плотность вакансий уменьшается. Поскольку границы зерен и вакансии являются основными стоками для инертных газов, оба эти фактора приводят к уменьшению эффективности их сорбции.

Таким образом, максимальная быстрота действия по инертным газам достигается при эксплуатации орбитрона в начальной области участка BC . Для получения наибольшей скорости сорбции активных газов режим работы орбитрона целесообразно выбирать за точкой C . Поэтому при откачке газовых смесей, содержащих активные и инертные газы, оптимальным для орбитрона режимом будет его эксплуата-

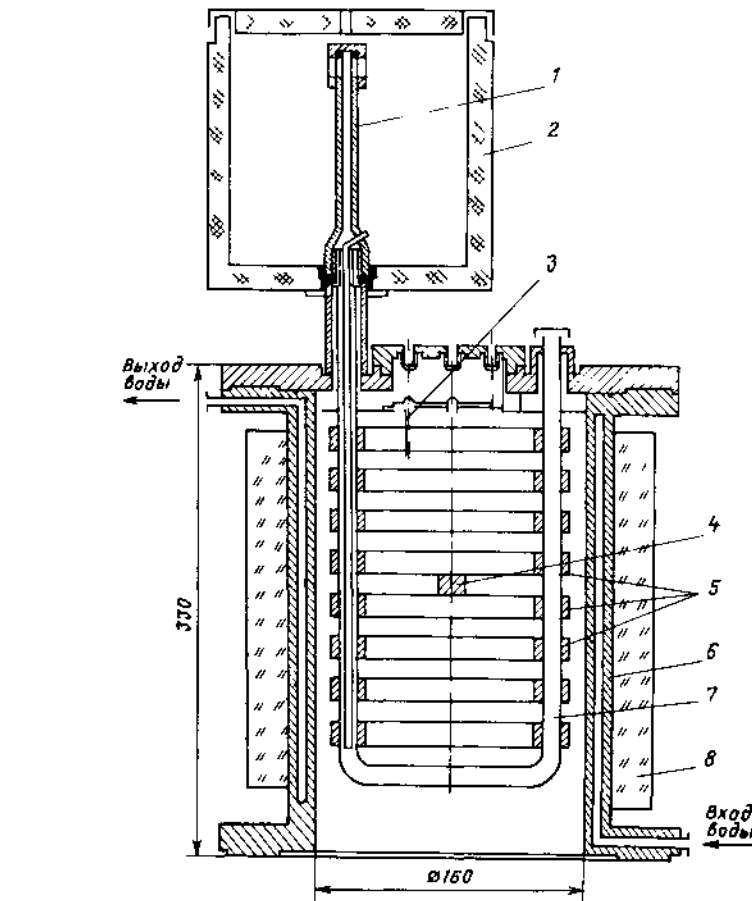


Рис 3.15 Конструктивная схема орбитрона СОН-А-1

1 — азотный питатель, 2 — накопитель жидкого азота; 3 — катод; 4 — анод; 5 — медные кольца; 6 — корпус насоса с рубашкой водяного охлаждения; 7 — трубка для подачи жидкого азота и размещения резистивного нагревателя; 8 — теплоизоляционный кожух

ция на конечном участке ветви BC . В свою очередь, выбор режима вблизи точки B позволит достичь предельно малых значений остаточного давления и концентрации углеводородов.

Орбитроны выпускаются промышленными сериями как в Советском Союзе, так и за рубежом. Отечественный насос СОН-А-1 (рис. 3.15) имеет предельное остаточное давление менее 10^{-10} Па при охлаждении стенок жидким азотом и менее 10^{-7} Па при водяном охлаждении, при

скорости испарения титана $(0,6 \div 1,4) \cdot 10^{-4}$ мг/с его быстрота действия по азоту при давлении меньше 10^{-4} Па равна $0,5$ м³/с. Электродная система и накопитель жидкого азота смонтированы на верхнем фланце. Испаряемый титан конденсируется на медных кольцах, охлаждаемых жидким азотом. В трубках, образуемых этими кольцами, размещены нагреватели для обезгаживания насоса. Корпус охлаждается водой. Рабочее напряжение 4,5 кВ; номинальный разрядный ток 15 мА; расход жидкого азота 1,5 дм³/ч. Ресурс насоса при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па составляет 2000 ч.

Сходные характеристики имеют орбитроны АНО, используемые для откачки ионизационных камер масс-спектрометров и другой аналитической аппаратуры. Запыляемые титаном стенки могут охлаждаться водой или жидким азотом; в последнем случае в корпусе насоса устанавливается полый цилиндрический вкладыш, заполненный хладагентом. Электродная система монтируется на нижнем фланце. Для повышения эксплуатационной надежности в насосе применены спиральные катоды из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм, навитой на керн. Давление запуска насоса 10^{-1} Па; предельное остаточное давление при охлаждении жидким азотом менее 10^{-8} Па; быстрота действия по азоту $0,35$ м³/с. Мощность, потребляемая в режиме испарения, 100 Вт; ресурс по жидкому азоту 1,2 ч.

В специализированных орбитронах ОГИН-0,1 и ОГИН-0,3, предназначенных для откачки напылительных установок, предусмотрено только водяное охлаждение запыляемых титаном стенок. Электродная система состоит из анода с укрепленным на нем геттерным материалом и двух катодов — эмиттеров из сплава ВР-27ВП, установленных на отражателем электроде. Быстрота действия по азоту 0,2 и 0,3 м³/с; предельное остаточное давление 10^{-7} Па; давление запуска 10^{-2} Па. Рабочее напряжение насосов 6 кВ; потребляемая мощность 250 и 300 Вт.

Самый крупный орбитрон, разработанный за рубежом, имеет быстроту действия по воздуху 30 м³/с. Диаметр входного отверстия этого насоса 600 мм.

Разработки новых модификаций орбитронов направлены главным образом на увеличение их ресурса и быстроты действия по инертным газам. В одной из моделей вокруг анода устанавливаются две коаксиальные сетки, причем внешняя выполняется из геттерного материала и имеет мелкодисперсную структуру; на нее подается отрицательный потенциал 5 кВ. Внутренняя сетка, напротив, выполняется крупноячеистой; на нее подается отрицательный потенциал 1 кВ. Анод имеет положительный потенциал 5 кВ. Образующиеся между анодом и первой сеткой ионы газа ускоряются полем первой и второй сеток и бомбардируют поверхность второй сетки, вследствие чего происходит ее распыление. Распыленные атомы геттера осаждаются на корпусе, формируя постоянно обновляющуюся геттерную пленку. Ионы, пролетевшие мимо ячеек второй сетки, внедряются в эту пленку.

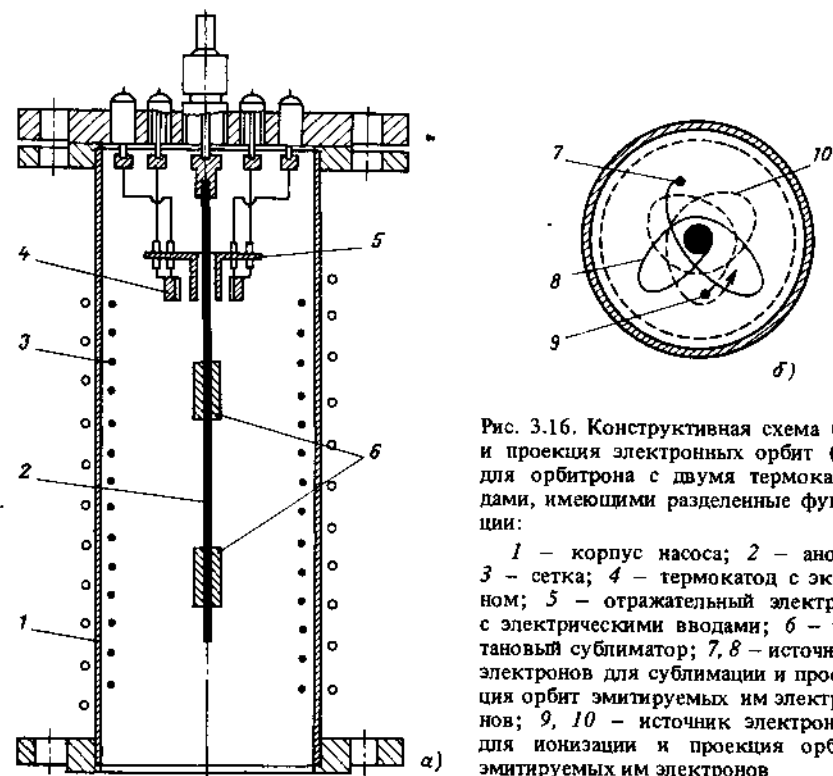


Рис. 3.16. Конструктивная схема (а) и проекция электронных орбит (б) для орбитрона с двумя термокатодами, имеющими разделенные функции:

1 — корпус насоса; 2 — анод; 3 — сетка; 4 — термокатод с экраном; 5 — отражательный электрод с электрическими вводами; 6 — титановый сублиматор; 7, 8 — источник электронов для сублимации и проекция орбит эмитруемых им электронов; 9, 10 — источник электронов для ионизации и проекция орбит эмитруемых им электронов

Хорошие результаты получены также в орбитроне с двумя термоэлектронными источниками, выполняющими различные функции (рис. 3.16). Электронный ток одного из них служит для нагрева сублиматора. Электроны, эмитруемые другим источником, имеют очень удлиненные траектории и эффективно ионизируют молекулы газа. Конструктивно источники идентичны. Разделение их функций осуществляется путем подачи на источник электронов для ионизации большего положительного смещения относительно корпуса. К примеру, для насоса диаметром 97 мм при откачке гелия оптимальные напряжения смещения 36 и 120 В. Цилиндрическая сетка вблизи корпуса, на которую подается положительный потенциал, увеличивает вероятность захвата стенками ионов инертных газов. Наибольший эффект достигается при оптимальном потенциале сетки, зависящем от рода газа. Для гелия, аргона и ксенона этот потенциал составляет 210, 300 и 150 В соответственно.

Максимальная быстрота действия орбитрона с двумя термоэлектронными источниками и дополнительной сеткой вблизи стенок при диамет-

Таблица 3.12. Характеристики испарительных ионно-геттерных насосов серии BINION

Характеристика	Диаметр входного сечения, мм			
	63	100	200	250
Быстрота действия при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ Па, м ³ /с:				
по азоту	0,2	0,45	1,5/2,5*	3,0/5*
по аргону	0,02	0,025	0,025	0,1
Масса, кг	10	15	20	30

* При охлаждении корпуса жидким азотом.

ре корпуса 97 мм достигает 1,73 дм³/с (по гелию), 7,8 дм³/с (по аргону) и 9,2 дм³/с (по ксенону). В среднем эти значения на 40% превышают соответствующие значения для орбитрона традиционной конструкции. Наибольшая быстрота действия по гелию достигается при давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Па; для более тяжелых инертных газов быстрота действия максимальна в интервале давлений $5,2 \cdot 10^{-7} - 2,7 \cdot 10^{-5}$ Па (для аргона) и $2,7 \cdot 10^{-7} - 2,7 \cdot 10^{-5}$ Па (для ксенона).

Для получения оптимальных параметров катод в орбитронах должен быть максимально приближен к аноду и находиться на оптимальном расстоянии от плоскости экрана. Эти расстояния для насоса диаметром 100 мм составляют 15 и 72 мм соответственно.

Еще большее увеличение длины электронных траекторий и соответственно быстроты действия испарительных ИГН по инертным газам позволяет получить комбинация электростатического и постоянного магнитных полей. В одной из таких модификаций — насосе BINION на цокольном фланце по оси установлен анодный штабик — сублиматор из титана; термоэлектронный пучок эмитируется резистивным прямо-накальным катодом у основания сублиматора. Масса сублиматора 10–15 г. Параллельно цокольному фланцу вблизи основания и у вершины анода смонтированы дисковые отражающие электроды. Электродная система помещена в аксиальное магнитное поле с индукцией 0,015 Тл. Стенки насоса, запыляемые геттерной пленкой, охлаждаются водой или жидким азотом. Благодаря отражающим электродам и аксиальному магнитному полю длина пробега электронов до попадания на анод возрастает до нескольких сотен метров, что обеспечивает эффективную ионизацию и откачку газов (табл. 3.12).

Предельное остаточное давление в насосах BINION при охлаждении корпуса жидким азотом 10^{-9} Па, давление запуска до 1 Па. Линейный характер зависимости ионного тока от молекулярной концентрации в интервале давлений $10^{-6} - 10^{-2}$ Па позволяет осуществлять индикацию давления.

Еще одна модификация испарительных насосов с электронными траекториями большой протяженности — безмагнитный квадрупольный ИГН. В цилиндрическом корпусе — коллекторе ионов, стенки которого запыляются геттерной пленкой, параллельно оси устанавливаются четыре стержневых или имеющих в сечении гиперболическую форму электрода. Между этими электродами возбуждается высокочастотное электрическое поле. На одном из торцов электродной системы монтируется термоэлектронный эмиттер. Анод имеет форму кольца, охватывающего квадруполь в его центральном сечении. Между эмиттером и анодом создается постоянное электростатическое поле. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются постоянным электрическим полем до срединного сечения квадруполя. Траектория их движения — спираль с переменным шагом. На второй половине пути электроны, также двигаясь по спирали, замедляются. Этот процесс многократно повторяется, так что электроны, прежде чем попасть на анод, проделывают большой путь, на котором осуществляется ударная ионизация молекул газа. Благодаря этому внутри квадруполя формируется устойчивый плазменный сгусток. Поступающие туда молекулы газа ионизируются и, попадая на стенки, поглощаются геттерной пленкой.

Специфическое свойство квадрупольного насоса — рост ионного тока с уменьшением молекулярной концентрации откачиваемого газа. Столь необычная для ИГН закономерность объясняется обратной зависимостью поперечных размеров плазменного сгустка от давления. В диапазоне давлений $10^{-7} - 10^{-3}$ Па диаметр сгустка $d \sim p^{-0,5}$; ионный ток в этом же интервале $I^+ \sim p^{-0,7 \pm 0,1}$. Плотность электронов в стационарной газоразрядной плазме при давлении 10^{-7} Па близка к 10^{10} см⁻³, что обуславливает сохранение приемлемых значений быстроты действия до давления 10^{-8} Па.

Промышленного выпуска квадрупольных насосов пока нет.

Глава 4

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ НАСОСЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ГЕТТЕРНЫХ ПЛЕНОК

4.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕТТЕРНЫХ ПЛЕНОК

Непосредственным источником атомарных и ионных потоков напыляемого геттера в рассматриваемых насосах является металлическая плазма, генерируемая при дуговом или искровом разряде. Разряд возбуждается между электродами, как минимум один из которых (расходуемый!) выполнен из геттерного вещества. Некоторый вклад в напыление геттерных пленок вносит также испарение расходуемого электрода. В зависимости от плотности разрядного тока и температуры элект-

Таблица 4.1. Усредненные характеристики плазменных дуговых испарителей постоянного тока с разрядами разных типов

Характеристика	С интегрально холодным расходуемым катодом		С горячим расходуемым катодом	С расходуемым анодом и горячим полым катодом
	без магнитного управления	с магнитным управлением		
Электрическая мощность, кВт	3–5	0,9–1,2	4–6	5–8
Напряжение, В	20–25	23–25	10–20	10–50
Разрядный ток, А	150–600	40–50	250–500	100–300
Магнитная индукция, Тл	–	$5 \cdot 10^{-3}$	–	–
Средняя температура, К:				
катода	400	400	$(1 \div 3) \cdot 10^3$	$(1,5 \div 2,5) \cdot 10^3$
анода	Любая	Любая	Любая	$(1 \div 3) \cdot 10^3$
Скорость испарения, мг/с	5–30	2	8–80	1,5–150
Затраты энергии на генерацию пучка атомов, эВ/атом	300	100	40–200	5–100
Энергия генерируемых частиц, эВ	10–100	10–100	1–2	0,1–1
Степень ионизации, %	10–90	10–90	100	5–100
Фазовый состав распыляемого вещества	Ионы, атомы, микрокапли		Ионы	Ионы, атомы

родов разряд может существовать в качественно различных формах (табл. 4.1). Наибольшее распространение в современных насосах получили плазменные источники на основе дугового разряда*.

Разряд с интегрально холодным катодом горит в парах хорошо охлаждаемого катода, выполненного из геттера, независимо от концентрации газа; минимальный ток устойчивого горения 130–150 А (для титана) при напряжении несколько десятков вольт. На катоде разряд локализуется в виде хаотически перемещающихся по поверхности сильно разогретых катодных пятен (КП). Их траектории представляют собой ломаные прямые. Средняя температура катода не превышает 400 К. Испарение происходит из КП; удельное количество испаренной массы геттера составляет 0,1–1 мг/Кл. По поверхности анода разрядный ток распределен равномерно.

* Используется также термин *плазменные дуговые испарители*.

При возбуждении вблизи катода управляющего магнитного поля движение КП упорядочивается, а ток устойчивого горения падает до 40–70 А. Это повышает энергетическую эффективность испарителя и коэффициент использования геттера, поскольку доля капельной фазы в испаряющемся потоке падает.

При нагреве катода до температуры, превышающей 1300 К, дуговой разряд переходит в другую форму. Для нее характерно равномерное распределение разрядного тока по поверхности катода при средней плотности около 50 А/см². Эта форма разряда реализуется в испарителях с теплоизолированным катодом, если плотность разрядного тока на катоде превосходит указанное значение. Катод расплывается в однородной ионной фазе; эрозии анода не происходит. Скорость испарения здесь существенно выше, чем в разряде с интегрально холодным катодом, что позволяет повысить производительность насоса. Испарители такого типа, однако, чувствительны к попаданию атмосферного воздуха.

Еще одна форма разряда свойственна коаксиальным электродным системам в виде полого осесимметричного катода из материала с высокой эмиссионной способностью, внутри которого установлен анод. Для этой формы характерно распыление анода; катод практически не эродирует, так как энергия бомбардирующих его ионов (10–30 эВ) ниже порога физического распыления. Нагрев и испарение анода являются результатом его интенсивной бомбардировки электронами, эмитируемыми катодом. Одновременно осциллирующие в межэлектродном пространстве электроны ионизируют испаряющиеся атомы. Благодаря этому происходит компенсации объемного заряда электронного пучка и поддерживается энергетический баланс катода. Испарители такого типа имеют высокую энергетическую эффективность. Их крупный недостаток — высокая рабочая температура электродов, делающая их чувствительными к попаданию атмосферного воздуха.

Предложения использовать плазменные дуговые испарители для нанесения тонких металлических и, в частности, геттерных пленок появились в конце 50-х — начале 60-х годов. В дальнейшем преимущественно в нашей стране было разработано большое число модификаций испарительных насосов на их основе, работающих как в стационарном, так и в импульсном режимах. Основное внимание в книге уделено дуговым испарителям с интегрально холодным катодом, как получившим наибольшее промышленное распространение. Дуговой разряд в таких испарителях устойчив в широком диапазоне токов (десятки ампер — килоамперы) и очень прост в технической реализации. Остановимся более подробно на его свойствах.

Особенность разряда — его внутренняя нестабильность. На катоде дуга горит в отдельных КП, состоящих, в свою очередь, из элементарных ячеек. Каждая ячейка обладает конечным временем жизни. Поэтому при неизменном токе на катоде происходит непрерывный процесс

самопроизвольной гибели старых и образования новых ячеек; их распад и рождение происходят с частотой порядка 10^5 I, с^{-1} , где разрядный ток I – в А.

Таким образом, дуговой разряд устойчив, пока поддерживается динамическое равновесие между процессами распада и возникновения элементарных ячеек. Поскольку время жизни отдельной ячейки – случайная величина, продолжительность горения дуги в целом также оказывается случайной величиной. Она определяется соотношением

$$N_t = N^{-t/\theta}, \quad (4.1)$$

где N_t – число дуг с временем горения, большим t ; N – полное число возникших дуг; θ – среднее время существования дуги, которое экспоненциально растет с увеличением тока и зависит также от теплофизических характеристик материала катода и параметров внешней электрической цепи. Когда ток и общее число элементарных ячеек достаточно велики, можно говорить о стационарном горении дуги. Разряд статистически устойчив при наличии на рабочей поверхности не менее двух КП. Минимальный ток $I_{\text{мин}}$, при котором еще возможно стационарное существование дуги (*критический ток*), зависит от материала катода, расстояния между электродами и параметров внешней электрической цепи; для различных металлов в расчете на одно пятно он составляет 40 А (для алюминия), 70 А (для титана), 80 А (для меди), 150 А (для молибдена), 280 А (для вольфрама). Если разрядный ток $I \geq I_{\text{кр}}$, то при уходе одного из КП из рабочей области и его гибели оставшееся пятно спонтанно делится на два, обеспечивая стационарное существование разряда. При прочих равных условиях $I_{\text{мин}}$ тем меньше, чем ниже температура кипения материала катода. Наложение магнитного поля резко уменьшает $I_{\text{мин}}$.

Разряд горит при напряжении, несколько большем (иногда в 2–3 раза) потенциала ионизации материала катода. Основную часть этого напряжения составляет катодное падение потенциала. Наименьшее значение катодного падения соответствует материалам с более низким значением параметра $T_{\text{кип}} \kappa^{0,5}$, где $T_{\text{кип}}$ – температура кипения материала катода, К; κ – теплопроводность материала катода, Вт/(м · К). Исключения составляют только алюминий и никель.

Току дуги свойственны колебания с частотой $10^5 - 10^7$ Гц, параметры которых зависят в основном от теплофизических свойств материала катода. Осциллограммы напряжения показывают наличие постоянной составляющей и большого числа флуктуаций. При уменьшении тока постоянная составляющая снижается, тогда как амплитуда шумов резко возрастает.

Физические процессы в вакуумных дугах определяются поведением катодных пятен. По своей природе их можно разделить на электровзрывные и тепловые. Электровзрывные КП развиваются как результат цикли-

ческого возбуждения взрывной электронной эмиссии. Они оставляют на поверхности характерные микрократеры и предшествуют тепловым. Последние формируются в тех же областях катода при его нагреве до критической температуры, соответствующей переходу от взрывного эмиссионного механизма к термоавтоэлектронному. Время жизни тепловых пятен примерно пропорционально квадрату их размера. В зависимости от условий возникновения, продолжительности существования и подвижности различают КП трех типов.

Пятна первого типа (КП-I) появляются в начальный период разряда и затем расходятся, занимая все большую площадь. Они наиболее подвижны; скорость их движения в зависимости от материала катода составляет 10–100 м/с. Длительность фазы разряда, в течение которой существуют только КП-I, зависит от теплофизических характеристик катода; она лежит в пределах 0,1–0,5 мс и уменьшается с ростом тока.

В следующий период на участках наиболее частого пребывания КП-I возникает КП второго типа (КП-II). Вначале пятна обоих типов сосуществуют, а затем могут существовать и независимо. Время жизни КП-II слабо зависит от материала катода и колеблется в пределах 0,5–1,5 мс; их скорость 0,1–10 м/с. Длительность фазы горения с пятнами второго типа определяется током разряда; она может быть и неограниченной.

Пятна третьего типа (КП-III) возникают лишь при токах, больших $I_{\text{мин}}$, и представляют собой групповые образования из нескольких КП-II, расположенных на расстояниях, сравнимых с их размерами. Время жизни таких пятен достигает нескольких миллисекунд; они малоподвижны.

Динамика развития КП сильно зависит от концентрации остаточных газов. В форвакууме возможно одновременное существование пятен всех типов или их парных комбинаций. Средний ток, приходящийся на одно пятно для данного материала, почти не связан с параметрами разряда, поэтому при увеличении тока общее число КП возрастает. Для различных металлов ток на одно пятно увеличивается почти на 3 порядка при переходе от ртути ($T_{\text{кип}} = 630 \text{ К}$) к вольфраму ($T_{\text{кип}} = 6203 \text{ К}$). При сохранении стабильности из разрядной плазмы могут экстрагироваться ионные токи до 7–10% полного разрядного тока. Линии электрического тока в зоне КП направлены по нормали к поверхности катода.

Измерения плотности тока в КП наталкиваются на серьезные экспериментальные трудности. Этим объясняется разброс опубликованных данных, достигающий нескольких порядков. В диапазоне разрядных токов 50 А – 2 кА большинство экспериментальных значений и теоретических оценок плотности тока для чистых металлических катодов лежит в пределах $3 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{12} \text{ А/см}^2$. Загрязнение поверхности снижает плотность тока до $10^9 - 10^{10} \text{ А/см}^2$. Линейные размеры КП составляют $10^{-5} - 10^{-4} \text{ м}$.

Таблица 4.2. Относительное содержание $n_{i\text{отн}}$ и приведенная средняя энергия ионов различной зарядности (\bar{E}_i/Z) для различных материалов катода

Материал	Параметр	Зарядность					Параметры разряда	
		+1	+2	+3	+4	+5	U, В	I, А
Сплав 98% Cr + Y	$n_{i\text{отн}}, \%$	16	68	14	2	—	19,5	100
	$\bar{E}_i/Z, \text{эВ}$	73	37	34	—	—		
Титан BT-1	$n_{i\text{отн}}, \%$	27	67	6	—	—	20	100
	$\bar{E}_i/Z, \text{эВ}$	65	39	34	—	—		
Молибден МЧВП	$n_{i\text{отн}}, \%$	3	33	42	19	3	28	170
	$\bar{E}_i/Z, \text{эВ}$	95	65	51	45	49		

Плазма дугового разряда обладает специфическими характеристиками. Вблизи поверхности катода электронная температура близка к 1 эВ. С удалением от поверхности энергия электронов возрастает вследствие развития ионно-звуковой турбулентности и на расстоянии от КП более 10 мм достигает примерно 10 эВ. Средняя концентрация электронов обратно пропорциональна квадрату расстояния от КП. Вблизи КП на расстоянии 15 мкм она близка к 10^{19} см^{-3} . В противоположность этому концентрация нейтральных атомов катодного вещества увеличивается к периферии разряда, а средняя скорость ионов ограничена инфразвуковой скоростью (0,5–1,0 км/с).

Разряд сопровождается образованием быстрых паровых струй материала катода со скоростями до 10 км/с. В струях присутствуют ионы с энергией до 300 эВ. Средняя энергия ионов, как видно из табл. 4.2,

также намного превышает ту, которую мог бы приобрести однозарядный ион под действием статической разности потенциалов на разрядном промежутке. Аномально высокие энергии ионов связаны, по видимому, с неустойчивостями, развивающимися в плазме. Не исключена также возможность газодинамического ускорения частиц в прикатодной зоне, где существуют области с паровой фазой очень высокого давления (табл. 4.3). В них обнаружены также нейтральные атомы, большая часть которых обладает энергией до 5 эВ, а незначительная

Таблица 4.3. Температура и давление паров в области катодных пятен для различных катодов

Материал катода	$T_{\text{КП}}, \text{К}$	$T_{\text{КП}}/T_{\text{исп}}^*$	$P_{\text{КП}}, 10^4 \text{ Па}$
Ti	5570	1,560	60
Cu	2570	0,905	0,4
Mo	4860	0,985	0,6
Ta	9550	1,730	95
W	5210	0,900	0,2

* $T_{\text{исп}}$ — температура испарения материала.

доля — до 20 эВ. Степень ионизации струй для различных металлов достигает 25–100%, возрастая для более тяжелых элементов; для них же характерна и большая энергия ионов.

Принципиальный интерес при проектировании насосов с плазменными источниками геттерных пленок представляют закономерности собственно испарения (эрозии) катода. Быстроперемещающиеся КП-I оставляют на катоде характерный след в виде "елочки", состоящей из кратеров, средний диаметр которых равен 1 мкм при примерно такой же глубине. Поверхность между соседними кратерами практически не повреждена. Площадь кратеров составляет около 1% площади, занимаемой пятном. С увеличением разрядного тока примерно линейно возрастает и скорость испарения g , так что

$$g = g_0 I, \quad (4.2)$$

где g_0 — коэффициент массопереноса в дуговом разряде. В диапазоне токов, где возможно существование только КП-I, $g_0 \approx \text{const}$.

При появлении КП-II скорость испарения резко увеличивается. Средняя глубина эродированных участков близка к 20 мкм. Наиболее интенсивную эрозию вызывают КП-III, оставляющие оплавленные следы площадью 0,1–1 мм² и глубиной до 100 мкм. Для многих металлов в интервале $100 \leq I \leq 700 \text{ А}$ при существовании КП-II и КП-III скорость испарения и разрядный ток связаны соотношением

$$g = a \exp(\alpha I). \quad (4.3)$$

В этой формуле $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}^{-1}$, значение a определяется материалом катода. Более интенсивной эрозии подвержены материалы с высоким давлением паров и малой теплотой сублимации.

Коэффициент массопереноса в фазе преимущественного существования КП-II и КП-III зависит от разрядного тока:

$$g_0 = a \exp(\alpha I) / I. \quad (4.4)$$

Минимальному значению g_0 , как легко показать, соответствует ток 220 А (для титана), что близко к критическому току $I_{\text{мин}}$. Стало быть, эксплуатация дуговых испарителей в области критических токов энергетически невыгодна. По порядку g_0 лежит в пределах 0,1–1,0 мг/(с × А). Число электронов, необходимых для переноса одного атома геттера на анод, находится в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков.

Токовая зависимость скорости испарения для титана представлена на рис. 4.1.

Серьезный недостаток испарителей с интегрально холодным катодом — наличие в продуктах испарения капельной фазы. Эрозия катода в капельной фазе заметно снижает ресурс испарителей. Относительное содержание капель увеличивается с ростом разрядного тока и температуры катода; размеры капель — от долей микрометра до десятков мик-

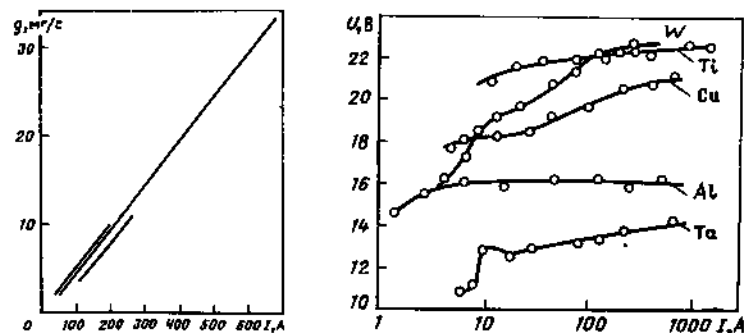


Рис. 4.1. Скорость испарения титана в разряде с интегрально холодным катодом как функция разрядного тока (по различным экспериментальным данным)

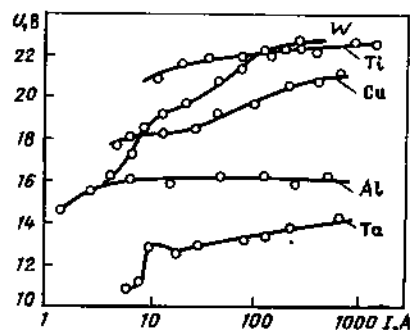


Рис. 4.2. Вольт-амперные характеристики разряда для катодов из различных материалов

рометров. Доля капельной фазы выше для металлов с низкой температурой кипения.

Факторы, влияющие на соотношение паровой и капельной фаз, до конца пока не выяснены. Образование капель связывают обычно с окклюдируемым в катоде газом. Использование катодов из обезгаженных металлов и металлов, получаемых методом зонной плавки в вакууме, уменьшает каплеобразование. Важную роль играют также скорость перемещения КП и температура катода. При увеличении скорости доля капельной фазы падает. Влияние температуры выражено более сложным образом. Так, повышение температуры катода из нержавеющей стали от 300 до 800 К из-за резкого усиления каплеобразования увеличивает эрозию более чем на 50%. В то же время аналогичный разогрев титанового катода приводит к незначительному росту скорости эрозии. Это связано с различием температур плавления металлов. В более легкоплавкой нержавеющей стали большая часть материала в области КП переходит в расплавленное состояние, что и порождает более интенсивное каплеобразование. Для катодов из тугоплавких металлов при токах, меньших 300 А, на долю капельной фазы приходится менее 1% общей массы эродированного материала.

Пространственное распределение потока микрокапель и нейтральных атомов испаряющегося вещества имеет максимум под небольшим углом к поверхности катода. Аналогичный максимум для ионной компоненты, на которую приходится более 80% переносимой с катода массы, направлен по нормали к катоду.

Важный фактор, влияющий на устойчивость и параметры разряда, — вольт-амперные характеристики и импеданс источников питания. Как видно из рис. 4.2, разрядный промежуток является существенно нели-

нейным элементом электрической цепи. Сам разряд к тому же устойчив лишь в статистическом смысле. Поэтому для плазменных испарителей необходимы источники с особыми параметрами. При случайном погасании разряда стартовое напряжение на электродах (напряжение холостого хода источника питания) должно восстанавливаться быстрее, чем электрическая прочность разрядного промежутка. Восстановление последней происходит за несколько микросекунд в результате быстрого рассеяния и конденсации паров металлов на стенках. Продолжительность этого процесса зависит от длины разрядного промежутка, материала и размеров электродов и давления остаточного газа.

Сформулированному требованию отвечают источники питания с круто падающими вольт-амперными характеристиками при напряжении холостого хода 60–70 В (для катодов из титана). Чем выше (в определенном интервале) крутизна вольт-амперной характеристики, тем меньше критический ток, стабильнее дуговой разряд и больше вероятность его зажигания при однократном инициировании. К примеру, вероятность зажигания, близкая к 0,5 при крутизне вольт-амперной характеристики 2 А/В, возрастает до 0,9, если крутизну увеличивают в 2 раза; почти вдвое (со 150 до 80 А) снижается критический ток. Для каждой модификации испарителя можно подобрать источники питания с оптимальными крутизной и импедансом. Расчетно-теоретические основы подобной оптимизации пока не разработаны, и подбор осуществляется эмпирическим путем. Повышению устойчивости разряда и снижению критического тока способствует также последовательное включение в цепь питания катушки индуктивности. Параллельное включение конденсатора увеличивает критический ток.

Потребляемая от источника питания мощность рассеивается в основном в прикатодной области. В стационарном режиме за счет теплопроводности катода поглощается свыше 30% этой мощности. На ионизацию паров, электронную эмиссию и ускорение ионов и электронов затрачивается более 60%. И лишь около 30% уходит на собственно испарение катодного материала.

Наложение внешнего магнитного поля определенных конфигураций, т. е. переход к магнитоуправляемому разряду, существенно увеличивает его устойчивость и улучшает технико-экономические характеристики испарителей. Появляется также возможность локализации зон испарения геттерного материала и эффективного управления их положением, что имеет принципиальное значение для структурно-геометрической оптимизации ЭФН. Короче говоря, магнитное управление сводится к формированию на поверхности катода одной или нескольких магнитных ловушек, предотвращающих уход КП за пределы рабочей области либо организующих их движение по заданным траекториям. Эти ловушки к тому же могут ограничивать разлет прикатодной плазмы, формируя преимущественные зоны напыления геттерного вещества. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

4.2. МАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

При возбуждении внешнего магнитного поля B_e движение КП в соответствии с принципом максимума приобретает направленный характер. Согласно этому принципу КП смещаются в направлении максимума тангенциальной к катоду составляющей индукции суммарного магнитного поля на границе пятна $B_{\Sigma}^T = |B_i^T + B_e^T|$, где B_i^T и B_e^T — тангенциальные составляющие индукции собственного поля КП и внешнего поля соответственно (рис. 4.3). Это происходит в результате поляризации объемного заряда прикатодной плазмы в магнитном поле. Объемный отрицательный заряд формируется на границе КП в области минимума магнитного поля, а положительный — в области его максимума. Отрицательный заряд подавляет эмиссию электронов с поверхности КП, тогда как положительный, напротив, ее усиливает. В результате происходит перемещение эмиссионных центров и, следовательно, всего КП в направлении максимума тангенциального магнитного поля.

В неоднородном магнитном поле результирующее движение КП складывается из трех составляющих:

1) "противоамперова" движения под влиянием устойчивой асимметрии в распределении B_{Σ}^T на границе КП (движение по $\text{grad } B_{\Sigma}^T$ в соответствии с рис. 4.3);

2) движения по $\text{grad } B_i^T$ в соответствии с правилом острого угла, согласно которому КП смещаются в направлении острого угла*, образованного силовыми линиями внешнего магнитного поля с поверхностью катода. Причиной асимметрии в распределении B_i^T на границе КП является отклонение токовых линий разряда от нормали к поверхности катода под влиянием поля;

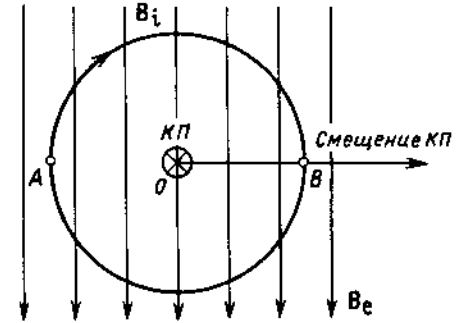
3) подобного же движения по $\text{grad } B_e^T$.

Вектор скорости компоненты 1 перпендикулярен плоскости, образованной силовыми линиями внешнего поля и токовыми линиями разряда; вектор скорости компоненты 2 находится в этой плоскости. Вектор скорости компоненты 3 целиком зависит от топографии внешнего поля и может иметь произвольную ориентацию. Преобладающим будет движение КП в направлении наибольшего градиента тангенциальной составляющей магнитного поля.

Эти закономерности лежат в основе работы плазменных источников с аксиально симметричными управляющими магнитными полями. "Противоамперову" движению соответствует вращение КП по периодическим, в частном случае замкнутым траекториям; две другие компоненты ориентированы по нормали к плоскости этих траекторий. Поскольку градиенты управляющих магнитных полей B_i^T и B_e^T могут иметь совпадающие либо противоположные направления, найдем их относи-

* Здесь и в дальнейшем под этим понимаем направление изнутри угла к его вершине.

Рис. 4.3. Схема, иллюстрирующая асимметрию суммарного тангенциального магнитного поля B_{Σ}^T на границе КП в однородном внешнем магнитном поле: в точке А индукция $B_{\Sigma}^T = B_e - B_i$; в точке В индукция $B_{\Sigma}^T = B_e + B_i$



тельные значения в зависимости от индукции и топографии внешнего магнитного поля.

Пусть в аксиально-симметричном постоянном неоднородном магнитном поле перпендикулярно оси установлен плоский катод радиусом r (рис. 4.4). "Противоамперову" движению КП соответствует его вращение по координате φ ; $\text{grad } B_i^T$ направлен к центру катода, а $\text{grad } B_e^T$ — к его периферии. Движение КП в радиальном направлении должно происходить в направлении большего градиента. Приняв за начало цилиндрической системы координат точку O , выделим зону КП, ограниченную окружностью радиуса R с центром в точке (r_0, φ_0) . Ввиду ма-

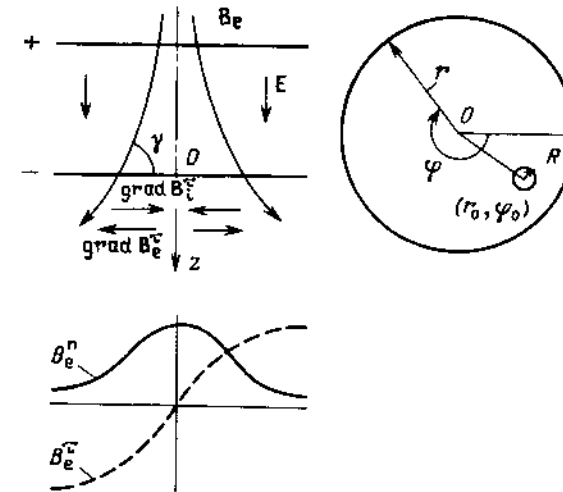


Рис. 4.4. Распределение полей в разряде с плоским катодом в аксиально-симметричном неоднородном магнитном поле

E — напряженность электрического поля вблизи КП; B_e^n , B_e^T — нормальная и тангенциальная к плоскости катода составляющие внешнего магнитного поля

лости КП $\text{grad } \mathbf{B}_e^T$ в зоне пятна можно считать постоянным и равным $\text{grad } \mathbf{B}_e^T(r_0, \varphi_0)$, причем

$$|\text{grad } \mathbf{B}_e^T| = k B_e, \quad (4.5)$$

где k — коэффициент, зависящий от топографии магнитного поля и положения точки (r_0, φ_0) . В этой же зоне

$$|\text{grad } \mathbf{B}_i^T| = \frac{B_i^0}{R} \text{ctg } \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \text{ctg } \alpha, \quad (4.6)$$

где $B_i^0 = \mu_0 I / 4\pi R$ — индукция собственного магнитного поля пятна, создаваемого разрядным током I на границе КП при нормальных к катоду токовых линиях разряда; α — угол наклона токовых линий к поверхности катода в области КП в проекции на плоскость rz .

Зависимость $\alpha = f(B_e)$ в области КП может быть найдена из уравнения движения электронов прикатодной плазмы, определяющих отклонение токовых линий от нормали (рис. 4.5). В масштабе скоростей электронов ионы и нейтральные атомы плазмы неподвижны; количество движения, теряемое электроном при соударении с ними, составляет $m v$ (m, v — масса и средняя скорость электрона). Обозначив ν эффективную частоту соударений электрона с ионами, уравнение его движения можно представить как

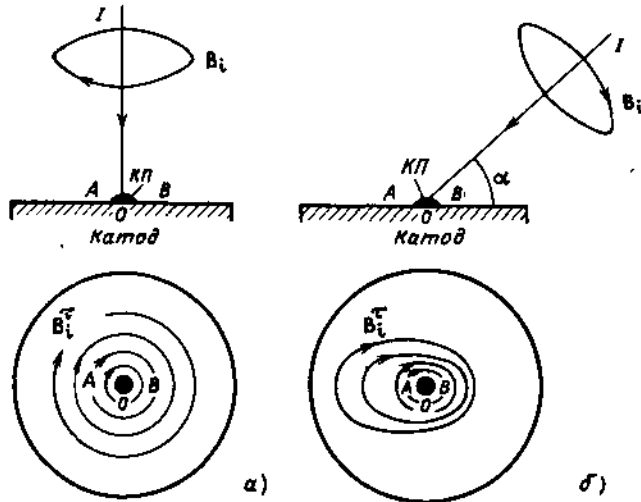


Рис. 4.5. Формирование асимметрии магнитного поля \mathbf{B}_i^T на границе КП во внешнем магнитном поле (б) и без него (а)

$$dv/dt = (e/m)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_e) - \nu \mathbf{v}. \quad (4.7)$$

Поскольку в стационарном приближении $dv/dt = 0$, это уравнение принимает вид

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_e - \rho \mathbf{v} = 0, \quad (4.7a)$$

где $\rho = mv/e$; e — заряд электрона. Учитывая соотношения

$$\text{ctg } \gamma = B_e^r / B_e^z; \quad B_e^z = B_e \sin \gamma; \quad \text{ctg } \alpha = v^r / v^z$$

и решая уравнение (4.7a), получаем

$$\text{ctg } \alpha = \frac{B_e^r B_e^z}{(B_e^z)^2 + \rho^2} = \frac{B_e^z \text{ctg } \gamma}{B_e^z + \rho^2 / \sin^2 \gamma}, \quad (4.8)$$

где индексами r и z обозначены проекции соответствующих векторов на оси координат. Подставив (4.8) в (4.6), найдем

$$|\text{grad } \mathbf{B}_i^T| = \frac{a B_e^z}{B_e^z + b}, \quad (4.9)$$

где $a = \mu_0 I \text{ctg } \gamma / 4\pi R^2$; $b = \rho^2 / \sin^2 \gamma$.

Совместный анализ зависимостей (4.5) и (4.9) позволяет определить критические точки $B_{кр}^I$ и $B_{кр}^{II}$, в которых характер движения КП резко меняется:

$$B_{кр}^I = \frac{a}{2k} - \sqrt{\frac{a^2}{4k^2} - b}; \quad (4.10a)$$

$$B_{кр}^{II} = \frac{a}{2k} + \sqrt{\frac{a^2}{4k^2} - b}. \quad (4.10b)$$

При $B_{кр}^I < B_e < B_{кр}^{II}$ $|\text{grad } \mathbf{B}_i^T| > |\text{grad } \mathbf{B}_e^T|$ (рис. 4.6), и направление движения КП определяется правилом острого угла. При $B_e < B_{кр}^I$ и $B_e > B_{кр}^{II}$ $|\text{grad } \mathbf{B}_i^T| < |\text{grad } \mathbf{B}_e^T|$, поэтому направление движения КП опреде-

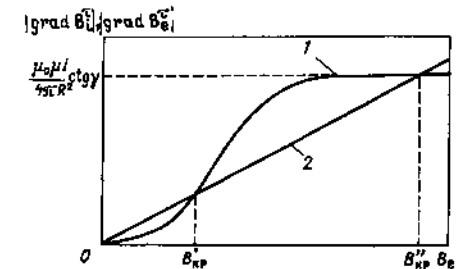


Рис. 4.6. Величины $|\text{grad } \mathbf{B}_i^T|$ (кривая 1) и $|\text{grad } \mathbf{B}_e^T|$ (кривая 2) в зависимости от индукции внешнего магнитного поля B_e

ляется направлением $\text{grad}B_e^T$, которое может не совпадать с направлением острого угла.

Локализация КП на поверхности катода возможна в том случае, когда $\text{grad}B_e^T$ и $\text{grad}B_i^T$ компенсируют друг друга. Положение зон локализации определяется векторным соотношением:

$$\text{grad}B_e^T + \text{grad}B_i^T = 0. \quad (4.11)$$

Входящие в соотношения (4.10) физические характеристики известны, к сожалению, лишь приблизительно. Приняв $I \approx 50$ А, $R \approx 10^{-4}$ м, $\gamma \approx 60^\circ$, $k \approx 10 \text{ м}^{-1}$, $\nu = 10^{12} \div 10^{14} \text{ с}^{-1}$ (усредненные экспериментальные данные), получим $B'_{\text{кр}} = 10^{-3} \div 1$ Тл; $B''_{\text{кр}} = 100$ Тл. Как видно, практический интерес представляют области $B_e < B'_{\text{кр}}$ и $B'_{\text{кр}} < B_e < B''_{\text{кр}}$ в отличие от области $B_e > B''_{\text{кр}}$. В первом случае направление движения КП задается $\text{grad}B_e^T$; в области сильных магнитных полей, напротив, определяющим будет $\text{grad}B_i^T$.

Значение $B_{\text{кр}}$ может быть уточнено прямыми экспериментами. В частности, при индукции $B_e > 5 \cdot 10^{-2}$ Тл КП в разрядном промежутке (см. рис. 4.4) перемещаются в направлении $\text{grad}B_i^T$ и локализуются в центре катода; при $B_e \lesssim 10^{-2}$ Тл пятна перемещаются к периферии катода по направлению $\text{grad}B_e^T$, делая разряд неустойчивым. Аналогичным образом ведут себя КП при арочной конфигурации управляющего магнитного поля (рис. 4.7). В этих экспериментах область максимума тангенциальной составляющей (точка В на рис. 4.7) смещена относительно области под вершиной арки, соответствующей нулевому значению нормальной к поверхности катода составляющей (точка А на этом же рисунке). При $B_e \approx 3 \cdot 10^{-3}$ Тл пятна локализуются на кольцевой дорожке, равноудаленной от областей А и В; при увеличении поля зона локализации смещается к области вблизи точки А, т.е. в направлении $\text{grad}B_i^T$. Из результатов этих экспериментов следует, что $B'_{\text{кр}} \approx 10^{-2}$ Тл.

Эффект стабилизации разряда и локализации КП при арочной конфигурации магнитного поля наблюдается уже при индукции $B_e \approx 5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Начиная с этого значения B_e на хаотическое перемещение КП по поверхности катода накладывается их заметное направленное (азимутальное) движение. Максимальное и минимальное значения скорости КП различаются примерно вдвое. По мере увеличения индукции скорость азимутального движения возрастает, а траектории КП приближаются по форме к окружностям. Зона, занимаемая траекториями, ограничена кольцевой дорожкой; ее ширина уменьшается с ростом индукции и при $B_e = 3 \cdot 10^{-3}$ Тл достигает 5–6 мм. При дальнейшем увеличении магнитной индукции ширина дорожки почти не изменяется,

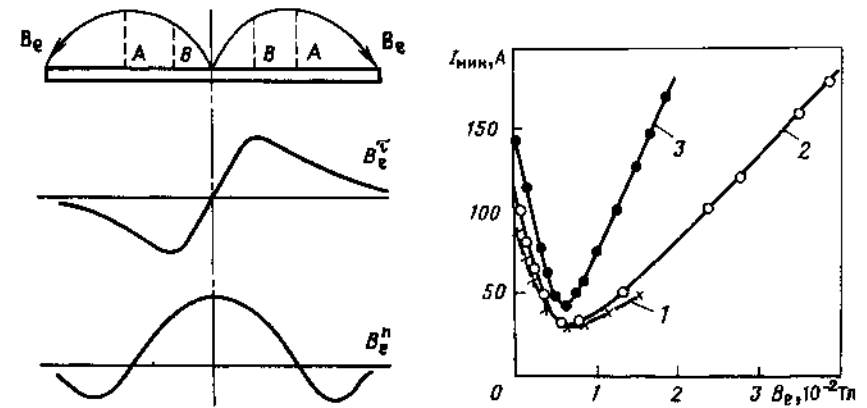


Рис. 4.7. Распределение тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции на поверхности плоского катода при арочной конфигурации управляющего поля

Рис. 4.8. Критический ток разряда с управляющим магнитным полем арочной конфигурации для титановых катодов с радиусом кривизны 35 мм (1), 65 мм (2) и для плоского катода (3) как функция магнитной индукции под вершиной арки

возрастает лишь средняя скорость вращения КП. Скорость азимутального движения КП увеличивается также с током разряда. В интервалах значений индукции $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ Тл и тока 50–250 А средняя скорость КП меняется от 4 до 40 м/с. При индукции около 0,4 Тл и выше дальнейшего роста скорости не происходит.

Экстремально малым значениям $I_{\text{мин}}$ соответствует лишь сравнительно узкий интервал индукций магнитного поля арочной конфигурации. При меньших и больших значениях индукции критический ток возрастает (рис. 4.8). Как видно из этого рисунка, независимо от радиуса кривизны катода значение B_e в этой области близко к $5 \cdot 10^{-3}$ Тл; $I_{\text{мин}}$ для катодов из титана составляет 30–40 А. Так же зависят от индукции и другие характеристики разряда, в частности подвижность электронов и их концентрация, интенсивность линейчатого излучения атомов и ионов материала катода и т.п.

Внешнее поле влияет также на скорость испарения, ее токовые зависимости и пространственное распределение потоков испаряющегося материала. С ростом индукции до 0,4 Тл эта скорость падает примерно до 80% значения, соответствующего отсутствию поля, и в дальнейшем не меняется. Ее снижение связано, по-видимому, с уменьшением размеров кратеров и числа образующихся микрокапель из-за отмеченного выше возрастания средней скорости КП в магнитных полях. Этот же фактор определяет крайне медленный рост скорости испарения с увеличением

разрядного тока. Скорость испарения титана в магнитоуправляемых плазменных испарителях в интервалах токов и индукций 35–70 А и $(0,5 \div 2) \cdot 10^{-2}$ Тл почти постоянна и равна 2–3 мг/с. Наложение внешнего поля к тому же приводит к заметной деформации индикатрисы пространственного распределения потока расплывающегося материала: по нормали к поверхности катода формируется острый максимум, тогда как при отсутствии управляющего поля распределение близко к косинусному.

4.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕТТЕРНЫХ ПЛЕНОК

Испарители на основе плазменных источников геттерных пленок можно классифицировать по четырем основным признакам: типу разряда, генерирующего металлическую плазму; масштабнo-геометрическим факторам; электрическим режимам эксплуатации; способам управления разрядом.

По типу разряда различают дуговые и искровые испарители. Масштабы практического использования искровых испарителей ограничены физическими экспериментами, и промышленного выпуска насосов на их основе нет. Поэтому в дальнейшем искровые испарители не рассматриваются.

По масштабнo-геометрическому признаку различают квазиточечные и распределенные (протяженные) испарители с плоской или профилированной эмитирующей поверхностью. В первом случае поток геттерных частиц можно считать исходящим из одной точки относительно запыляемых поверхностей, так что плотность этого потока в первом приближении обратно пропорциональна квадрату расстояния от испарителя до запыляемой поверхности (с коррекцией на отмеченную выше анизотропность разряда как источника геттерных пленок). Во втором случае площадь эмитирующей атомы геттера поверхности в одном или двух направлениях соизмерима с площадью запыляемой поверхности, так что распределение потоков расплываемых атомов определяется конкретной геометрической структурой. Широко распространены, в частности, стержневые испарители, ориентированные вдоль или параллельно оси цилиндрической запыляемой поверхности. Формируемые ими геттерные пленки однородны по толщине.

По электрическим режимам различают испарители постоянного и переменного тока, испарители, работающие в импульсном и непрерывном режимах, а также испарители, работающие в режиме периодического включения с регулируемой скважностью.

Наконец, по способу стабилизации и управления разрядом наряду с электродуговыми испарителями, в которых не используются какие-либо физические механизмы, способствующие повышению устойчивости,

упорядочиванию движения КП или управлению параметрами дуги, различают испарители с автоуправлением и с управлением внешним магнитным или высокочастотным полем.

В испарителях с автоуправлением регуляризация траекторий КП осуществляется магнитным полем, которое создается самим разрядным током, текущим по токоподводящим шинам или непосредственно по катоду. Наиболее распространены автоуправляемые стержневые испарители.

В испарителях второго типа управляющее поле создается внешним постоянным магнитом или электромагнитом. С его помощью, как показано в § 4.2, могут быть локализована область устойчивого существования КП, упорядочены траектории их движения и существенно снижен разрядный ток. Высокочастотные стабилизирующие поля для испарителей вакуум-технического назначения не применяются.

Одна из важных задач при создании электродуговых испарителей — надежный поджиг разряда в вакууме. Разряд инициируется с помощью стартового плазменного сгустка (форплазмы), формирующего проводящий канал между катодом и анодом. Форплазма может создаваться разными методами. Наиболее простой из них основан на импульсном электрическом пробое между вспомогательным поджигающим электродом и катодом испарителя. При этом происходит частичное испарение материала катода, создаются условия для зарождения КП и становится возможным возбуждение дугового разряда в основном межэлектродном промежутке при сравнительно низком напряжении. Однако непосредственный пробой разрядного промежутка высоковольтным импульсом как метод формирования форплазмы сравнительно ненадежен и энергозатратен.

Для обеспечения электрической изоляции источника запускающего сигнала от силовой цепи иногда используют лазерный поджиг. На участке катода диаметром около 0,1 мм фокусируется излучение импульсного лазера с энергией несколько миллиджоулей, что вызывает испарение и частичную ионизацию паров геттера. Этот метод непрактичен из-за высокой стоимости и постепенного затемнения оптики.

Иногда как способ поджига используют джоулев нагрев контактного участка при кратковременном замыкании поджигающего электрода на катод. Поджигающий электрод приводят в соприкосновение с катодом и через зону контакта пропускают электрический ток; затем электрод отводится. Испарение металла в контактной зоне происходит в результате ее омического нагрева. Этот способ, обычно применяемый в вакуумных разрядниках, можно использовать в электродуговых испарителях стационарного действия, где поджиг производится не слишком часто. Недостатки этого способа — опасность приваривания поджигающего электрода к катоду, необходимость специального механизма его быстрого возвратно-поступательного или качательного перемещения, громоздкость поджигающего устройства в целом.

Частичное испарение одного или обоих электродов можно вызвать с помощью высоковольтного пробоя между электродами по поверхности изолятора. При этом испаряется и ионизируется количество материала, достаточное для поджига вакуумной дуги.

Поджиг может осуществляться "триггерным" способом. Поджигающий электрод изготавливают из гидрида титана. Малый импульс тока через электрод вызывает выделение небольшого водородного облака и его ионизацию и тем самым инициирует дугу. Поскольку масса выделяющегося водорода незначительна, он легко поглощается титановым геттером, и после прекращения разряда вакуум полностью восстанавливается.

Поджигающий электрод может быть выполнен в виде накаливаемой спирали из тугоплавкого металла. При включении испарителя токовым нагревом испаряют сконденсированную на поверхности спирали пленку геттера, затем в парах геттера осуществляют электрический пробой промежутка между катодом и поджигающим электродом.

Возбуждение дуги может осуществляться, наконец, путем электрического взрыва тонкой проводящей пленки, нанесенной на диэлектрическую поверхность между двумя электродами (*электровзрывные поджигающие устройства*). Одним из электродов (отрицательным) может быть непосредственно поверхность катода. Однако во избежание термического разрушения в качестве поджигающих целесообразно использовать отдельные электроды. Наиболее устойчиво поджигающее устройство для испарителей с разрядным током 150–200 А работает в том случае, если отрицательный электрод выполнен из хромоникелевой нержавеющей стали.

Если запускающий электрический импульс генерируется при разряде конденсатора на импульсный трансформатор, то для устойчивого поджига необходимо, чтобы электрическое сопротивление проводящей пленки оставалось в интервале $2-2 \cdot 10^4$ Ом (лучше $10-10^4$ Ом). Энергия, рассеиваемая на пленке, должна быть такой, чтобы количество испаряемого за импульс материала примерно компенсировалось количеством материала, осаждаемого на диэлектрической поверхности в течение цикла испарения. Типичные характеристики генератора генерируемое импульсное напряжение 1,8–2,0 кВ; длительность импульса 0,3 мс; выделяемая в нагрузке энергия 10–15 Дж.

При непродолжительной работе испарителя в режиме напыления и частом запуске сопротивление проводящей пленки может возрасти до нескольких сотен килоом. Для этого необходим генератор с большей амплитудой запускающего импульса. При длительном напылении, приводящем к осаждению на диэлектрической поверхности сравнительно толстых пленок с электрическим сопротивлением менее 10^2 Ом, поджиг, напротив, возможен без подачи высоковольтных импульсов: анодный электрод поджигающего устройства достаточно кратковременно соединить с положительной клеммой электрической цепи.

На диэлектрик электровзрывного поджигающего устройства действуют электротермические ударные нагрузки большой интенсивности. Поэтому он должен выполняться из высокопрочной алюмооксидной керамики марок 22ХС, ГБ-7 и др. В испарителях переменного тока предпочтительнее использовать оксид бериллия. Стеатит и ультрафарфор быстро растрескиваются и имеют малый ресурс.

Цепи питания дугового разряда и устройства поджига часто связывают таким образом, чтобы при случайном погасании дуги на поджигающие электроды автоматически подавался новый запускающий импульс. Это гарантирует стабильность процесса напыления. Для устойчивого поджига необходимо правильно выбирать форму и расположение электродов. Из области формирования стартовой плазменной дуги должен беспрепятственно попадать в основной разрядный промежуток.

Для нормальной работы испарителей должно быть исключено сколько-нибудь длительное пребывание КП вне рабочей зоны катода. С этой целью используются обычно металлические экраны, устанавливаемые с зазором 3–5 мм вокруг нерабочих участков испарителя и электрически изолированные от остальных элементов. При включении испарителя в результате бомбардировки положительными ионами экран приобретает "плавающий" положительный относительно катода потенциал. Значение этого потенциала определяется положением КП. При нахождении КП в непосредственной близости от экрана потенциал составляет 16–17 В; уход КП снижает его до 8 В. Изменения плавающего потенциала при перемещении КП особо заметны в протяженных испарителях. Экраны должны выполняться из немагнитных материалов, чтобы индуцированное в них разрядным током магнитное поле не влияло на траектории КП.

При уходе КП под экран разряд гаснет. Предельная глубина ухода КП не превышает утроенной ширины зазора между экраном и катодом. Поскольку при рабочем испарителе в зазор попадает часть испаряемых атомов, он постепенно зарастает металлом. При полном зарастании зазора КП переходят на экран, перемещаясь к токоподводу. Испарение с поверхности экрана приводит к запылению изоляторов и вызывает аварийную ситуацию.

Опасность зарастания зазора особенно велика в начальный период эксплуатации испарителя, поскольку на этой стадии угол видимости зазора из любой точки рабочей поверхности максимален. Этот процесс можно замедлить или вообще предотвратить с помощью выступа высотой 1,5–2,0 мм по периферийной части рабочей поверхности.

Рабочая поверхность может быть ограничена вставками из керамики. Возможно также применение защитных оболочек из тугоплавких металлов, окружающих нерабочие поверхности. Критический ток защитных оболочек должен существенно превышать рабочий разрядный ток. Обычно оболочки выполняют из молибдена, применяют также тантал и вольфрам. КП, вышедшие на защитную оболочку, сразу гаснут на ней.

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности испарителей, работающих в условиях частого и длительного контакта с атмосферным воздухом, целесообразно совместное использование электростатических экранов и защитных облочек.

Основными конструктивными элементами испарителей являются катодный узел, поджигающее устройство и анодный электрод. Катодный узел включает собственно катод, выполненный из геттерного материала и, как правило, имеющий водяное охлаждение, один или несколько электростатических экранов, опорные изоляторы и электрические гермовводы. Поджигающее устройство в большинстве случаев конструктивно объединено с катодным узлом. Функции анода выполняет обычно непосредственно запляемая поверхность (корпус насоса). Иногда устанавливается дополнительный анодный электрод.

Перейдем к типичным конструкциям испарителей. Собственно катод из геттерного материала крепится на водоохлаждаемой подложке; в отдельных конструкциях он непосредственно омывается водой. Рабочие поверхности катода, подложка и каналы охлаждения защищены от попадания КП электростатическим экраном. Катодный узел монтируется на опорном фланце.

Электровзрывное поджигающее устройство представляет собой керамический изолятор, армированный металлическими электродами, на поверхности которого создан проводящий слой. Один из электродов обычно присоединен непосредственно к катоду. При подаче на электроды высоковольтного импульса происходят электрический взрыв проводящего слоя и частичная ионизация образовавшегося пара, достаточная для возбуждения дуги. В дальнейшем проводящий слой на поверхности изолятора самовосстанавливается благодаря заплытию.

Испарители, выполненные по описанной схеме, имеют близкие характеристики и различаются формой рабочей поверхности, размерами и массой катода, конструктивным исполнением. Плазменные испарители модификации ПИВ встраиваются непосредственно в откачиваемые камеры (табл. 4.4, рис. 4.9). Унифицированные испарители модификаций ПУИ-У и ПУИ-В используются в геттерных насосах серий НДМ и НДГВ с различными системами охлаждения; их описание и характеристики даны в § 4.4.

Таблица 4.4. Конструктивные

Характеристика	ПИВ
Диаметр рабочей поверхности катода, мм	100
Начальная масса геттера, кг	1,4
Диаметр опорного фланца (по уплотнителю), мм	130
Масса испарителя, кг	7,2
Габариты испарителя, мм:	
высота	230
наибольший диаметр	190

характеристики квазиточечных плазменных испарителей

ПУИ-У			ПУИ-В		
Типоразмеры (марка насоса)			Типоразмеры (марка насоса)		
1	2	3	1	2	3
(НДМ-2)	(НДМ-10)	(НДМ-50)	(НДГВ-2/250)	(НДГВ-5/400; НДГВ-20/630)	(НДГВ-50/1000)
65	100	200	70	100	200
0,3	1,4	4,8	0,4	1,17	5,0
85	130	260	132	132	258
3	7,2	15,5	5,1	6.	21
300	230	305	165	285	290
140	190	330	195	195	330

Рабочей поверхностью испарителя ПИВ служит плоский торец катода. Собственно катодный блок включает цилиндрический катод из титана ВТ-1-00, устанавливаемый на водоохлаждаемом фланце, опорный токонесущий стакан с электроизолирующими и герметизирующими эластомерными прокладками и силовой токоввод с трубками водяного охлаждения; на токовводе размещена также отрицательная клемма подачи поджигающего импульса. В периферийной части катода установлены две керамические вставки электровзрывного устройства иницирования разряда с независимым токовводом. Поджигающий импульс положительной полярности подается через высоковольтный токоввод на присоединительном фланце. Цилиндрическая часть катода защищена

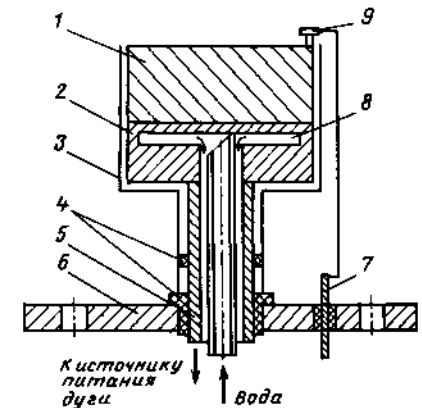


Рис. 4.9. Конструктивная схема плазменного испарителя ПИВ:

1 - титановый катод; 2 - водоохлаждаемый катодный фланец; 3 - электростатический экран; 4 - эластомерные прокладки; 5 - силовой токоввод; 6 - присоединительный фланец; 7 - высоковольтный токоввод; 8 - канал водяного охлаждения; 9 - электровзрывное поджигающее устройство

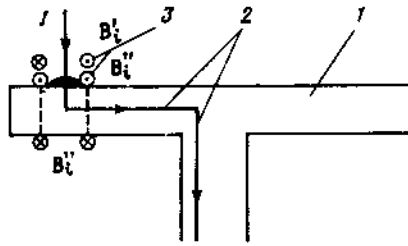


Рис. 4.10. Формирование асимметрии магнитного поля B_{Σ}^T на границе КП, находящегося в периферийной области плоского катода с осесимметричным токоподводом:
 1 — катод; 2 — токовые линии; 3 — силовые линии магнитных полей B_i' и B_i'' ; I — разрядный ток

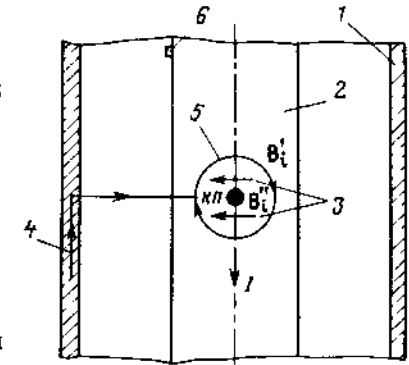
коаксиальным металлическим экраном, электрически изолированным от катода. Разрядный ток испарителя ПИВ составляет 150–200 А. При коэффициенте массопереноса для титановых катодов $g_0 = 50$ мкг/(с · А) указанный ток позволяет получить стационарную скорость испарения порядка 10 мг/с. Испаритель пригоден для создания насосов с максимальной производительностью до $0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Сходную конструкцию имеют испарители модификаций ПУИ-У и ПУИ-В.

Поскольку вероятность пребывания КП в центре плоского катода с осесимметричным токоподводом больше, чем на его периферии, при работе испарителя на поверхности катода образуется углубляющаяся воронка. Существование преимущественной области пребывания КП объясняется распределением токов и соответствующих им магнитных полей в зоне пятна (рис. 4.10). Электрический ток в зоне КП состоит из двух составляющих — тока разряда в плазме и тока, протекающего по катоду. Магнитные поля, создаваемые этими токами, приближенно можно считать полями, образованными линейными токами: B_i' — магнитное поле, создаваемое током разряда; B_i'' — поле, создаваемое текущим по катоду током. Оба поля направлены тангенциально катоду. При их сложении слева и справа от КП возникает асимметрия в распределении суммарного поля: слева от КП $B_{\Sigma}^T = B_i'' - B_i'$, справа от КП $B_{\Sigma}^T = B_i' + B_i''$. В соответствии с принципом максимума предпочтительным будет центростремительное движение КП, причем оно тем более ярко выражено, чем тоньше катод и чем больше его диаметр.

Если токоподвод осесимметричен по отношению к катоду, то воронка образуется в центре последнего. При асимметричном токоподводе, например, с помощью шины, изогнутой под углом к оси катода, воронка смещается в направлении токоподводящей шины, что снижает коэффициент использования геттера, поэтому в таких испарителях со стороны подложки должны устанавливаться вставки из магнитомягких материалов для симметризации поля.

В испарителях с электростатическим экранированием нерабочих поверхностей иногда возникает двойной дуговой разряд (анод — катод и анод — экран), приводящий к разрушению катодного блока. Для предотвращения двойного разряда промежуток анод — экран должен шунтироваться конденсатором.

Рис. 4.11. Схема формирования магнитных полей в протяженном испарителе (зона КП условно повернута на 90°):
 1 — цилиндрический анодный электрод; 2 — стержневой катод; 3, 5 — силовые линии магнитного поля; 4 — линии электрического тока; 6 — поджигающее устройство



Неуправляемый дуговой разряд в испарителях с плоским катодом имеет невысокую стабильность. Среднее время горения при токе 150 А составляет всего несколько десятков секунд. Разряд гаснет из-за ухода КП под экран. Стабильность разряда несколько возрастает при увеличении радиальных размеров катода, применении дополнительного анодного электрода в виде металлической оболочки, охватывающей рабочую поверхность катода, исполнении катода в форме стакана, обращенного внутренней поверхностью в сторону корпуса. Радиально повысить стабильность может лишь переход к магнитоуправляемому разряду. Достижимое при этом многократное снижение $I_{\text{мин}}$ способствует также существенному уменьшению доли капельной фазы и повышению энергетической эффективности испарителей.

В протяженных системах, особенно при взаимном затенении поверхностей, квазиточечные испарители малоэффективны. В таких системах предпочтительнее использовать встроенные протяженные автоуправляемые испарители, геометрически подобные откачиваемым камерам.

В протяженных испарителях обычно применяются стержневые или трубчатые катоды с цилиндрической поверхностью испарения. Часто используются и коаксиальные системы типа показанной на рис. 4.11; в ее нижней части установлен токоподвод. Поскольку расстояние анод — катод намного больше диаметра катода, влиянием магнитного поля тока, текущего по анодному электроду, можно пренебречь. Существенное влияние на движение КП будут оказывать лишь магнитные поля токового канала в плазме B_i' и тока, текущего по катоду, B_i'' . Оба эти тока можно считать линейными. Силовые линии создаваемых ими магнитных полей вблизи КП тангенциальны рабочей поверхности катода. При их сложении возникает асимметрия в распределении суммарного магнитного поля: максимальная магнитная индукция достигается под КП ($B_i' + B_i''$), минимальная — над ним ($B_i' - B_i''$). В соответствии с принципом максимума КП перемещаются в направлении $\text{grad}|B_i' + B_i''|$, т.е. в направлении токоподвода, и локализируются в узком кольце на краю катода.

Перемещение КП к токоподводу используется в протяженных испарителях импульсного действия. Поджигающее устройство устанавливается на торце катода, противоположном токоподводу. В испарителях реализуется режим сканирования КП; пятна пробегают вдоль всего катода и гаснут на дутогасителе из металла, имеющего больший критический ток. В другом подобном устройстве поджигающий электрод соединен с анодом через стабилитрон. Напряжение пробоя стабилитрона больше разности потенциалов на разрядном промежутке при горении дуги, но меньше напряжения холостого хода источника питания. Дутогаситель представляет собой коаксиальный катоду цилиндрический электрод, находящийся под плавающим потенциалом и размещенный у токоподвода. При уходе КП под этот электрод дуга гаснет; при этом на разрядном промежутке восстанавливается напряжение холостого хода, что вызывает поджиг разряда и повторение цикла.

Равномерное испарение катода может быть обеспечено также поочередным подключением источника питания к противоположным торцам испарителя. Переключение осуществляется с помощью датчиков положения КП и коммутирующего устройства, что делает такой испаритель малонадежным. В другой конструкции применен разомкнутый тороидальный катод; токопровод проходит внутри катода в изолированном канале (рис. 4.12). После поджига КП движется в направлении токоподвода (по стрелке), "перескакивая" через зазор, если его ширина не превышает долей миллиметра, и продолжая затем движение вдоль

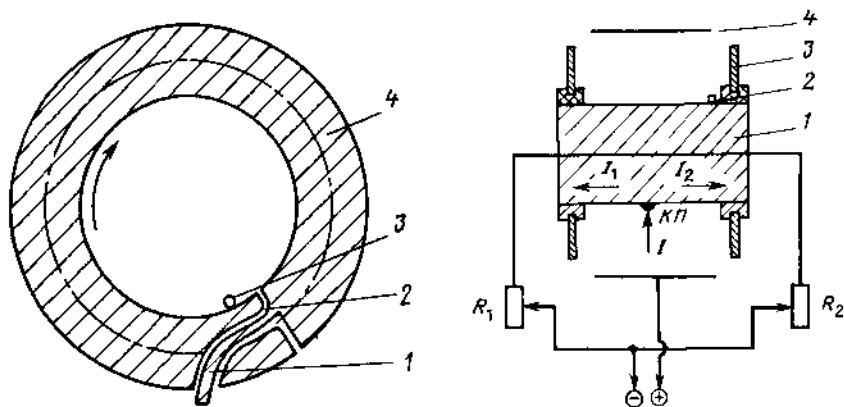


Рис. 4.12. Испаритель с тороидальным катодом:

1 — токопровод; 2 — зазор; 3 — поджигающее устройство; 4 — катод

Рис. 4.13. Симметричная схема включения протяженных автоуправляемых испарителей:

1 — катод; 2 — поджигающее устройство; 3 — электростатический экран; 4 — анод

тора. Разрядный ток испарителя около 75 А. Эта конструкция применима в квазизамкнутых испарителях любой формы.

В незамкнутых стержневых испарителях для достижения равномерности испарения применяют симметричную схему включения. Она предусматривает токоподвод с обоих торцов катода через регулируемые резисторы (рис. 4.13). При одинаковых электрических сопротивлениях плеч токи в левой (I_1) и правой (I_2) частях катода одинаковы и равны $0,5I$. Поэтому схема электрически симметрична относительно местонахождения КП. Магнитные поля, образованные токами I_1 и I_2 , взаимно компенсируются в зоне КП, а магнитное поле токового канала в плазме I не создает асимметрии. КП не имеют физически предпочтительных областей локализации и хаотически перемещаются по всей боковой поверхности катода. Изменяя сопротивления плеч, можно формировать области локализации КП на любом расстоянии от торцов. При одинаковых сопротивлениях происходит равномерное распыление всего катода. При нарушении баланса сопротивлений возрастает интенсивность распыления той части катода, где сопротивление меньше.

В испарителе, изображенном на рис. 4.14, тот же эффект достигается при подводе тока с одного торца. Симметризация токовых магнитных полей вблизи КП обеспечивается здесь при пропускании тока силой $0,5I$ по анодному проводнику, проходящему через полость катода. При выполнении условия симметризации ток справа от КП (разность токов; текущего по катоду и противоположного ему в анодном проводнике) равен току слева от КП (току в анодном проводнике). Так как эти токи противоположны по направлению, КП с приблизительно одинаковой вероятностью могут находиться в любой области катода.

Не останавливаясь на других схемах автоуправления разрядом в протяженных испарителях, еще раз подчеркнем, что в их основе лежит формирование такой комбинации токовых магнитных полей, которая обеспечивает примерно одинаковую вероятность пребывания КП в любой области рабочей поверхности или сканирование этих пятен.

В автоуправляемых испарителях с титановым катодом разрядный ток устойчивого горения дуги составляет 70–80 А. Магнитное поле, создаваемое этим током вокруг стержневого катода, ограничивает разлет ионизованной компоненты плазмы и способствует снижению критического то-

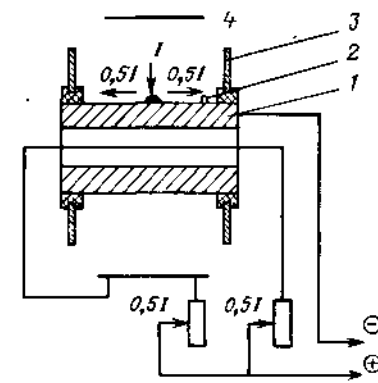


Рис. 4.14. Симметризация магнитных полей в автоуправляемом испарителе с односторонним токоподводом:

1 — катод; 2 — поджигающее устройство; 3 — электростатический экран; 4 — анод

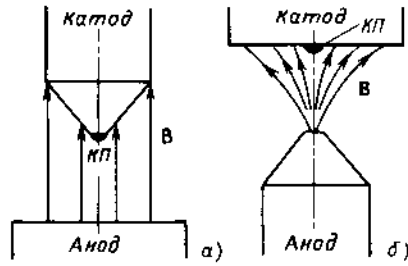


Рис. 4.15. Схемы стабилизации разряда и локализации КП однородным (а) и неоднородным осесимметричным (б) магнитными полями

ка. Заметный эффект это может дать, однако, лишь для катодов очень малого диаметра — порядка 1 мм и менее. Только для таких катодов разрядный ток около

40 А способен создать в зоне КП магнитное поле с индукцией примерно $5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Практическая ценность столь тонких катодов сомнительна. Более удобным представляется применение плазменных испарителей, управляемых внешним магнитным полем.

Простейшие схемы таких испарителей показаны на рис. 4.15 и 4.16. В квазиточечных испарителях КП локализуется в центре катода, где при $B_e \geq 5 \cdot 10^{-2}$ Тл выполняется сформулированный выше критерий локализации ($\text{grad}B_e^2 + \text{grad}B_e^2 = 0$). В испарителе, изображенном на рис. 4.16, а, КП, двигаясь по правилу острого угла, выталкиваются почти на вершину катода; "противоамперово" движение соответствует их вращению вокруг оси. В испарителе, показанном на рис. 4.16, б, меняя ток в одном из соленоидов, можно обеспечить сканирование КП практически по всей поверхности. Недостатком этих схем является довольно большая индукция требуемого магнитного поля (около $2 \cdot 10^{-2}$ Тл); в то же время критический ток снижается лишь до 70 А.

Смещение зон локализации КП может осуществляться осевым магнитным полем и дополнительным знакопеременным полем азимутального направления (рис. 4.17, а, б). В испарителе, показанном на рис. 4.17, а, сканирование по координатам φ и z производится при помощи постоянного соленоидального поля B_z и знакопеременного

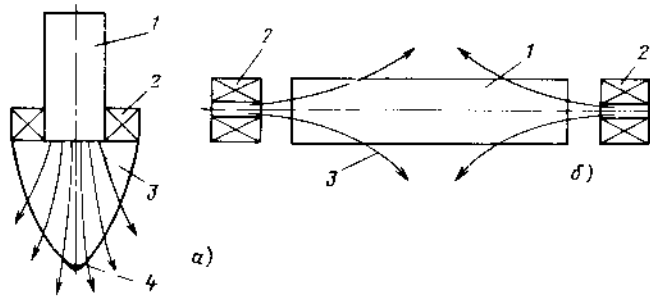


Рис. 4.16. Схемы управления разрядом постоянным соленоидальным магнитным полем в квазиточечном (а) и протяженном (б) испарителях:

1 — катод; 2 — соленоид; 3 — магнитные силовые линии; 4 — катодное пятно

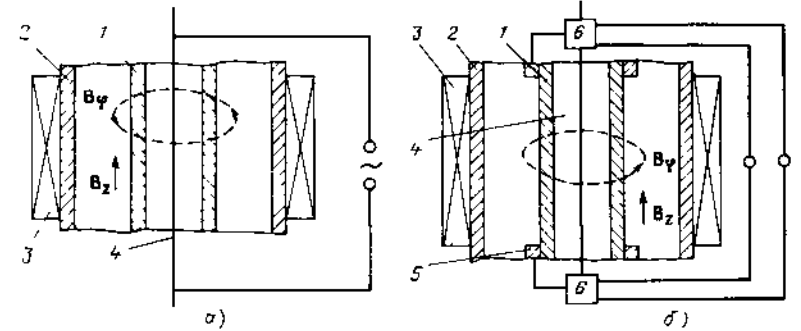


Рис. 4.17. Схемы управления разрядом с помощью постоянного и знакопеременного магнитных полей:

1 — стержневой катод; 2 — анод; 3 — соленоид; 4 — токопровод; 5 — датчики крайних положений КП; 6 — коммутатор полярности; а и б пояснены в тексте

поля B_φ , создаваемого проводом с током. В испарителе на рис. 4.17, б при достижении КП одного из крайних положений автоматически переключается полярность прикладываемого к токопроводу напряжения, и КП начинает перемещаться в противоположном направлении. В этих испарителях соленоидальное магнитное поле заставляет КП вращаться вокруг оси катода, а поле токопровода перемещает его в осевом направлении. Критический ток здесь может быть снижен до 30 А. Устройства сканирования, однако, усложняют испарители и снижают их эксплуатационную надежность.

Простым и удобным способом управления разрядом является использование магнитного поля арочной конфигурации (рис. 4.18, а, б). В ис-

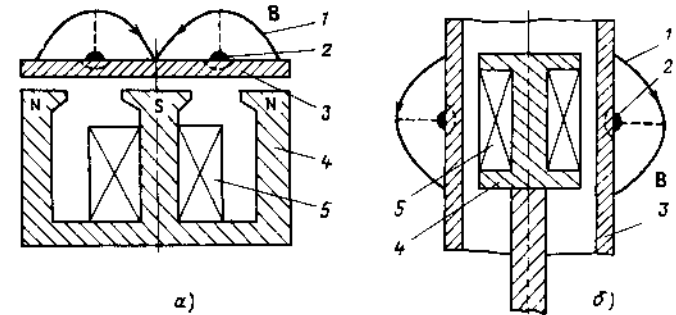


Рис. 4.18. Схемы стабилизации разряда и локализации траекторий КП арочным магнитным полем на плоском (а) и цилиндрическом (б) катодах:

1 — магнитные силовые линии; 2 — область локализации; 3 — катод; 4 — магнитопровод; 5 — электромагнитная катушка

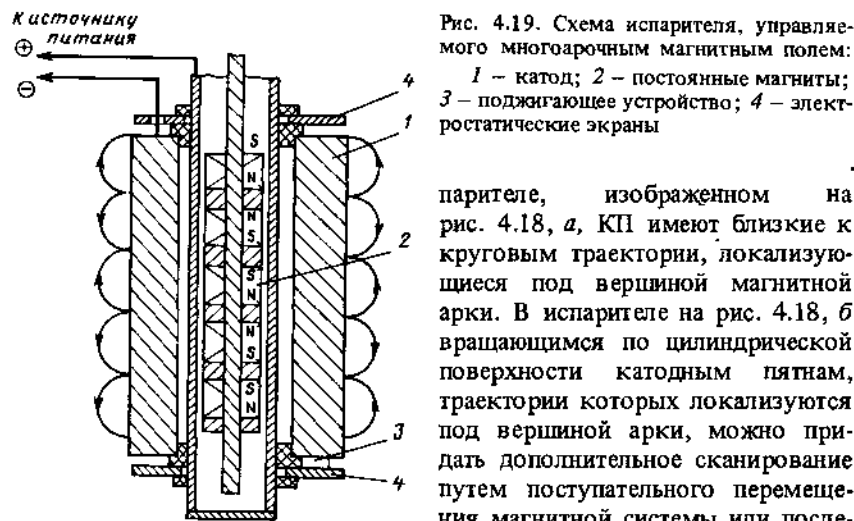


Рис. 4.19. Схема испарителя, управляемого многоарочным магнитным полем:
1 – катод; 2 – постоянные магниты; 3 – поджигающее устройство; 4 – электростатические экраны

парителе, изображенном на рис. 4.18, а, КП имеют близкие к круговым траектории, локализуемые под вершиной магнитной арки. В испарителе на рис. 4.18, б вращающимся по цилиндрической поверхности катодным пятнам, траектории которых локализируются под вершиной арки, можно придать дополнительное сканирование путем поступательного перемещения магнитной системы или последовательной подачи тока в одну

из секций секционированной электромагнитной катушки. Эта схема предпочтительнее также из-за удобства размещения и простоты магнитной системы и несколько меньшего критического тока. Надежная локализация КП достигается при $B_e \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Тл, что значительно ниже значений, необходимых для описанных ранее испарителей; для титановых катодов $I_{\text{мин}} \approx 35$ А.

В неподвижных одноарочных магнитных полях область локализации КП неизменна, что является их существенным недостатком, поскольку делает испарение неравномерным по поверхности катода. В многоарочных полях (рис. 4.19) этот недостаток частично устранен. Катодные пятна могут "перескакивать" из-под вершины одной арки к другой, причем статистическое время пребывания КП под каждой из них пропорционально индукции соответствующего магнитного поля. При равенстве индукций под всеми арками должна достигаться равномерность испарения. Однако для катодов достаточно большой толщины управление многоарочным полем неэффективно. При случайном превышении индукции под какой-либо из арок из-за неодинаковой намагниченности или неоднородности поверхности КП будут локализоваться преимущественно под ней, приводя к ускоренному испарению геттера под этой аркой, и, в свою очередь, к еще большему увеличению индукции. Коэффициент использования геттерного материала в таких испарителях невысок.

Наибольшую равномерность испарения и коэффициент использования геттера будут достигаться в том случае, если по мере испарения катода индукция управляющего магнитного поля в области локализации КП станет уменьшаться. Область локализации при этом будет смещаться на соседние участки катода. Это можно осуществить, например, при боч-

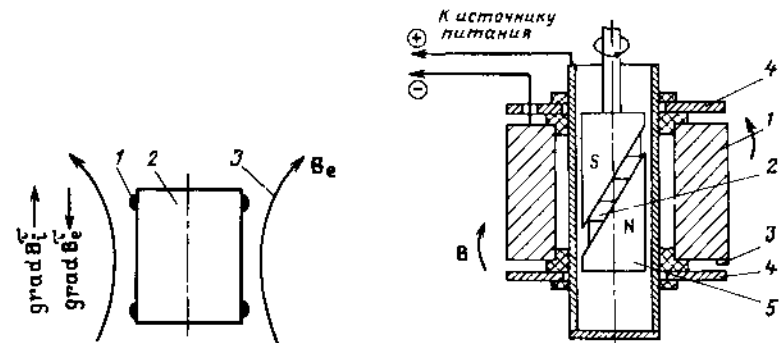


Рис. 4.20. Схема управления разрядом в испарителе с бочкообразной конфигурацией магнитного поля:

1 – области локализации КП; 2 – катод; 3 – магнитные силовые линии

Рис. 4.21. Схема испарителя, управляемого вращающимся магнитным полем арочной конфигурации:

1 – катод; 2 – постоянные магниты; 3 – поджигающее устройство; 4 – электростатические экраны; 5 – магнитопровод

кообразной конфигурации магнитного поля (рис. 4.20). Такую конфигурацию можно создать с помощью короткого соленоида, охватывающего катод, или специального магнитопровода. При достаточно сильных полях $|\text{grad}B_e^T| < |\text{grad}B_i^T|$ и КП будут выталкиваться на периферию катода. Локализации КП при этом происходить не будет, так как единственная зона, где соблюдается условие $\text{grad}B_e^T + \text{grad}B_i^T = 0$ (посредине катода), является областью неустойчивого равновесия.

При уменьшении индукции B_e до 10^{-2} Тл возникает ситуация, когда на краях катода $|\text{grad}B_e^T| > |\text{grad}B_i^T|$, а в его середине $|\text{grad}B_e^T| < |\text{grad}B_i^T|$. Таким образом, вблизи торцов образуются две области устойчивого равновесия КП, где выполняется критерий локализации, и КП "перескакивают" из одной области в другую, равномерно расплывая катод. По мере испарения катода индукция уменьшается, вследствие этого область локализации КП несколько смещается в зону более сильного поля. В таких испарителях равномерность испарения достигается при любой толщине катода. Конструктивный недостаток подобной схемы – необходимость сравнительно сложной магнитной системы, охватывающей катод.

Конструктивной простотой при достаточной равномерности испарения обладает испаритель с вращающимся арочным полем. Вершины магнитных арок образуют плоскость, пересекающую цилиндрический катод под углом к его образующей (рис. 4.21). Основными элементами испа-

рителя являются катод, поджигающее устройство и приводимая во вращение магнитная система. Все нерабочие поверхности закрыты электростатическими экранами.

Испаритель имеет следующие характеристики: ток $I_{\text{мин}} = 30$ А, рабочее напряжение 25 В, скорость распыления титана 2–3 мг/с. Снижение потребляемой мощности почти в 5 раз по сравнению с ранее описанными испарителями (ПИВ и другими) позволяет отказаться от водяного охлаждения. Запас геттерного материала определяется размерами катода, выбор которых не связан с принципиальными физическими ограничениями. Испаритель используется в одной из модификаций испарительных насосов серии НДГА (см. § 4.4).

Рассмотренные испарители питаются от источников постоянного тока. Разработаны также конструкции, работающие на переменном токе. Поскольку промышленного применения в вакуумной технике такие испарители пока не получили, ограничимся краткой информацией об их особенностях.

Питание переменным током существенно расширяет диапазон возможных конструктивных решений испарителей. В частности, описаны устройства с двумя попеременно расходуемыми электродами, многоэлектродные устройства с расходуемыми электродами из разных геттеров, устройства с общим нерасходуемым анодом и несколькими катодами и т.п.

В испарителях на переменном токе легче обойти затруднения, связанные с существованием ограничений по мощности разряда и, следовательно, по скорости испарения, характерных для испарителей постоянного тока. Эти ограничения определяются трудностями эффективного охлаждения катодов при больших стационарных токах и существованием критического тока $I_{\text{мин}}$. В испарителях переменного тока при относительно невысокой средней мощности в импульсе могут быть достигнуты очень большие значения тока и мгновенной скорости испарения. Средняя же скорость испарения регулируется в практически неограниченном интервале, начиная с любых малых значений, по заданному закону изменения момента зажигания дуги и, следовательно, длительности ее горения в течение фазы нужной полярности. Регулирование осуществляется изменением угла и частоты открывания тиристоров в системах питания.

Серьезный недостаток испарителей переменного тока — необходимость частого зажигания разряда. Так, при работе на промышленной частоте поджигающее устройство должно срабатывать с частотой до 50 Гц. Прельщает, однако, предельная простота электрической цепи. Экспериментальная модель насоса на основе испарителя переменного тока описана в следующем параграфе.

4.4. ГЕТТЕРНЫЕ И ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ ИСПАРИТЕЛЯМИ

В состав вакуумных агрегатов АВЭД (табл. 4.5) входят средства откачки двух типов — испарительный ГН с дуговым испарителем и паромасляный диффузионный насос для откачки инертных газов. Испаритель расположен во входном сечении ГН и обращен поверхностью испарения в сторону, противоположную откачиваемой камере. Анодом служит корпус. Дисковый катод из титана при помощи титановых шпилек крепится к водоохлаждаемому опорному цилиндру из меди. Опорный цилиндр и катод окружены экраном, электрически изолированным от корпуса и испарителя. Разряд зажигается импульсом тока при кратковременном контакте поджигающего электрода с катодом; перемещение электрода осуществляется соленоидальным электромагнитным устройством. Обмотка соленоида включена параллельно цепи разряда. При погасании разряда ток от источника питания постоянного тока начинает течь через обмотку; якорь соленоида, являющийся одновременно поджигающим электродом, перемещаясь, входит в контакт с катодом. После зажигания разряда обмотка обесточивается и якорь отводится от катода возвратной пружиной. Корпус и задняя крышка насоса, запыляемые геттером, охлаждаются водой. Предельное остаточное давление агрегатов $4 \cdot 10^{-5}$ Па; оно достигается через 5–6 ч после включения насосов.

Одна из моделей агрегатов этой серии выполнена в криосорбционном варианте. Поверхность осаждения геттерных пленок представляет собой полированный медный вкладыш, установленный в корпусе диаметром 0,4 м и питаемый жидким азотом. Предельное остаточное давление агрегата $1 \cdot 10^{-7}$ Па; оно достигается через 70–75 ч после включе-

Таблица 4.5. Характеристики вакуумных агрегатов серии АВЭД

Характеристика	АВЭД-2/260М	АВЭД-25/630М	АВЭД-40/800	ВЭД-1
Быстрота действия, м ³ /с:				
по азоту	2	10	40	50
по водороду	4	20	80	90
Диаметр входного сечения, мм	210	630	800	900
Запас титана, кг	4,3	7,5	7,5	4,3
Ресурс в режиме непрерывного испарения, ч	250	360	360	250
Габариты, мм:				
в плане	925 x 885	900 x 1870	1050 x 1780	2000 x 2450
высота	1020	1000	2250	2300
Быстрота действия диффузионного насоса по азоту, м ³ /с	0,06	0,5	—	0,5

ния испарителя. Быстрота действия $23 \text{ м}^3/\text{с}$ (по водороду) и $7 \text{ м}^3/\text{с}$ (по азоту); ресурс в режиме непрерывного испарения 300 ч; коэффициент использования титана 0,7. Для повышения надежности на испарителе установлено три одинаковых электромагнитных устройства поджига. В составе остаточных газов присутствуют водород, водяные пары, метан, азот, оксид и диоксид углерода и тяжелые углеводороды, поступающие из диффузионного насоса. Преимущественная область применения агрегатов серии АВЭД – откачка промышленно-технологического оборудования при давлении около 10^{-4} Па и выше в условиях интенсивных газовых нагрузок.

Для агрегатов серии АВЭД характерен ряд принципиальных недостатков. Расположение испарителя сравнительно большой площади во входном сечении заметно снижает КЗ. Контактное-резистивное поджигающее устройство инерционно и не очень надежно. Из-за малой теплопроводности контактной зоны опорный цилиндр – катод максимальный ток разряда ограничен значением 300 А; что сужает пределы регулирования и лимитирует производительность. Выгорание катода происходит неравномерно, в результате чего коэффициент использования геттера сравнительно низок.

Лучшими конструктивными и эксплуатационными характеристиками обладают агрегаты серии АВСД с магнитным управлением разрядом (табл. 4.6). В их состав кроме испарительного ГН входит диффузионный или турбомолекулярный насос для откачки инертных газов. Быстрота действия этого насоса выбирается близкой к 1% номинальной быстроты действия агрегата по азоту. Интервал рабочих давлений агрегатов серии АВСД $5 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-4}$ Па.

Магнитное управление разрядом осуществляется с помощью соленоида постоянного тока, установленного под цилиндрическим испарителем. Конфигурация силовых линий магнитного поля такова, что в соответствии с правилом острого угла область устойчивой локализации КП находится на верхнем торце. В процессе эксплуатации рабочая поверх-

ность принимает форму, при которой силовые линии становятся перпендикулярны к ней; ее эволюция подобна таянию горячей свечи. Противоположный рабочему торцу непосредственно омывается водой, что обеспечивает эффективное охлаждение катода и позволяет существенно расширить интервал разрядных токов. Испаритель расположен по центру днища, что снимает ограничения на диаметр катода и начальную массу геттера. Благодаря этому насосы серии АВСД имеют экстремально высокий ресурс.

В испарителе применено электровзрывное поджигающее устройство, установленное у основания катода. При зажигании КП движется по спиральной траектории вдоль боковой поверхности и затем выходит на рабочий торец катода. Таким образом, магнитное поле исключает длительное пребывание КП в зоне поджигающего устройства и его термическое разрушение.

Во входном сечении ГН установлена охлаждаемая шевронная ловушка. Ловушка и корпус имеют систему тренировочного прогрева до 600 К. Снаружи корпус покрыт теплоизолирующим экраном.

В электродуговом вакуумном агрегате ЭДВА-900/25000 применен автоуправляемый стержневой испаритель, все элементы которого монтируются на электроизолированной от корпуса трубчатой оси. Ось устанавливается на опорном фланце диаметром 400 мм; ее нерабочие участки защищены электростатическими экранами. Между экранами коаксиально устанавливается собственно катод – полый титановый цилиндр длиной 300 мм. Электрическая изоляция экранов от деталей, имеющих потенциал катода, осуществляется посредством керамических втулок; их перемещение в резьбовых отверстиях позволяет регулировать взаимное расположение катода и экранов. На торцевой поверхности катода со стороны, противоположной опорному фланцу, размещено электровзрывное поджигающее устройство. В качестве анодного электрода используется корпус. Тепловой режим испарителя регулируется расходом воды, циркулирующей внутри оси.

Испаритель смонтирован в горизонтально расположенном водоохлаждаемом корпусе наружным диаметром 1600 мм. Площадь запыляемой геттером поверхности составляет около 7 м^2 . По оси одного из днищ сварен патрубок диаметром 900 мм для подсоединения агрегата к откачиваемой камере; в патрубке установлен конический экран, защищающий камеру от запыления атомами геттера. К другому днищу приварен патрубок диаметром 450 мм, на фланце которого монтируется испаритель; к этому патрубку подсоединяется паромасляный агрегат АВП-250/630 для откачки инертных газов.

Автоуправление разрядом осуществляется магнитным полем разрядного тока, текущего в двухветвевом анодном проводнике (см. § 4.3, рис. 4.14). Одна из ветвей проходит вдоль оси катода и электрически связана с корпусом в зоне входного патрубка, другая соединена с корпусом непосредственно. Сила тока регулируется с помощью реостатов.

Таблица 4.6. Расчетные характеристики вакуумных агрегатов серии АВСД

Диаметр входного сечения, мм	Быстрота действия, $\text{м}^3/\text{с}$		Разрядный ток, А	Максимальная производительность, $10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$		Запас титана, кг	Ресурс в режиме непрерывного испарения, ч
	N_2	H_2		N_2	H_2		
250	3,0	6,0	50–100	4,5–8,9	13–27	3,2	360–200
400	7,0	15,0	50–250	4,5–22	13–53	7,2	690–160
630	19	40	50–400	4,5–36	13–106	12,8	1340–160
1000	50	100	50–500	4,5–45	13–133	20	2125–200
1600	110	200	50–500	4,5–45	13–133	28,6	3600–300

Равенство токов в каждой ветви обеспечивает статистически равномерное испарение по всей поверхности катода.

Для электропитания насоса используется автоматизированная система управления на основе сварочного выпрямителя. Насос может эксплуатироваться в нормальном (при давлении менее 10^{-2} Па) и форсированном по току режимах. Номинальная быстрота действия по азоту $25 \text{ м}^3/\text{с}$; предельное остаточное давление 10^{-5} Па; потребляемая мощность 5 кВт; ресурс в режиме непрерывного испарения 1000 ч.

Напыление геттерных пленок на корпус-анод в отдельных случаях нецелесообразно. К примеру, при эксплуатации промышленно-технологического оборудования с частым напуском атмосферного воздуха геттерная пленка насыщается влагой и другими активными газами. Поэтому после каждой экспозиции вакуумной системы в атмосферном воздухе пленка должна подвергаться термическому обезгаживанию. Однако из-за большой массы корпуса его прогрев требует значительных затрат времени, что приводит к затягиванию технологического цикла и росту энергопотребления.

Примером конструктивных решений, где этот недостаток устранен, служат электродуговые насосы серии НЭД. В качестве анодного электрода, являющегося одновременно поверхностью осаждения геттерных пленок, в этих насосах используется цилиндрическая тонкостенная оболочка, устанавливаемая по оси корпуса. Защита нерабочих участков насоса от запыления атомами геттера осуществляется шевронной ловушкой. В насосах применен унифицированный испаритель с магнитной стабилизацией, критический ток которого составляет 60 А.

Серия НЭД включает насосы с диаметром входного сечения 500 и 1200 мм. Их номинальная быстрота действия по тяжелым активным газам $6-60 \text{ м}^3/\text{с}$; максимальная производительность по воздуху $0,45-0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$; предельное остаточное давление 10^{-3} Па. В том случае, если совместно с ними используются вспомогательные насосы небольшой производительности для откачки инертных газов, предельное давление снижается до 10^{-5} Па. Интервал рабочих токов испарителя 100-600 А; соответственно их ресурс в режиме непрерывного испарения 900-150 ч; потребляемая мощность 23 кВт; продолжительность тренировки и термического обезгаживания анода после напуска атмосферного воздуха составляет 5-20 мин. Тренировочный прогрев до 500-550 К осуществляется непосредственно разрядным током в период форвакуумной откачки установки.

Для откачки некоторых вакуумно-технологических установок удобны плоские электродуговые сорбционные панели, встраиваемые в вакуумные камеры. Панель состоит из прямоугольного титанового катода и отстоящего от него на 60-80 мм анодного электрода в форме охлаждаемой шевронной ловушки, запыляемой геттерной пленкой. Для равномерного осаждения пленки испарение ведут в режиме сканирования КП. Опытно-промышленный образец такой панели размерами

Таблица 4.7. Характеристики сверхвысоковакуумных испарительных насосов серии НДМ

Характеристика	НДМ-2	КДМ-5	НДМ-10	НДМ-20	НДМ-50	
Диаметр входного отверстия, мм	250	400	500	630	1000	
Быстрота действия, $\text{м}^3/\text{с}$	вода	N_2 4	10	15	25	60
		H_2 5	13	18	30	75
Хладагент	жидкий азот	N_2 5	15	20	30	80
		H_2 12	35	50	70	200
Запас геттера в испарителе, кг	0,3	0,3	1,4	4,0	4,8	
Длительность цикла испарения при периодическом режиме работы, с	5	10	20	30	80	
Ресурс испарителя, ч	Непрерывное испарение	30	30	70	200	300
	Периодическое испарение при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па	N_2 $1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^3$
Хладагент	жидкий азот	N_2 $2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
		N_2 $2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Максимальное рабочее давление, Па	вода	N_2 $7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
		H_2 $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Расход жидкого азота при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па, $\text{дм}^3/\text{ч}$	Хладагент	N_2 $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
		H_2 $3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
		1	2	3	4	8

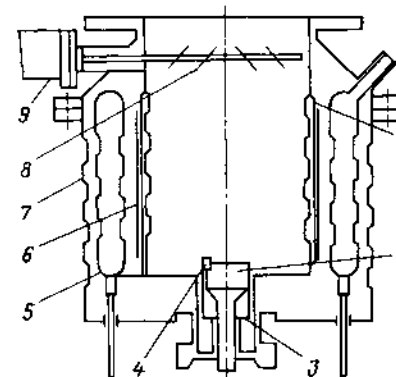
800 × 800 × 320 мм имеет быстроту действия по тяжелым активным газам 2,5 м³/с; ее максимальная производительность по азоту 0,25 м³ × х Па/(с · м²).

Для сверхвысоковакуумной откачки ускорителей, термоядерных установок и специализированного технологического оборудования разработаны насосы дуговые с моноиспарителем серии НДМ (табл. 4.7), насосы с испарителями блочного типа, в которых возможно последовательное напыление геттерных пленок различного состава, насосы дуговые геттерные с водяным охлаждением запыляемой поверхности серии НДГВ и насосы дуговые геттерные с охлаждением запыляемой поверхности жидким азотом серии НДГА (табл. 4.8). Они имеют быстроту действия до 130 м³/с, не содержат в спектре масс тяжелых углеводородов, обладают значительным ресурсом, надежностью и эксплуатационной гибкостью.

Насосы выполнены по единой компоновочной схеме. Ее основными особенностями являются применение подвижного экрана (жалюзи), обеспечивающего эффективную защиту откачиваемой камеры от запыления геттером в режиме испарения, а также взаимное тепловое экранирование насоса и камеры при КЗ, на 25–30% больше, чем в традиционных конструкциях с неподвижным оптически непрозрачным экраном; исполнение корпуса в виде тонкостенного цилиндра с двойным профилированием стенок, соизмеряющего необходимую прочность и жесткость с минимальной металлоемкостью и соответственно с незначительными затратами жидкого азота на начальное охлаждение; использование независимой от основного вакуумного тракта системы теплоизоляции поверхностей напыления геттерных пленок, что заметно повышает на-

Рис. 4.22. Компоновочная схема испарительных насосов серии НДМ:

1 – корпус; 2 – катод; 3 – экран; 4 – электровзрывное поджигающее устройство; 5 – накопитель жидкого азота; 6 – резистивный нагреватель; 7 – наружный кожух; 8 – поворотный экран (жалюзи); 9 – электромеханический привод экрана.



дежность вакуумной системы при длительной эксплуатации; универсальная система охлаждения (вода – жидкий азот), обеспечивающая легкость перехода к оптимальным режимам при изменении характера газовой нагрузки и задач физического эксперимента.

Насосы имеют цилиндрическую форму с осевым расположением испарителя на днище. Геттерные пленки напыляются непосредственно на внутреннюю поверхность корпуса. Во входном сечении насоса установлен поворотный экран-жалюзи с электромеханическим и ручным приводами. При включенном испарителе жалюзи закрыты; в паузе между циклами напыления они полностью открыты. Стартовая форплазма генерируется электровзрывным поджигающим устройством вблизи рабочей поверхности катода.

Предельное остаточное давление зависит от способа охлаждения запыляемых геттером поверхностей. При охлаждении стенок водой и жидким азотом оно составляет $(5 \div 8) \cdot 10^{-7}$ и $(0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-8}$ Па соответственно. При откачке смесей, содержащих примесные инертные газы, совместно с насосами НДМ, НДГВ и НДГА должны использоваться МЭРН или турбомолекулярные насосы с относительной быстротой действия около 1%.

В насосах серии НДМ применены испарители ПУИ-У (см. § 4.3). Корпус выполнен в виде двустенной гофрированной оболочки, полости которой используются для подачи хладагента (рис. 4.22). В вакуумированном пространстве между корпусом и наружным кожухом установлены накопитель жидкого азота и резистивные нагреватели для термического обезгаживания стенок при температуре до 750 К. Эксплуатация насосов возможна при произвольной ориентации в пространстве. Их масса 60–950 кг, потребляемая мощность в режиме испарения 3,5 кВт.

Насосы серии НДГВ имеют водяное охлаждение. В них применены испарители ПУИ-В, описанные в § 4.3. Компоновочная схема и вакуумные параметры этих насосов близки к аналогичным характеристикам

Таблица 4.8. Характеристики сверхвысоковакуумных насосов серий НДГВ и НДГА

Характеристика	Серия НДГВ				Серия НДГА			
	250	400	630	1000	250	400	630	1000
Диаметр входного отверстия, мм	250	400	630	1000	250	400	630	1000
Быстрота действия, м ³ /с:								
по азоту	2	6	16	40	3	8	20	60
по водороду	3	8	20	50	8	20	50	130
Запас титана в испарителе, кг	0,4	1,15	1,15	5,0	0,1	0,1	0,4	0,4
Расход хладагента, дм ³ /ч:								
вода	–	–	450	–	–	–	–	–
жидкий азот (при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па)	–	–	–	–	1	3	5	8

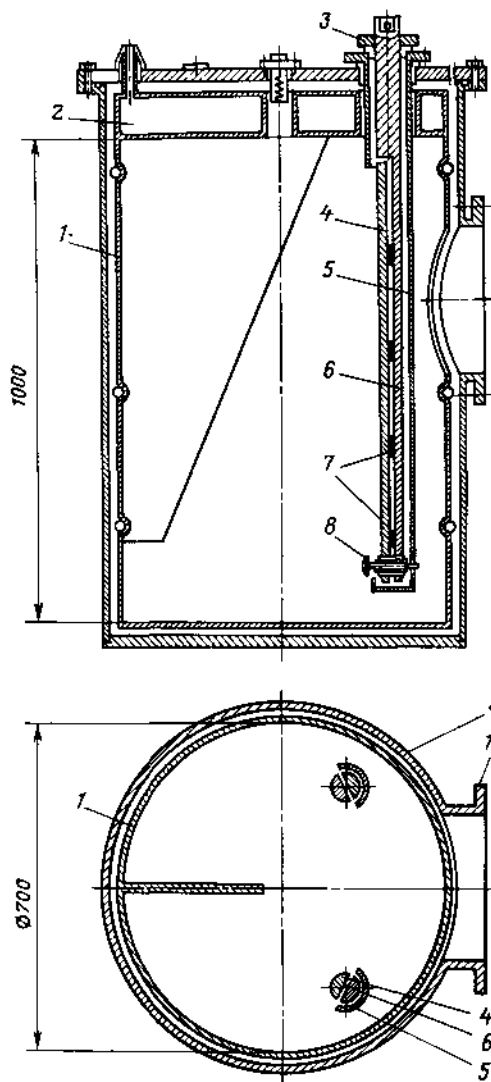


Рис. 4.23. Компонировочная схема испарительного насоса импульсного действия с протяженным испарителем:

1 — прогреваемая медная рубашка, запыляемая геттерной пленкой; 2 — накопитель жидкого азота; 3 — опорный фланец испарителя; 4 — стержневой титановый катод; 5 — защитный экран; 6 — медный токопровод; 7 — регулировочные прокладки; 8 — поджигающее устройство; 9 — корпус насоса; 10 — подсоединительный фланец

насосов серии НДМ в режиме водяного охлаждения стенок, однако конструктивно-технологические решения намного упрощены.

Для электропитания и управления насосами серий НДМ и НДГВ используются специализированная стойка, включающая выпрямитель на рабочий ток 180 А и напряжение холостого хода 80 В, блок импульсного питания поджигающего устройства, программатор, трехканальный коммутатор силовых и высоковольтных цепей, магнито-

разрядный вакуумметр и измерительно-блокировочные устройства. Насосы могут работать в режимах ручного либо автоматизированного управления. Продолжительность цикла напыления и интервал между циклами определяются жесткой временной программой или регулируются сигналами блокировочного вакуумметра. Продолжительность цикла напыления в автоматическом режиме составляет: 5 с, 10 с, 20 с, 1 мин, 2 мин; допускается также плавное регулирование в пределах 2–200 с. Уставка длительности паузы от 3 до 90 мин.

В насосах серии НДГА применены унифицированные магнитоуправляемые плазменные испарители со стабилизацией разряда вращающимся магнитным полем арочной конфигурации (см. рис. 4.21). Корпус насосов охлаждается жидким азотом. Для электропитания используется блок в составе выпрямителя на 50 А, генератора поджигающих импульсов, программатора и измерительных устройств. Масса блока питания 35 кг.

Многообразные возможности для откачки интенсивных потоков водорода и других активных газов открывает применение протяженных плазменных испарителей. Один из вариантов ГН с таким испарителем, работающим в режиме сканирования КП, показан на рис. 4.23. В корпусе на опорных фланцах установлены два одинаковых стержневых испарителя; поджигающее устройство расположено вблизи нижнего торца. Меняя место электрического контакта катода и токопровода, можно управлять характером и скоростью сканирования.

В случае прямого токоподвода электрический контакт существует на всем протяжении катода и токопровода. При подаче поджигающего импульса и загорании разряда КП перемещаются вверх, по направлению к опорному фланцу, где расположена клемма питания испарителя. При разрядном токе 200 А и длине катода 0,9 м время движения пятна составляет 80 мс. Дойдя до верхнего торца, КП гибнет, и разряд гаснет.

При бифилярном подводе тока катод имеет контакт с токопроводом только вблизи нижнего торца, поэтому токи в них текут в противоположных направлениях. Изменяя с помощью прокладок зазор между катодом и токопроводом, можно варьировать магнитное поле на поверхности испарителя и, следовательно, направление и скорость движения КП. При ширине зазора 1 мм пятна движутся вверх, время их перемещения до верхнего торца и погасания разряда при токе 200 А составляет 320 мс. Таким образом, при подаче на поджигающее устройство стартового импульса каждые 320 мс можно при необходимости реализовать стационарный режим испарения геттера, поскольку на поверхности катода к верхнему торцу будет постоянно пробегать КП.

Как показано на рис. 4.24, оба испарителя через балластные резисторы R подключаются к одному выпрямителю. Напряжение холостого хода составляет 75 В; мощность силового трансформатора 10 кВ · А. Стартовый импульс подается на центральный электрод поджигающего устройства коаксиального типа, вмонтированного в отверстие на рабочей поверхности катода. Центральный и внешний электроды разделены керамической трубкой, верхний пояс которой покрыт слоем аквадага или графита. Зазор h практически не влияет на характеристики поджигающего устройства, поэтому его увеличение из-за выгорания катода не сказывается на эксплуатационных параметрах испарителя.

Суммарная скорость испарения титана при разрядном токе на каждом испарителе 160 А составляет $(14 \pm 1,5)$ мг/с. Поток водорода $1,3\text{--}1,4$ м³ · Па/с, натекающий в камеру в течение 0,2–0,5 с, откачивается насосом при охлаждении стенок водой с быстротой около 30 м³/с.

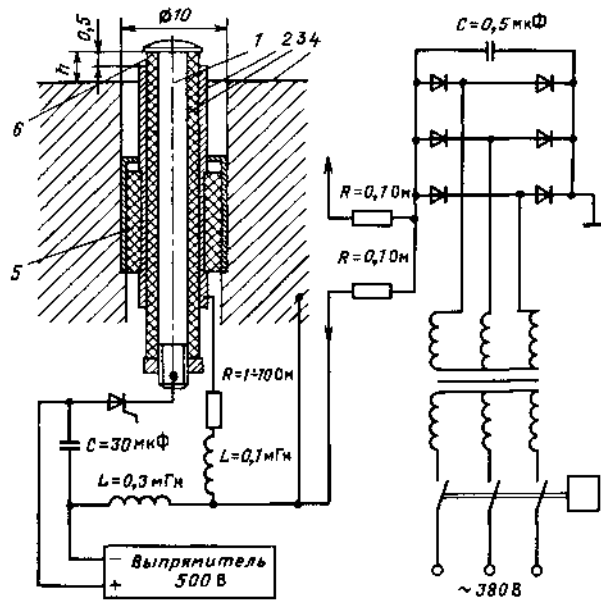


Рис. 4.24. Схема высоковольтного и силового питания испарительного насоса (см. рис. 4.23):

1, 2 – центральный и внешний электроды поджигающего устройства; 3 – керамическая трубка; 4 – катод; 5 – изолятор; 6 – кольцевой пояс, покрытый слоем аквадага

По аналогичным схемам построены интегрированные средства сверхвысоковакуумной откачки сильноточных протонных и электронных ускорителей, экспериментальных термоядерных установок и другой аппаратуры с разветвленным вакуумным трактом и значительной газовой нагрузкой. В эти установки встраивается несколько плазменных испарителей, работающих в режиме периодического напыления геттерных пленок. Для упрощения схемы и улучшения массогабаритных характеристик целесообразно использовать единый блок электропитания всех испарителей. Основные разрядные цепи испарителей постоянно подключены к выходу блока, тогда как поджигающий импульс подается поочередно на каждый из них.

При разработке единого блока питания необходимо предусматривать фильтры для подавления импульсных напряжений, возникающих за счет ЭДС самоиндукции силового трансформатора при случайном прекращении разряда в работающем испарителе. В противном случае эти импульсы могут вызвать пробой изоляции между катодом и корпусом и сыграть роль стартовых, приведя к самопроизвольному включению любого из испарителей. Для развития такого пробоя достаточно локального повы-

шения концентрации остаточных газов в зоне катода, отвечающего пашеновским кривым, или запыления поверхности изолятора, разделяющего катод и опорный фланец испарителя.

В лабораторную вакуум-техническую практику последних лет начинают входить ГН на основе испарителей переменного тока. В таких насосах достигается очень широкий интервал регулирования скорости испарения геттера. Описан, к примеру, экспериментальный образец насоса с быстрой действия $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$, в котором средняя скорость испарения может изменяться в 10^3 раз (от $0,35$ до $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ мг/с}$) благодаря прерывистому включению испарителя. Испаритель питается от промышленной сети через однофазный трансформатор мощностью $0,63 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; разрядный ток в импульсе составляет $250\text{--}300 \text{ А}$. Разряд горит в те полупериоды сетевого напряжения, при которых осуществляется синфазный поджиг дуги; стартовая форплазма генерируется электровзрывным устройством поджига. Скорость испарения можно регулировать как изменением частоты рабочих полупериодов (от $0,01$ до 5 Гц), так и вариацией фазы запуска, т.е. продолжительности импульса разрядного тока (от 2 до 8 мс).

Использование испарителей переменного тока упрощает блок питания и заметно расширяет эксплуатационные возможности насосов. Отпадает также необходимость в экранах, защищающих токоподводы и проходной изолятор. Однако значительно усложняются условия эксплуатации электродной системы поджигающего устройства, которое должно выдерживать примерно 10^6 стартовых импульсов. Наилучшие результаты в этих условиях дает использование керамики из оксида бериллия, имеющей повышенную теплопроводность. Применение керамики других марок затруднено вследствие локального перегрева поверхности, приводящего к быстрому испарению проводящего слоя и прекращению из-за этого стартовых электрических пробоев поверхности. Происходит также интенсивное разрушение зоны контакта испарителя и изолятора поджигающего устройства.

Крупный недостаток ГН с плазменными испарителями – их неспособность откачивать инертные газы. Концентрация электронов в плазме дугового разряда велика, однако их средняя энергия (около 1 эВ) на порядок ниже энергии ионизации аргона ($15,8 \text{ эВ}$) и гелия ($24,6 \text{ эВ}$). Немногочисленные образующиеся ионы из-за низкой разности потенциалов (около 30 В) приобретают слишком малые для надежной имплантации скорости. Ионы появляются в результате ударной ионизации высокоэнергетичными электронами.

Этот недостаток устранен в ИГН на базе плазменных испарителей. Модификации таких насосов, построенные на комбинированном использовании дугового разряда в парах геттера и пеннинговского или магнетронного разрядов в остаточном газе, рассмотрены в § 5.4. Здесь ограничимся описанием ИГН с электродуговым источником геттерных пленок, основанного на эффекте *плазменной сорбционной откачки*.

В этом насосе для ионно-имплантационной откачки инертных газов используется дополнительный несамостоятельный высоковольтный разряд, также в парах геттера.

В цилиндрическом корпусе в соленоидальном магнитном поле размещается плазменный источник геттерных пленок (рис. 4.25). Он включает титановый катод с торцевой рабочей поверхностью и анод, выполненный в виде двухзаходной спирали, прозрачной для потока металлической плазмы с катода. С помощью магнитопровода (на рисунке не показан) при включении соленоида на поверхности катода формируется стабилизирующее магнитное поле арочной конфигурации. КП имеют кольцевые траектории, локализованные под вершиной арки. В испарителе используется электровзрывное поджигающее устройство, смонтированное на катоде. Геттерная пленка осаждается на водоохлаждаемой поверхности корпуса.

В полости насоса соленоидом возбуждается магнитное поле с индукцией $B \approx 10^{-2}$ Тл. При подаче на анод с помощью автономного источника положительного потенциала $U_i = 200$ В относительно корпуса в пространстве между анодом и корпусом образуются скрещенные радиальное электрическое (E) и аксиальное магнитное (B) поля, достаточные для замagnичивания электронов. При включении испарителя в это пространство поступают носители заряда и зажигается несамостоятельный высоковольтный разряд. Поскольку концентрация металлической плазмы в этом пространстве при давлении остаточного газа 10^{-3} Па и ниже намного превышает концентрацию молекул газа, разряд горит в основном в парах геттера.

Подвижность замagnиченных электронов по радиусу резко ограничена, и доминирует их дрейфовый азимутальный ток. В пространстве дрейфа осуществляются ионизация молекул остаточного газа и дополнительная обдирка поступающих туда ионов металлической плазмы. Образующиеся ионы ускоряются радиальным электрическим полем к стенкам, на которых происходит конденсация атомов геттера и одновременно хемосорбция активных газов и имплантация ионов инерт-

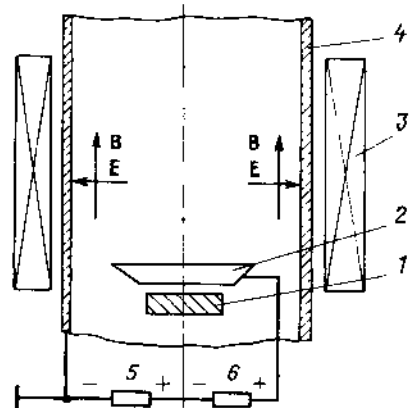


Рис. 4.25. Схема ИГН, основанного на эффекте плазменной сорбционной откачки:

1 — титановый катод; 2 — анод; 3 — соленоид; 4 — запыляемая поверхность; 5 — источник питания ионизатора; 6 — источник питания плазменного испарителя

ных газов. Плотность ионного тока на стенку определяется приближенным соотношением

$$j_i = g_0 I z e / m_{Ti} F_{c.п.}, \quad (4.12)$$

где I — средний разрядный ток испарителя; z — средняя кратность заряда образующихся ионов; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; m_{Ti} — масса атома титана; $F_{c.п.}$ — площадь поверхности напыления геттерных пленок.

Основными параметрами, определяющими протекание сорбционных процессов, являются плотность тока ионов и их энергия, не зависящие от давления откачиваемых газов. Плавное регулирование этих параметров изменением разрядного тока I и потенциала ионизатора E_i позволяет оптимизировать процесс откачки в зависимости от рода газа и его потока. Такое регулирование осуществляется с помощью универсального блока питания, работающего в стационарном или импульсном режиме.

Стационарный режим питания реализуется при работе насоса с повышенными газовыми нагрузками в интервале давлений $10^{-3} - 5$ Па. Плазменный источник в этом режиме подключен к выпрямителю; номинальный разрядный ток $I = 120$ А; напряжение холостого хода 65 В. Переход к импульсному режиму питания источника от сети переменного тока промышленной частоты осуществляется при давлении откачиваемого газа менее 10^{-3} Па. С этой целью используется генератор с тиристорным управлением. Длительность $t_{и}$ и частота следования импульсов $\nu_{и}$ испарения регулируются в пределах $0 < t_{и} \leq 10^{-2}$ с, $10^{-2} \leq \nu_{и} \leq 10^2$ с $^{-1}$ изменением фазового угла и частоты открытия тиристорov; управляющий сигнал снимается с релейных выходов блокировочного вакуумметра. Это позволяет плавно регулировать средний разрядный ток и скорость испарения геттера в соответствии с газовой нагрузкой. Номинальная быстрота действия насоса по азоту 4 м 3 /с. Быстрота действия по аргону 0,1 м 3 /с; она практически постоянна в интервале давлений $10^{-7} - 10^{-4}$ Па. Потребляемая насосом мощность — до 6 кВт · А.

Откачка инертных газов в описанном ИГН возможна лишь при включенном испарителе, что заметно сужает область его рационального использования. Значительно большей эксплуатационной гибкостью обладают комбинированные ИГН с плазменными испарителями, рассмотренные в § 5.4.

Эксплуатация испарительных насосов с плазменными источниками геттерных пленок сопряжена с некоторыми особенностями. Рассмотрим важнейшие из них. Включение дугового испарителя при малых газовых нагрузках сопровождается, как и в испарительных насосах других типов, скачкообразным увеличением ("броском") парциального давления водорода. Парциальные давления азота, паров воды и других активных газов падают, хотя и в значительно меньшей степени. Однако относительное значение таких скачков намного больше, чем в насосах с термическим испарением. Эта разница объясняется, во-первых, повышенным из-за большей скорости испарения катода потоком газов (прежде

всего водорода), выделяющихся из него, и, во-вторых, дополнительным газовыделением со стенок, стимулируемым ультрафиолетовым излучением дугового разряда. Фотостимулированный газовый поток в испарительных насосах других типов практически отсутствует. Фиксируется также некоторое уменьшение токов, соответствующих ионам аргона и метана, причем относительная высота пика, соответствующая дважды ионизированной молекуле аргона, в несколько раз возрастает.

При выключении испарителя наблюдается скачкообразное падение парциального давления водорода при одновременном броске давления метана; парциальные давления других газов монотонно возрастают. Пройдя через максимум, парциальные давления затем возвращаются к исходному уровню, существовавшему до включения испарителя. Такую кинетику парциального содержания инертных газов можно объяснить некоторым, весьма незначительным, ростом коэффициентов прилипания из-за возбуждения молекул в разряде; не исключен также распад молекул метана.

Броски давления при включении дуговых испарителей, достигающие в отдельных случаях 10^{-3} Па, можно существенно уменьшить при использовании для катодов титана с уменьшенным газосодержанием. Переход на иодидный титан, к примеру, ограничивает эти броски значением $(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$ Па. Для большинства вакуумных систем такие броски не имеют практического значения.

При эксплуатации в режиме непрерывного и частого периодического испарения на стенках, покрытых геттерной пленкой, рассеивается значительная тепловая мощность. Поэтому важную роль играет охлаждение стенок и своевременное удаление геттерной пленки, достигшей критической толщины. Если пленка начинает отслаиваться, то на образующихся чешуйках концентрируется разрядный ток, что приводит к их сильному разогреву и десорбции поглощенного газа.

При давлении ниже 1 Па остаточные газы не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на работу плазменных испарителей. Разность потенциалов на разрядном промежутке определяется катодным падением напряжения и не зависит от расстояния между анодом и катодом. Мощность, выделяемая на аноде, диффузно рассеивается на его поверхности.

При давлении 5–10 Па картина существенно меняется. Разность потенциалов на разрядном промежутке начинает увеличиваться, достигая 40 В. Энергия, выделяемая на аноде, концентрируется в малоподвижных анодных пятнах, имеющих среднюю плотность мощности около 1 кВт/см^2 . Такой тепловой нагрузки достаточно, чтобы за несколько секунд проплавить металлическую стенку толщиной 1–1,5 мм.

Высокая концентрация тепловой мощности на аноде-корпусе является основным фактором, лимитирующим давление запуска дуговых насосов значением 5–7 Па; продолжительность горения разряда при этом давлении не должна превышать 1–2 с. Если в качестве анода использо-

вать не корпус, а специальный охлаждаемый или распыляемый электрод, то эти ограничения снимаются. Применяя специальный анодный электрод из геттера, можно осуществлять запуск дуговых насосов при атмосферном давлении.

При первичном запуске, а также при включении насосов, длительное время находившихся при атмосферном давлении, необходима их вакуумная и электрическая тренировка. Наряду с традиционно решаемой задачей удаления адсорбированных пленок, водяных паров и других активных газов такой тренировкой достигается большая эксплуатационная устойчивость плазменных испарителей. Дело в том, что поверхности защитных оболочек катодов, находившиеся в контакте с атмосферным воздухом, покрыты слоем оксидных и углеводородных пленок, заметно снижающих критический ток. Как правило, критический ток оксидированных поверхностей меньше рабочего разрядного тока, поэтому КП могут беспрепятственно выходить на нерабочие участки катода, испаряя оксидные и углеводородные пленки. Разряд в таких условиях нестабилен; время его устойчивого существования не превышает 2–5 с. По мере удаления пленок устойчивость разряда возрастает. При разрядном токе 150 А продолжительность тренировки составляет 50–80 с. За указанное время поверхностные слои защитных оболочек под воздействием КП восстанавливаются до металлического состояния, что сопровождается ростом критического тока. Это предотвращает последующий выход КП на нерабочие участки катода и делает разряд стабильным.

Неплохие результаты при первичной тренировке насосов дает также тлеющий разряд в аргоне или воздухе при давлении около 10 Па. Продолжительность тренировки составляет примерно 2 ч.

В процессе эксплуатации из-за испарения геттера форма рабочей поверхности катода изменяется. Особо сильные геометрические изменения претерпевают катоды с торцевой рабочей поверхностью. В зависимости от места подключения токопровода на торце катода формируется симметричное или смещенное в сторону токопровода чашеобразное углубление. Поэтому часть испаряющихся атомов геттера вновь конденсируется на стенках образовавшегося углубления. В результате полезный поток атомов, формирующих геттерную пленку, заметно падает; меняется также его пространственное распределение. К примеру, для титанового катода диаметром 100 и высотой 40 мм на завершающем этапе его эксплуатации возможно трехкратное уменьшение скорости осаждения геттерной пленки. Одновременно растет средняя температура катода; при разрядном токе 200 А она повышается на 700–800 К.

Как видно из табл. 4.7, 4.8, для сверхвысоковакуумных испарительных насосов с водяным охлаждением начальная масса геттера, приходящаяся на единицу площади сорбирующей поверхности, близка к 2 кг/м^2 . Принимая коэффициент использования геттера в плазмен-

ных испарителях равным 0,8, легко подсчитать, что на протяжении всего цикла эксплуатации насоса до замены катода сорбирующая поверхность должна 10–20 раз очищаться от напыленного геттера. Для насосов промышленно-технологического назначения с рабочим давлением $10^{-4} - 10^{-3}$ Па очистка стенок должна производиться почти на порядок чаще. Для сверхвысоковакуумных насосов с охлаждением сорбирующих поверхностей жидким азотом, рабочее давление в которых $10^{-8} - 10^{-7}$ Па, достаточно всего лишь двух-трехкратная очистка за период эксплуатации испарителя.

Глава 5

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ НАСОСЫ

5.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗРЯДНЫХ НАСОСАХ

В основе работы МЭРН лежит несколько параллельных физических процессов: самостоятельный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях*, распыление электродов падающими ионами и нейтральными частицами, сорбция активных газов осаждающимися металлическими пленками, имплантация ионов газа; вторично-эмиссионные процессы, диффузионный перенос и растворение сорбированных газов в толще электродов, реэмиссия поглощенных газов в результате термодесорбции и распыления металлической матрицы, неупругие взаимодействия ионов газа и нейтральных молекул в разрядном промежутке. Перечисленные процессы в той или иной степени характерны и для ЭФН других типов. Специфика МЭРН определяется главным образом газовым разрядом в скрещенных полях.

Основные события разыгрываются в полости двухэлектродной системы, помещенной в магнитное поле с индукцией около 0,1 Тл; на электроды обычно подают разность потенциалов несколько киловольт. Для поддержания разряда структура электродной системы и топография электрического и магнитного полей должны удовлетворять ряду условий: анод должен быть параллелен магнитным силовым линиям, катоды, напротив, их пересекать, формируя потенциальные ловушки для электронов; межэлектродное пространство должно допускать азимутальный, осевой и радиальный дрейфы электрических зарядов.

Этим условиям удовлетворяют электродные системы разнообразных конфигураций (рис. 5.1, а–д). Исторически первой была ячейка Пеннин-

* Используются также термины *разряд Пеннинга*, *магнитно-изолированный газовый разряд* и *разряд с осциллирующими электронами*.

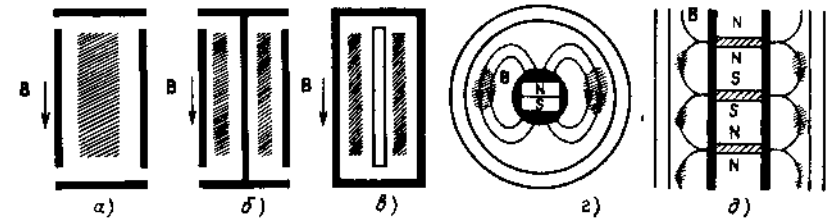


Рис. 5.1. Примеры двухэлектродных систем, в которых возможно существование разряда в скрещенных полях:

ячейка Пеннинга (а); магнетронная ячейка (б); инверсно-магнетронная ячейка (в); сферическая ячейка (г); мультипольная магнетронная ячейка (д). Катоды зачернены, аноды на в–д показаны двойной линией, на а–б аноды показаны боковыми вертикальными линиями, область, занятая плазмой, заштрихована

га (рис. 5.1, а) — полый цилиндрический анод и две торцевые катодные пластины. Плазменный столб в ячейке Пеннинга имеет цилиндрическую форму. В монополярных магнетронных ячейках (рис. 5.1, б, в) область, занимаемая плазмой, имеет форму полого цилиндра. В сферической (рис. 5.1, г) и мультипольной (рис. 5.1, д) магнетронных ячейках формируются тороидальные плазменные жгуты.

Механизм разряда в диапазоне давлений откачиваемого газа и параметров электрических и магнитных полей, характерных для МЭРН, качественно одинаков для электродных систем различных конфигураций. Поскольку промышленное применение пока получили лишь электродные системы на основе ячеек Пеннинга, рассмотрим этот механизм на примере именно таких ячеек (рис. 5.2).

Разряд Пеннинга возбуждается и устойчиво существует в очень широком диапазоне напряженностей электрического и магнитного полей и давлений газа. Первичная ионизация молекул газа и зажигание разряда осуществляют случайными электронами, оказавшимися в разрядном промежутке при подаче на электроды постоянного напряжения. Стартовый период, т.е. продолжительность развития разряда от момента первичной ионизации до установления квазистационарного режима, обратно пропорционален молекулярной концентрации газа. При давлении 10^{-1} Па

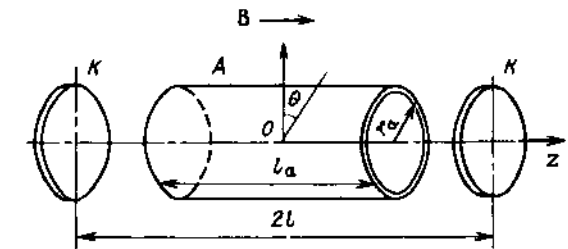


Рис. 5.2. Схема разрядной ячейки Пеннинга:

А — анод; К — катод

ных испарителях равным 0,8, легко подсчитать, что на протяжении всего цикла эксплуатации насоса до замены катода сорбирующая поверхность должна 10–20 раз очищаться от напыленного геттера. Для насосов промышленно-технологического назначения с рабочим давлением $10^{-4} - 10^{-3}$ Па очистка стенок должна производиться почти на порядок чаще. Для сверхвысоковакуумных насосов с охлаждением сорбирующих поверхностей жидким азотом, рабочее давление в которых $10^{-8} - 10^{-7}$ Па, достаточно всего лишь двух-трехкратная очистка за период эксплуатации испарителя.

Глава 5

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ НАСОСЫ

5.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗРЯДНЫХ НАСОСАХ

В основе работы МЭРН лежит несколько параллельных физических процессов: самостоятельный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях*, распыление электродов падающими ионами и нейтральными частицами, сорбция активных газов осаждающимися металлическими пленками, имплантация ионов газа; вторично-эмиссионные процессы, диффузионный перенос и растворение сорбированных газов в толще электродов, реэмиссия поглощенных газов в результате термодесорбции и распыления металлической матрицы, неупругие взаимодействия ионов газа и нейтральных молекул в разрядном промежутке. Перечисленные процессы в той или иной степени характерны и для ЭФН других типов. Специфика МЭРН определяется главным образом газовым разрядом в скрещенных полях.

Основные события разыгрываются в полости двухэлектродной системы, помещенной в магнитное поле с индукцией около 0,1 Тл; на электроды обычно подают разность потенциалов несколько киловольт. Для поддержания разряда структура электродной системы и топография электрического и магнитного полей должны удовлетворять ряду условий: анод должен быть параллелен магнитным силовым линиям, катоды, напротив, их пересекать, формируя потенциальные ловушки для электронов; межэлектродное пространство должно допускать азимутальный, осевой и радиальный дрейфы электрических зарядов.

Этим условиям удовлетворяют электродные системы разнообразных конфигураций (рис. 5.1, а–д). Исторически первой была ячейка Пеннин-

* Используются также термины *разряд Пеннинга*, *магнитно-изолированный газовый разряд* и *разряд с осциллирующими электронами*.

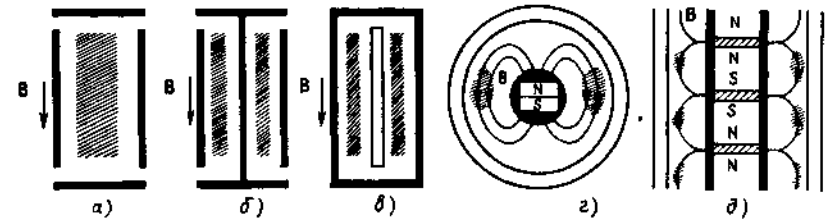


Рис. 5.1. Примеры двухэлектродных систем, в которых возможно существование разряда в скрещенных полях:

ячейка Пеннинга (а); магнетронная ячейка (б); инверсно-магнетронная ячейка (в); сферическая ячейка (г); мультипольная магнетронная ячейка (д). Катоды зачернены, аноды на в–д показаны двойной линией, на а–б аноды показаны боковыми вертикальными линиями, область, занятая плазмой, заштрихована

га (рис. 5.1, а) — полый цилиндрический анод и две торцевые катодные пластины. Плазменный столб в ячейке Пеннинга имеет цилиндрическую форму. В монополярных магнетронных ячейках (рис. 5.1, б, в) область, занимаемая плазмой, имеет форму полого цилиндра. В сферической (рис. 5.1, г) и мультипольной (рис. 5.1, д) магнетронных ячейках формируются тороидальные плазменные жгуты.

Механизм разряда в диапазоне давлений откачиваемого газа и параметров электрических и магнитных полей, характерных для МЭРН, качественно одинаков для электродных систем различных конфигураций. Поскольку промышленное применение пока получили лишь электродные системы на основе ячеек Пеннинга, рассмотрим этот механизм на примере именно таких ячеек (рис. 5.2).

Разряд Пеннинга возбуждается и устойчиво существует в очень широком диапазоне напряженностей электрического и магнитного полей и давлений газа. Первичная ионизация молекул газа и зажигание разряда осуществляют случайными электронами, оказавшимися в разрядном промежутке при подаче на электроды постоянного напряжения. Стартовый период, т.е. продолжительность развития разряда от момента первичной ионизации до установления квазистационарного режима, обратно пропорционален молекулярной концентрации газа. При давлении 10^{-1} Па

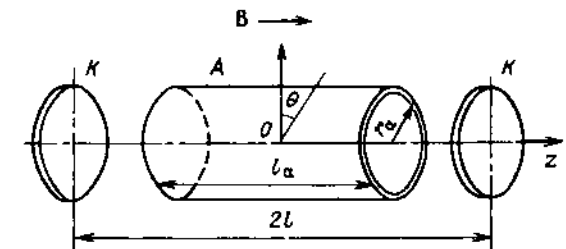


Рис. 5.2. Схема разрядной ячейки Пеннинга:

А — анод; К — катод

стартовый период пренебрежимо мал, тогда как при $p = 10^{-9}$ Па он превышает 500 с.

Газоразрядная плазма в ячейке Пеннинга удерживается радиальным электрическим и продольным магнитным полями, существующими в полости электродной системы. В торцевых областях электрическое поле имеет также продольную компоненту. Такая конфигурация полей определяется геометрией разрядного промежутка и влиянием пространственного заряда, имеющего в центральной области ячейки, как показано ниже, отрицательный знак. Под действием продольной компоненты электрического поля электроны продолжительное время колеблются между катодными пластинами вдоль оси z ; время их жизни в разряде τ_e обратно пропорционально молекулярной концентрации. Электроны участвуют также в движении по циклоидальным траекториям в плоскости $r\theta$ вокруг магнитных силовых линий и в радиальном дрейфе к аноду вследствие соударений с молекулами газа. При достаточном потенциале анода U_a эти соударения приводят к ионизации молекул.

Образующиеся положительные ионы газа уходят на катодные пластины. Из-за большой массы влияние магнитного поля на их траектории сравнительно невелико: под воздействием радиальной компоненты электрического поля оно вызывает лишь небольшие осцилляции ионов, образовавшихся вне оси разряда, относительно нее в плоскости rz . За время движения плоскость колебаний прецессирует в азимутальном направлении. Влияние магнитного поля заметно при условии $Br_a > 2 \cdot 10^{-3}$ Тл · м; $U_a = 5 \div 7$ кВ. Ионы, образовавшиеся на оси, имеют прямолинейные траектории.

Поскольку время жизни ионов в разряде τ_i при низких давлениях существенно меньше τ_e , пространственный заряд в полости ячейки имеет отрицательный знак. Его формирование предшествует зажиганию разряда.

Бомбардируя катодные пластины, ионы расплывают их; происходит также частичное внедрение падающих частиц в кристаллическую решетку. Одновременно из металла выбиваются вторичные электроны, что компенсирует уход электронов на анод. Таким образом, в разрядной цепи устойчиво поддерживается электрический ток, пропорциональный молекулярной концентрации газа. Энергия, расходуемая на ионизацию молекул газа, расплытие катодных пластин и нагрев электродной системы, черпается из источника электропитания. При увеличении давления примерно до 1 Па разряд переходит в тлеющий, а при достаточной мощности источника питания — и в дуговой*.

Перейдем теперь к более подробному рассмотрению электрофизических характеристик разряда в ячейке Пеннинга. Вполне законченный

* Опасность перехода разряда в дуговой устранена в электродных системах с перфорированными катодами.

вид к настоящему времени получила только теория стационарного разряда. Физическая интерпретация его динамических форм, представляющих наибольший практический интерес, носит пока преимущественно качественный характер. Поэтому в последующем кратком обзоре важнейших физических явлений и основных технических принципов, лежащих в основе работы МЭРН, соседствуют как строгие аналитические представления, так и эмпирические соотношения.

Определяющими для развития разряда являются области, прилегающие к оси ячейки и к плоскости симметрии анода (плоскость $O\theta$ на рис. 5.2). Электрический потенциал в этих областях $U(r)$ имеет параболическое распределение вида

$$U(r) = U_0 [1 - (r/l)^2] + (U_a - U_0)(r/r_a)^2, \quad (5.1)$$

где U_0 — потенциал в центре разрядного промежутка. Подвижность электрона поперек магнитного поля

$$\mu = v_{др}/E(r) = 3apm_e/2eB^2, \quad (5.2)$$

где $v_{др}$ — скорость радиального дрейфа электрона; $E(r)$ — напряженность электрического поля; a — константа, зависящая от рода газа и определяющая частоту столкновений электронов с молекулами при $p = 1$ Па; m_e — масса электрона. Потенциал зажигания разряда в заданном магнитном поле с индукцией B определяется из соотношения

$$\ln(A\omega) = M \ln(1/\gamma^*)/\tilde{w}_i + \ln(\omega/\beta)^2, \quad (5.3)$$

где $A = (m_e r_a^2 / 2e U_i)^{0.5}$; U_i — потенциал ионизации газа; $\omega = eB/2m_e$;

$$M = \frac{1 + (1 - \beta^2/2\omega^2)^{0.5}}{2(1 - \beta^2/\omega^2)^{0.5}} - 1; \quad \gamma^* — \text{эффективный коэффициент ион-}$$

но-электронной эмиссии, учитывающий вероятность ухода вторичного электрона в центральную область ячейки; $\beta^2 = 2e(U_a - U_0)/m_e r_a^2$;

$$\tilde{w}_i = \frac{C_1 \ln C_2 (U_a - U_0) U_i \ln[(U_a - U_0)/U_i]}{2U_i(U_a - U_0 - U_i)}$$

— усредненная по радиусу анодной ячейки вероятность ионизации молекул газа; C_1, C_2 — константы, зависящие от рода газа.

В слабых магнитных полях потенциал зажигания очень резко падает с усилением поля. Его минимальное значение для азота соответствует магнитной индукции около $2 \cdot 10^{-2}$ Тл. При дальнейшем увеличении магнитной индукции потенциал зажигания начинает медленно возрастать, оставаясь близким к 1 кВ. Он зависит также от материала катодных пластин, увеличиваясь на 30–40% в ряду алюминий — бериллий — цирконий — титан — тантал — молибден — висмут. При прочих равных условиях потенциал зажигания минимален в электродных системах, разме-

ры которых подчинены соотношениям

$$0,65 \leq I_a/2r_a \leq 1,1; \quad 0,4 \leq I_a/2l \leq 0,7. \quad (5.4)$$

Концентрация электронов в разрядном промежутке $n_e(r)$ определяется зависимостью

$$n_e(r) = n_a (r/r_a)^{-[2 - \tilde{w}_i(1 + \gamma^*)/M]}, \quad (5.5)$$

где n_a — концентрация электронов вблизи поверхности анода. Как видно из (5.5), при

$$\tilde{w}_i(1 + \gamma^*) = 2M \quad (5.6)$$

распределение отрицательного объемного заряда становится однородным. Эксперименты показывают, что такое распределение характерно для слабых магнитных полей при давлении 10^{-3} Па и ниже. В этом случае разрядный ток

$$I_p = M[2(U_a - U_0) - U_0(r_a/l)^2]apI_a. \quad (5.7)$$

Из этой зависимости вытекает важный вывод о постоянстве интенсивности разряда I_p/p во всем интервале давлений, где выполняется условие (5.6).

Интервал параметров, в котором это условие справедливо, называют *первым режимом разряда*. Разряд здесь существует в стационарной форме, электромагнитное излучение отсутствует. Доля электронной компоненты катодного тока не превышает нескольких процентов. Распределение

плотности ионного тока по радиусу катода имеет форму резко спадающей кривой с максимумом на оси (рис. 5.3). Оно отражает фокусирующее воздействие радиального электрического поля на положительные ионы. Плотность ионного тока пропорциональна давлению газа и растет с концентрацией электронов. Физико-математическая

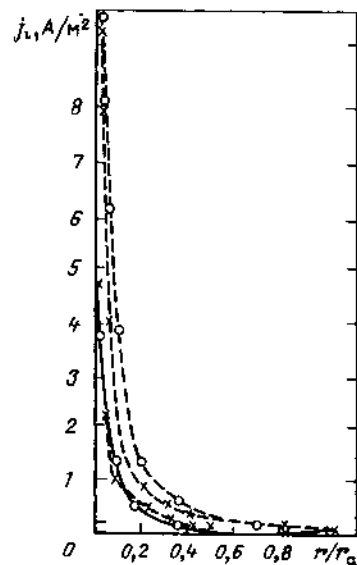


Рис. 5.3. Расчетная (крестики) и экспериментальная (кружки) кривые распределения плотности ионного тока по радиусу катода для различных параметров разряда:

$U_a = 3$ кВ, $B = 8 \cdot 10^{-2}$ Тл (сплошные линии); $U_a = 7$ кВ, $B = 0,13$ Тл (пунктир); $r_a = 6$ мм; $l = 14$ мм; $I_a = 16$ мм; $P = 8 \times 10^{-4}$ Па

модель разряда в этом режиме, построенная в одночастичном приближении, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При увеличении магнитной индукции или давления разряд переходит в динамические формы. Для них характерно неоднородное распределение объемного заряда по радиусу анода и генерирование плазменным столбом высокочастотных колебаний с широким спектром частот. Рассмотрим типичные для этих форм характеристики разряда.

В сверхвысоковакуумной области ($p < 10^{-5}$ Па) положительным объемным зарядом ионов можно пренебречь ввиду его малости. Увеличение магнитной индукции ведет к уменьшению радиуса кривизны циклоид, удлинению электронных траекторий и росту числа актов ионизации, так что концентрация электронов и разрядный ток возрастают. Однако при критическом значении индукции, зависящем от размеров ячейки и потенциала анода, циклоиды сжимаются настолько, что электроны в приосевой области разрядного промежутка не могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации молекул газа. В результате начинается лавинообразный процесс перераспределения плотности объемного заряда: концентрация электронов в приосевой области уменьшается, а вблизи анода растет, достигая $10^9 - 10^{10}$ см $^{-3}$. В конечном итоге прианодный отрицательный объемный заряд полностью экранирует электрическое поле анода. Потенциал на оси разряда падает до нуля, а периферийное электронное облако стягивается в тонкий прианодный вращающийся слой, в котором и протекают ионизационные явления.

В этом слое развиваются также неустойчивости, обязанные своим происхождением коллективным взаимодействиям частиц. Возникает, в частности, *диокотронная неустойчивость*, характеризующаяся неоднородным распределением электронной концентрации по азимуту и сопровождающаяся электромагнитным излучением на частотах порядка 10 МГц с гармониками вида

$$\nu = n(U_a - U_0) / (\pi B r_a)^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.8)$$

Рассеяние электронов на азимутальных неоднородностях объемного заряда приводит к аномальному увеличению поперечной подвижности электронов, появлению осциллирующей разрядного тока и незначительным изменениям его среднего значения. Критерий перехода к режиму с неоднородным распределением объемного заряда имеет вид

$$\tilde{w}_i(1 + \gamma^*) > 2M. \quad (5.9)$$

Интервал параметров, в котором выполняется это соотношение, называют *переходным режимом разряда*.

Существенно иным закономерностям подчиняется развитие разряда в области давлений свыше 10^{-4} Па. С увеличением магнитной индукции растут время жизни ионов и положительный объемный заряд. Это приводит к повышению потенциала U_0 , снижению радиального падения

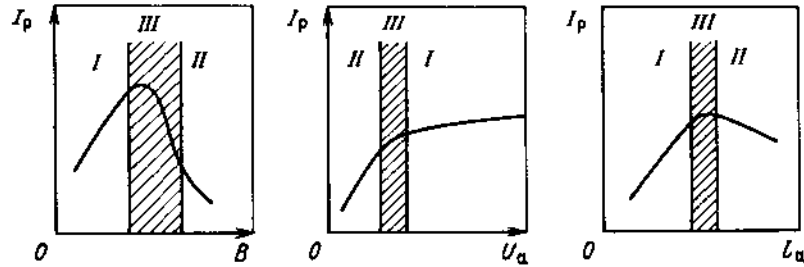


Рис. 5.4. Разрядный ток в зависимости от параметров ячейки Пеннинга в различных режимах разряда (III – переходный режим)

напряжения и уменьшению разрядного тока, характерным для перехода разряда во *второй режим* (рис. 5.4).

При анодном потенциале менее 3 кВ появляется дополнительное электромагнитное излучение на частотах

$$\nu_z = (1/2\pi)\sqrt{2U_0/m\ell^2}, \quad (5.10)$$

связанное с осцилляцией осевых электронов относительно плоскости симметрии анода. При магнитной индукции, соответствующей равенству частот ν и ν_z , наблюдается скачкообразный переход ко второму режиму разряда, сопровождающийся резонансным возрастанием амплитуды колебаний. В дополнение к прианодной области отрицательного объемного заряда формируется цилиндрический виртуальный катод радиусом r_{01} . В спектре электромагнитного излучения появляются дополнительные колебания на частоте $\nu'_z = 4 \div 7$ МГц и на комбинационных частотах $\nu' = \nu \pm \nu'_z$. Сформированная на внешней границе плазменного столба тонкая оболочка отрицательного объемного заряда вращается с частотой

$$\nu_1 = (U_a - U_0)/\pi Br_a(r_a - r_{01}). \quad (5.11)$$

Стационарная компонента разрядного тока во втором режиме рассчитывается по формуле

$$I_p = \frac{3}{4} \frac{m_e}{e} \frac{\beta_1^4 (r_a - r_{01})^2}{2\omega^2 - \beta_1^2} I_a a \nu, \quad (5.12)$$

где $\beta_1^2 = 2e(U_a - U_{01})/m_e(r_a - r_{01})^2$. Входящие сюда радиус r_{01} и потенциал U_{01} внешней границы виртуального катода определяются экспериментально.

При дальнейшем увеличении магнитной индукции плазменный столб расширяется, "поглощая" виртуальный катод; электромагнитные колебания на частотах ν'_z и ν' прекращаются. В еще более сильных полях

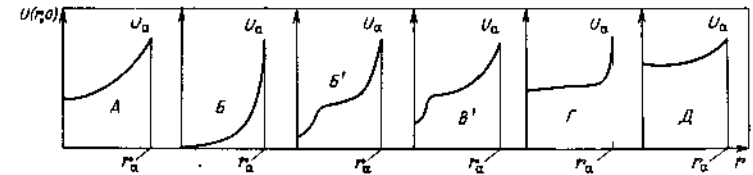


Рис. 5.5. Радиальное распределение электрического потенциала в плоскости симметрии анода в различных режимах разряда

исчезают оболочка отрицательного объемного заряда и излучение на частоте ν . Радиальное падение потенциала уменьшается, и квазинейтральная плазма заполняет всю полость анода.

Сходным образом на изменение режимов разряда влияет давление газа. В стационарном режиме, как отмечалось выше, плотность отрицательного объемного заряда и интенсивность разряда от давления не зависят. Это справедливо и для переходного режима при давлении порядка 10^{-3} Па, поскольку переменная составляющая разрядного тока еще мала по сравнению с его стационарной компонентой. Однако при уменьшении давления примерно до 10^{-6} Па эти компоненты сравниваются, уход электронов на анод уже не компенсируется захватом вторичных электронов. Плотность объемного заряда уменьшается, и интенсивность разряда падает. Увеличение давления до 10^{-1} Па также приводит к скачкообразному уменьшению интенсивности из-за перехода разряда во второй режим.

В отличие от стационарной формы разряда в динамических режимах плотности ионной и электронной компонент разрядного тока соизмеримы.

Наглядное представление об эволюции разряда в различных режимах дают кривые распределения потенциала в полости анода (рис. 5.5). Областям A и B соответствуют стационарный и переходный режимы; остальные области соответствуют различным формам второго режима разряда.

Принципиальное значение при конструировании МЭРН имеет выбор оптимальных электрических, магнитных и геометрических параметров электродной системы. Преобразуя соотношение (5.7), можно показать, что для областей A и B разрядный ток на единицу длины анода сохраняется постоянным для всех ячеек с геометрической структурой, отвечающей условию $Br_a = \text{const}$. Таким образом, произведение Br_a можно рассматривать как *параметр подобия*. Интервал геометрических соотношений, в котором параметр подобия действителен, ограничен значениями:

$$0,57 < l_a/r_a < 3; \quad 0,4 < 1 - 0,5l_a/l < 0,8. \quad (5.13)$$

Для анодов с меньшей относительной длиной подобие нарушается из-за влияния осевой компоненты скорости электронов, а для очень

длинных ячеек — из-за наличия осевого падения потенциала и влияния положительного пространственного заряда. В динамических режимах подобие нарушается вследствие аномального поперечного дрейфа электронов.

Простые расчетные зависимости для вычисления Vr_2 и других параметров электродных систем даны в § 5.3.

Рассмотрим еще одно характерное для МЭРН явление — распыление катодных пластин бомбардирующими их поверхность ионами (см. также § 6.3). Количественно это явление характеризуется коэффициентом распыления ρ , т.е. числом распыленных атомов на один падающий ион. Энергия иона воспринимается малой группой атомов кристаллической решетки и диссипирует затем в ряде актов межатомной передачи импульса. В ходе процесса отдельные атомы могут выйти за пределы поверхности. Первичное соударение интерпретируется как кулоновское взаимодействие падающего иона с ядрами мишени.

Коэффициент распыления зависит от атомного номера Z_i , массы M_i , энергии E_{i0} и угла падения ионов, атомного номера Z_M и атомной массы M_M материала мишени, ее температуры T_M . Взаимосвязь этих величин при нормальном к поверхности падении иона хорошо передается эмпирическим соотношением

$$\rho = \frac{20}{U_0} Z_i^2 Z_M^2 \frac{M_i}{M_M} \frac{E_{i0}}{(E_{i0} + 50Z_i Z_M)^2}, \quad (5.14)$$

где U_0 — энергия связи поверхностных атомов (энергия сублимации); величины U_0 и E_{i0} выражены в эВ. Максимальные значения ρ достигаются при энергии $E_{i0}' = 50Z_i Z_M$. Для легких ионов (водорода, дейтерия, трития, гелия), бомбардирующих титановую мишень, энергия E_{i0}' лежит в интервале 1,0–2,5 кэВ; максимальный коэффициент распыления находится в пределах $10^{-2} - 10^{-1}$ (см. рис. 6.25). Для ионов средних масс (азота, кислорода) максимальное значение ρ превышает 1 и соответствует интервалу энергий 10–15 кэВ; для ионов аргона максимальное значение ρ приближается к 10. В диапазоне температур $T_M \leq 0,7T_{пл}$ ($T_{пл}$ — температура плавления) ρ не зависит от T_M ; при большей температуре наблюдается примерно экспоненциальный температурный рост коэффициента распыления.

Угловое распределение распыленных частиц при нормальном падении ионов на поликристаллическую мишень описывается законом косинуса. При наклонном падении ионов максимум потока распыленных частиц ориентирован в направлении зеркального отражения ионов.

5.2. ОСОБЕННОСТИ ОТКАЧКИ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ

Электрофизические и газодиффузионные процессы существенно зависят от рода откачиваемого газа. Поэтому для них характерна селективность откачки индивидуальных газов и газовых смесей. Это свойство

находит свое отражение в заметном различии быстроты действия по разным газам (табл. 5.1), возникновении специфических колебаний давления и разрядного тока при откачке инертных газов, существовании "памяти" и ряде других эффектов.

Быстрота действия МЭРН в первом приближении пропорциональна интенсивности разряда. Коэффициент пропорциональности сложным образом зависит от геометрических характеристик электродной системы, потенциала системы, потенциала анода, магнитной индукции и давления. Область максимальных значений быстроты действия может быть смещена в требуемый интервал давлений подбором электрофизических параметров разряда и размеров ячейки. Для подробного рассмотрения особенностей откачки целесообразно выделить три группы газов — изотопы водорода, активные газы средних и больших масс, инертные газы. Такое разделение связано с принципиально разными механизмами поглощения газов, объединяемых каждой из групп. Внутри этих групп различия не столь существенны.

Водород и его изотопы. При откачке водорода и дейтерия распыление катодных пластин не играет существенной роли; подавляющая доля газа поглощается катодами. Процесс поглощения идет по двум каналам — имплантация ионов с последующей диффузией и сорбция нейтральных молекул катодными пластинами. Диффузионный перенос газа сопровождается образованием гидрида титана TiH_2 и твердого раствора, имеющего структурную формулу $TiH_{1,76}$. Поскольку скорость распыления пластин незначительна, их поверхностный слой при длительной откачке водорода насыщается атомами примесей. В результате на поверхности пластин формируется диффузионный барьер, блокирующий сорбцию нейтральных молекул.

Влияние ионной компоненты на скорость поглощения сравнительно невелико: на каждый прошедший во внешней цепи электрон сорбируется несколько атомов водорода. Поэтому в области давлений менее $5 \cdot 10^{-7}$ Па быстрота действия начинает падать. В интервале давлений $10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ Па быстроты действия по водороду и азоту соизмеримы. При более высоких давлениях длительная откачка водорода сопровождается увеличением быстроты действия в 2–2,5 раза по сравнению с начальным значением. Однако в области $p > 10^{-3}$ Па этот рост прекращается, затем быстрота действия начинает падать из-за термодесорбции ранее поглощенного водорода в результате разогрева катодных пластин.

При длительной откачке водорода в области высокого и сверхвысокого вакуума для повышения быстроты действия прибегают к периодическому или постоянному напуску в насос более тяжелых газов, например азота или аргона. Благодаря интенсивному распылению катодных пластин это, во-первых, приводит к разрушению диффузионного барьера на поверхности и, во-вторых, к формированию на аноде свеженанесенных титановых пленок, активно поглощающих водород. Так, аргон-

Таблица 5.1. Относительная быстрота действия МЭРН по различным газам

Тип насоса	H ₂	D ₂	T ₂	He	NH ₃	CH ₄	H ₂ O	Легкие углеводороды
I	1,8–2,7	1,3–1,45	1,5–1,7	0,04–0,10	1,7	2,1–2,5	1,00	0,90–1,6
II	2,0	–	–	0,28–0,40	–	1,6–1,8	1,00	0,90–1,70

Примечание. I – насосы со стандартной электродной системой диодного типа; II – насосы, предназначенные для откачки смесей с повышенным содержанием инертных газов.

ная обработка при давлении $(1 \div 4) \cdot 10^{-4}$ Па в течение 10–12 мин приводит к более чем пятикратному увеличению быстроты действия по водороду по сравнению с ее номинальным значением. Последующее возвращение к номинальному значению происходит в течение примерно 10 ч. Парциальное давление аргона после завершения процесса обработки остается на исходном уровне.

Увеличение температуры пластин и концентрации поглощенного газа приводит к резкому снижению быстроты действия из-за увеличения равновесного давления водорода над геттером (рис. 5.6). При комнатной температуре равновесное давление близко к 10^{-10} Па; оно практически не оказывает влияния на работу МЭРН. Однако при повышении температуры равновесное давление быстро увеличивается, достигая 10^{-2} Па при температуре около 500 К и более чем 100 Па при $T = 700$ К. Через $5 \cdot 10^4$ ч непрерывной откачки водорода при давлении $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па быстрота действия уменьшается на 60%; при $p = (5 \div 7) \cdot 10^{-3}$ Па такое же падение происходит всего за несколько сот часов*. Откачивающее действие насосов полностью прекращается при температуре катодных пластин около 530 К, что соответствует динамическому равновесию между потоком поглощаемого водорода и потоком термодесорбции.

Как видно из табл. 5.1, быстрота действия МЭРН по тритию несколько выше, чем по дейтерию. Наиболее вероятная причина этого – более сильное распыление катодных пластин и повышение общей площади сорбирующих тритий поверхностей: это и катодные пластины, и титановые пленки, напыленные на анод. Влияние дополнительной ионизации газа в насосе электронами β -распада трития пренебрежимо мало. Коэффициент распыления титана молекулярными ионами трития с энергией около 7 кэВ несколько превышает 10^{-2} .

Ресурс МЭРН при откачке водорода лимитируется насыщением приповерхностного слоя катода толщиной около 50 мкм с резко очерченной границей (рис. 5.7). Распределение поглощенного водорода принципиально отлично от даваемого законами Фика для равновесной диффузии.

* Быстрота действия по воздуху при этих условиях уменьшается на 35%.

(усредненные данные; $S_{N_2} = 1,00$)

Ne	N ₂	Сухой воздух	CO	O ₂	Ar	CO ₂	Cl ₂	Kr	Xe
0,04	1,00	1,02	0,85–1,00	0,55–0,60	0,01–0,06	0,85–1,00	0,75–0,85	0,01–0,02	0,01
–	1,00	1,05	0,9	0,6–0,65	0,20–0,30	0,90	–	0,20–0,25	0,15–0,18

II – насосы, предназначенные для откачки смесей с повышенным содержанием инертных газов.

Образующийся гидрид титана локализуется по границам зерен и структурным неоднородностям металла. Концентрация водорода в слое соответствует среднему атомному соотношению 1 : 1. Средняя концентрация водорода в объеме катода не превышает 1%.

Дополнительным фактором, лимитирующим продолжительность откачки водорода, являются искривление и растрескивание катодных пластин из компактного титана. Их деформация и разрушение связаны с тем, что образующийся при поглощении водорода гидрид титана имеет больший удельный объем, чем чистый компактный титан. Поэтому в местах локализации его фракций возникают сильные внутренние напряжения, приводящие к появлению трещин, расслоению катодов и, как следствие, к замыканию электродов. Такие последствия неизбежны после 200–250 ч откачки водорода при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Для увеличения ресурса МЭРН при откачке водорода необходимо произвести механическую развязку зон повышенной концентрации водорода. Это достигается применением кассетных катодных пластин с круг-

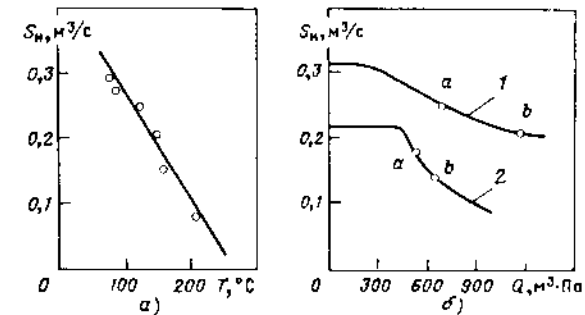


Рис. 5.6. Быстрота действия насоса НМДО-0,1 при откачке водорода в зависимости от температуры катодов (а) и количества поглощенного газа (б):

1 – при импульсном напуске в течение 4,3 с и паузе продолжительностью 2,5 с; 2 – при непрерывном напуске; а и б – см. ниже

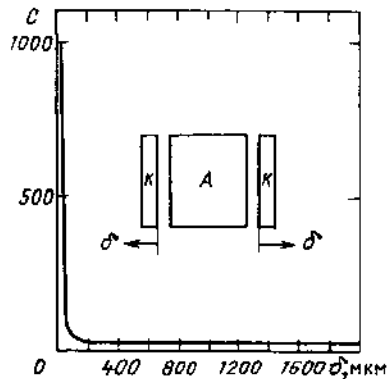


Рис. 5.7. Распределение относительной концентрации трития по сечению катодных пластин после его непрерывной откачки насосом НМД-0,025 в течение почти 10^4 ч при давлении $(0,5 \div 5) \cdot 10^{-3}$ Па. Кривая получена автордиографическим методом

лыми титановыми таблетками, свободно помещенными в гнезда катодных пластин или соединенными с катодами мембранными перегородками. Последние позволяют "свободно" увеличивать объем катодной таблет

летки, не вызывая деформации катодов. Ресурс насосов увеличивает также применение катодов или катодных таблеток из пористого титана с открытой пористостью порядка 60–65%.

При импульсной подаче водорода ресурс МЭРН, как видно из рис. 5.6, б, заметно увеличивается, причем тем существеннее, чем продолжительнее откачка (эффект роста сорбционной емкости катодов в импульсном режиме откачки). Введем для количественных оценок этого эффекта коэффициент κ , определяемый соотношением

$$\kappa = \frac{g_{\text{имп}} / \int I_{\text{р,имп}} dt}{g / I_{\text{рт}}}, \quad (5.15)$$

где g — количество поглощенного водорода; t — продолжительность работы насоса в режимах импульсного и непрерывного напуска, соответствующая некоторому фиксированному снижению быстроты действия. Так, для $S_{\text{H}} = 0,8S_{0\text{H}}$ (точки *a* на кривых рис. 5.6, б) $\kappa = 1,26$, тогда как для $S_{\text{H}} = 0,67S_{0\text{H}}$ (точки *b* на этих же кривых) $\kappa = 1,65$.

Возрастание сорбционной емкости катодов и адекватное увеличение ресурса МЭРН (на 30–50% в зависимости от скважности и температуры электродов) в импульсных режимах откачки объясняются диффузионным выравниванием концентрации поглощенного водорода в паузе между импульсами. Быстрота действия при импульсном напуске не зависит от формы импульса и определяется лишь температурой насоса.

Поскольку поглощение водорода титаном обратимо, термическое обезгаживание насыщенных катодных пластин восстанавливает начальные характеристики насосов.

Активные газы средних и больших масс. Эти газы откачиваются путем хемосорбции. Ее скорость намного выше, чем в испарительных ГН, поскольку в разряде Пеннинга генерируются диссоциированные и возбужденные атомы и молекулы газа. Их химическая активность и,

стало быть, коэффициенты прилипания существенно больше, чем у стабильных газовых молекул. При бомбардировке катодных пластин быстрыми ионами азота с вероятностью 0,3–0,5 они захватываются пластинами, образуя молекулы нитрида титана на поверхности и в толще геттера. Происходит также заметное распыление титана и ранее образовавшихся молекул нитрида титана; кроме того, наблюдается частичная диссоциация последних. Распыленные атомы осаждаются на аноде, противоположном катоде (около 25%) и на стенках насоса. Поглощение газа на катодных пластинах происходит в тех зонах, где осаждение геттерных пленок доминирует над распылением. Положение этих зон зависит от давления, материала катода и электрофизических характеристик разряда. Механизм сорбции во многом определяется ионной компонентой газоразрядной плазмы. На каждый электрон, проходящий во внешней цепи, поглощается один атом азота.

Сходный механизм откачки характерен для кислорода и воздуха. На один поглощенный атом кислорода приходится два электрона во внешней цепи. Несколько большая быстрота действия по воздуху в сравнении с быстротой действия по составляющим его газам определяется повышенной скоростью распыления катодных пластин ионами аргона.

Образующиеся при хемосорбции химически активных газов оксиды, нитриды и карбиды обладают высокой термостойкостью. Так, оксид титана термоустойчив до $T = 1800$ К, нитриды и карбиды титана — до 3300 и 3400 К соответственно. Поэтому поглощение этих газов носит необратимый характер.

Быстрота действия по хлору в стационарном режиме немного меньше ее значения для воздуха, хотя разрядный ток при этом в 2,5–3 раза ниже. Начальная быстрота действия почти в 5 раз больше, что объясняется сорбцией хлора стенками. При температуре до 400 К хлор связывается необратимо. Параметры МЭРН по водороду и воздуху после откачки хлора не меняются.

Наиболее вероятный механизм поглощения сложных молекул (воды, метана, тяжелых молекул) состоит в их диссоциации в разряде и последующем поглощении осколочных компонентов. Образующийся при откачке углеводородных молекул карбид титана имеет низкий коэффициент распыления, поэтому при откачке значительных потоков углеводородов быстрота действия насосов по всем газам падает. По этой причине МЭРН не могут длительно эксплуатироваться в системах, содержащих интенсивные источники масляных паров. Сверхвысоковакуумные системы, откачиваемые МЭРН, должны иметь систему безмасляной предварительной откачки.

Откачку активных газов средних и больших масс, как и откачку водорода, можно заметно интенсифицировать аргонной обработкой МЭРН. Такая обработка, проводимая в течение 30 мин при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па, приводит примерно к трехкратному увеличению быстроты дей-

ствия. Непосредственно после нее поверхность катодных пластин однородна и состоит в основном из титана. В процессе последующей откачки на поверхности, исключая центральную часть пластин, формируется слой углерода, что приводит к уменьшению скорости действия. При длительной откачке относительная площадь, занимаемая этим слоем, составляет около 95%.

Инертные газы. Откачка этих газов осуществляется путем имплантации ионов и быстрых нейтральных атомов в электроды и последующего их замуровывания пленками геттера. Быстрые атомы появляются в результате перезарядки, а также нейтрализации ионов, отражаемых катодом с малыми потерями энергии. Поглощение инертных газов идет на обоих электродах.

Катодные пластины бомбардируются непосредственно первичными ионами, образующимися в разряде. В дальнейшем из-за распыления пластин происходит реэмиссия части имплантированных ионов. Поэтому катодными пластинами необратимо поглощаются только атомы, упавшие на периферийную часть катода, где распыление отсутствует или компенсируется осаждением атомов геттера, летящих с противоположной катодной пластины. Доля этой части катода в типичных режимах эксплуатации не превышает 20% общей площади катода.

Основная часть ионов после отражения и нейтрализации при соударении с катодными пластинами падает на анод. На его поверхности они удерживаются только очень слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Поэтому они должны обладать достаточной начальной энергией, чтобы, внедрившись, оставаться в адсорбированном состоянии, пока над ними не образуется напыленный слой атомов достаточной толщины.

Коэффициент отражения падающего иона растет с увеличением отношения M_m/M_i . К примеру, при разряде в гелии около половины падающих на катод ионов отражается в виде атомов с энергией до 70% начальной. В аргоне доля отраженных атомов не превышает 10%, а их энергия меньше 10% энергии падающего иона. Поэтому скорость действия МЭРН выше по легким газам – гелию и неону; для лучшей откачки аргона и более тяжелых инертных газов необходимо использовать катоды из тяжелых металлов.

МЭРН обладают эффектом "памяти" относительно откачиваемых газов, в особенности инертных. С этим эффектом связаны периодические колебания давления в области $(0,1 \div 3) \cdot 10^{-2}$ Па, возникающие при длительной откачке инертных газов. Особенно ярко это явление выражено при откачке аргона (*аргонная нестабильность*); оно возникает зачастую и при длительной (несколько сот часов) откачке воздуха при давлении около 10^{-3} Па. В меньшей степени нестабильность наблюдается при откачке других инертных газов. Эти нестабильности значительно ухудшают эксплуатационные параметры вакуумных систем. Их причина состоит в перераспределении областей интенсивного распыления катодных пластин, происходящем при изменении режима разряда, на-

пример при уменьшении давления. В системах, эксплуатируемых в широком интервале давлений, нестабильности, как правило, не возникают.

Профилактическим средством против возникновения нестабильностей является периодическая аргонная обработка внутренней поверхности и электродной системы МЭРН, а также откачиваемых ими металлических высоковакуумных систем. Эту обработку проводят, возбуждая разряд в среде чистого аргона при давлении $10^{-2} - 10^{-1}$ Па в режиме его непрерывной прокачки с помощью вспомогательного насоса. Интенсивное ионное распыление всех поверхностей, имеющих отрицательный потенциал, приводит к их быстрой очистке и резко уменьшает вероятность возникновения аргонной нестабильности; кроме того, заметно увеличивается скорость действия и сокращается время достижения предельного остаточного давления. Полезен также периодический прогрев электродной системы.

Таким образом, условия устойчивой откачки инертных газов состоят в следующем:

малораспыляемая область катодных пластин, доступная для ионов инертных газов, должна иметь возможно большую площадь;

необходимо, чтобы ионы инертных газов отражались от катодных пластин с сохранением большей части начальной энергии;

скорость запыления областей электродной системы, в которых происходит поглощение инертных газов, должна быть по возможности большей.

Способы технической реализации этих условий рассмотрены в следующем параграфе.

Важная эксплуатационная характеристика МЭРН – стартовый период, т.е. время с момента включения насоса до устойчивого поддержания давления порядка 10^{-3} Па. В вакуумных системах, не сообщающихся с атмосферным воздухом, запуск МЭРН возможен с давлений до 10 Па. В системах, содержащих значительное количество адсорбированных паров и газов, и тем более в загрязненных системах давление запуска должно быть снижено до $10^{-2} - 1$ Па. На стартовый период влияют степень и способ получения предварительного разрежения, внутренний объем откачиваемой камеры, парциальный состав газовой нагрузки, вакуумно-технологическая предыстория системы и самого насоса, электрические характеристики источника питания, полярность изолированного электрода.

В установках, собранных из металлических деталей, стартовый период насосов диодного типа с изолированным анодом сопровождается заполнением полости откачиваемой системы газоразрядной плазмой. Это способствует эффективной ионной очистке системы и достижению более низкого остаточного давления; однако продолжительность запуска возрастает. Кроме того, появляется опасность электрического или электротермического повреждения приборов и оборудования, расположенных в камере. При понижении давления до $(5 \div 8) \cdot 10^{-1}$ Па разряд

локализуется в электродном блоке насоса. Установка во входном патрубке заземленной металлической сетки предотвращает "выход" разряда, и стартовый период сокращается. Сетка способствует также защите аппаратуры, расположенной в камере, от радиочастотных помех, возникающих иногда из-за каналирования генерируемых МЭРН электромагнитных колебаний.

Короткий стартовый период характерен также для насосов с изолированным отрицательным электродом; они стабильно работают в самых тяжелых условиях, включая периодический контакт с атмосферным воздухом. Выход разряда за пределы электродной системы в таких насосах не наблюдается.

Для оценки эксплуатационного состояния вакуумных систем, откачиваемых МЭРН, полезно эмпирическое правило: стартовый период обезгаженных чистых систем, объем которых численно равен половине нормированной быстроты действия насоса, не должен превышать 10 мин. Большая продолжительность и неустойчивость стартового периода свидетельствуют о загрязненности электродной системы насоса или откачиваемой системы в целом.

Самой распространенной причиной затрудненного запуска является насыщение электродной системы парами воды, неизбежное при напуске атмосферного воздуха. Экспозиция в воздухе особо нежелательна для насосов, проработавших длительное время. Напыленные на их электроды толстые геттерные пленки имеют рыхлую губчатую структуру и при контакте с воздухом поглощают значительное количество водяных паров. Поэтому в системах, работающих в режиме частого напуска атмосферного воздуха, целесообразно предусматривать клапаны, исключющие попадание воздуха в насос. Последний должен оставаться "под вакуумом" в рабочем состоянии. При отсутствии клапана систему перед напуском атмосферного воздуха необходимо заполнять сухим газом, обычно азотом.

В стартовый период МЭРН работает в наиболее напряженном тепловом режиме. Для этого периода характерна специфическая неустойчивость, связанная с сильным влиянием нагрева электродной системы разрядным током на быстроту действия. Ее кинетика определяется цепочкой процессов нагрев электродов → тепловая и стимулированная десорбция с их поверхности → рост давления → увеличение разрядного тока → повышение температуры электродов → электрическая и тепловая деструкция поверхностных загрязнений → . . . Эта неустойчивость особенно заметна при эксплуатации загрязненных систем. Перегрев и сопутствующее термическое газовыделение в этом режиме могут быть уменьшены периодическим выключением насоса, работой при пониженной мощности и при меньшем давлении запуска, параллельной работой в течение некоторого времени самого насоса и средств предварительной откачки. Средства предварительной откачки целесообразно выключать лишь при появлении отчетливой тенденции к снижению давления. Раз-

работанные математические модели, связывающие температуру электродной системы, газовую нагрузку и давление, позволяют прогнозировать устойчивость работы МЭРН при откачке крупных высоко- и сверхвысоковакуумных систем.

При эксплуатации МЭРН необходимо учитывать вылет из электродной системы паров геттерного вещества. При длительном рабочем цикле спектр масс остаточных газов обогащается аргоном.

Для уверенного получения сверхвысокого вакуума МЭРН рекомендуется выполнять двухступенчатыми. С этой целью электродная система снабжается отдельными электрическими вводами. Такой же эффект достигается разделением насосов на "черновые" и сверхвысоковакуумные. Первые включаются в интервале давлений $10^{-3} - 10^{-5}$ Па и поглощают основное количество газа; последние — при более низких давлениях и работают с очень медленным насыщением. Благодаря этому в течение длительного времени сохраняются неизменными их быстрота действия и предельное остаточное давление.

5.3. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

Современные МЭРН имеют стандартизованную конструкцию. Электродные блоки размещены в узких полостях ("карманах") сварного корабчатого корпуса прямоугольного или квадратного сечения. С внешней стороны установлены магнитные блоки и магнитопроводы для снижения полей рассеяния. Для создания наибольшей индукции межполюсные расстояния должны быть минимизированы. Однако это противоречит требованию иметь не слишком узкий зазор между катодными пластинами и анодом. Ширина этого зазора определяет газокинетическую проводимость каналов откачки и электрическую прочность электродного блока.

Поскольку быстрота действия примерно пропорциональна числу ячеек, их в крупных насосах насчитываются сотни и тысячи. Поэтому важным вопросом становится их оптимальная компоновка. Слишком широкие электродные блоки нерациональны, поскольку требуется увеличенный зазор. Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа магнитов, размеров и массы насоса. В то же время применение очень длинных электродных блоков столь же неэффективно из-за ограниченной проводимости корпуса. Сам корпус должен иметь достаточную прочность и механическую жесткость, чтобы выдерживать атмосферное давление, в том числе при высокотемпературной тренировке; толщина стенок при этом должна быть минимальной.

Одним словом, при конструировании насоса следует найти разумный технический компромисс и решить типичную многофакторную оптимизационную задачу по определению его электрофизических, геометрических и вакуумных параметров.

В качестве физических критериев оптимизации удобно использовать интенсивность разряда или производные вакуумные характеристики — быстроту действия и производительность. Поскольку строгой и полной теории МЭРН пока нет, имеющиеся расчетные методики носят эмпирический характер.

В отечественной практике конструирования МЭРН промышленного назначения используются следующие приближенные расчетные соотношения:

параметр подобия

$$(Bd_a)_{\text{опт}} \approx 3,06 \cdot 10^{-5} U_a^{0,5}; \quad (5.16)$$

быстрота действия одной ячейки по азоту

$$S_0 \approx 1,73 \cdot 10^7 l_a d_a^2 B p^{0,2} \left(1 - \frac{1,5 \cdot 10^4 p}{1,33 + 4 \cdot 10^4 p} \right), \quad (5.17a)$$

или

$$S_0 \approx 3,13 \cdot 10^{-4} l_a U_a^{0,5} \left(H d_a - \frac{2,3 \cdot 10^5}{H d_a} \right) \left[1 - \exp(-250 d_a) \right], \quad (5.17)$$

или

$$S_0 \approx 1,5 \cdot 10^7 B^2 d_a^2 l_a;$$

расчетная быстрота действия электродного блока, состоящего из n ячеек,

$$S_{\text{обл}} = n S_0; \quad (5.18)$$

быстрота действия электродного блока, приведенная ко входному сечению "кармана" для его размещения,

$$S_{\text{бл}} \approx S_{\text{обл}} (\text{tg } \Psi) / \Psi;$$

$$\Psi = 2,55 \cdot 10^{-3} \frac{k a^{0,5}}{l - l_a} \left(\frac{S_{\text{обл}}}{L} \right)^{0,5}; \quad (5.19)$$

быстрота действия насоса, состоящего из N одинаковых электродных блоков,

$$S_{\text{н}} \approx N \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{S_{\text{бл}}} \right)^{-1}; \quad G = \frac{1}{N} \sum G_i. \quad (5.20)$$

В этих формулах H — напряженность магнитного поля; a, L — соответственно ширина и длина электродного блока; G_i — газокинетическая проводимость канала между входными сечениями i -го "кармана" и насоса; k — коэффициент, равный 1, если электродный блок доступен для откачиваемого газа с одной стороны, и 0,5, если блок открыт с обеих

сторон. Быстрота действия и проводимость выражены в $\text{дм}^3/\text{с}$; анодный потенциал — в В; индукция — в Тл; напряженность магнитного поля — в А/м; давление — в Па; линейные размеры — в м. Формулы справедливы для цилиндрических анодных ячеек диаметром d_a в следующем интервале физических характеристик и геометрических соотношений: $B = 0,1 \div 0,2$ Тл; $H = (0,8 \div 1,5) \cdot 10^5$ А/м; $U_a = 3 \div 7$ кВ; $p = 10^{-7} \div 10^{-4}$ Па; $d_a = 1 \div 5$ см; $l_a = 0,5 \div 3$ см; $L = 1 \div 40$ см; $l = 1 \div 5$ см; $l_a/l = 0,2 \div 0,9$; $a = 1 \div 20$ см.

При конструировании специальных насосов, работающих в более широком диапазоне физических параметров, используются соотношения для встроенных разрядных блоков ускорителей и накопителей с интегрированным вакуумным трактом. Эти соотношения в ранее принятых обозначениях и единицах имеют следующий вид:

$$\text{магнитная индукция, соответствующая порогу зажигания разряда,} \\ B_i = 3 \cdot 10^{-4} / r_a; \quad (5.21)$$

магнитная индукция, соответствующая переходу разряда ко второму режиму,

$$B_{\text{пер}} = 9,7 \cdot 10^{-6} U_a^{0,5} / r_a p^{0,05}; \quad (5.22)$$

быстрота действия одной ячейки по азоту: первый режим, $B_i \leq B \leq 2B_i$,

$$S_0 = 2,4 \cdot 10^9 \left(1 - \frac{1,13 \cdot 10^4 p}{1 + 3 \cdot 10^4 p} \right) p^{0,2} l_a^2 r_a^2 B_i (B - B_i); \quad (5.23)$$

первый режим, $2B_i \leq B \leq B_{\text{пер}}$,

$$S_0 = 5,9 \cdot 10^8 \left(1 - \frac{1,13 \cdot 10^4 p}{1 + 3 \cdot 10^4 p} \right) p^{0,2} l_a^2 r_a^2 B^2; \quad (5.24)$$

второй режим, $B \geq B_{\text{пер}}$,

$$S_0 = 5,6 \cdot 10^{-2} \left(1 - \frac{1,13 \cdot 10^4 p}{1 + 3 \cdot 10^4 p} \right) p^{0,1} l_a U_a \times \\ \times \left\{ 1 - 1,3 \cdot 10^6 [(B - B_{\text{пер}}) r_a p]^{0,5} / U_a \right\}; \quad (5.25)$$

эффективный радиус анодной ячейки, ориентированный под углом φ к направлению магнитных силовых линий,

$$r_{a\varphi} \approx r_a \cos \varphi - 0,5 l_a \sin \varphi; \quad (5.26)$$

минимальное рабочее давление насоса

$$p_{\text{мин}} = 4,15 \cdot 10^5 U^{-1} [10^8 B r_a^2 - 9/B]^{-3}. \quad (5.27)$$

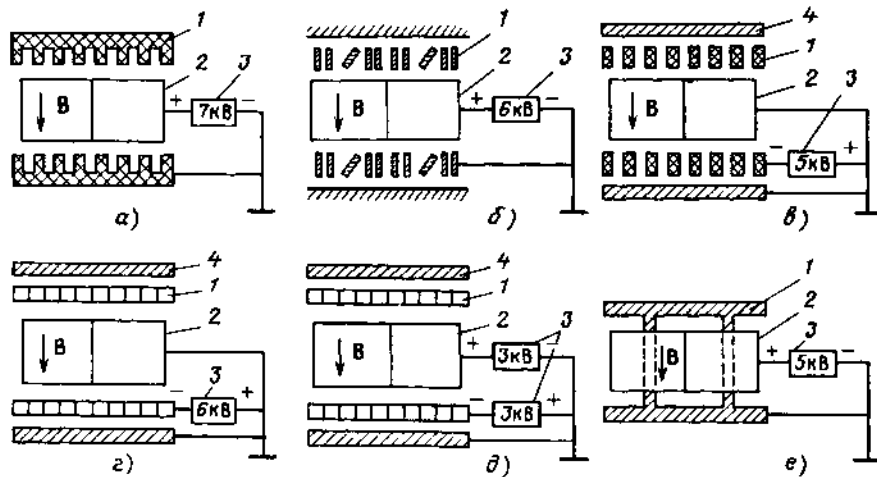


Рис. 5.8. Конструктивные схемы электродных блоков для откачки инертных газов.

1 – катод; 2 – анод; 3 – источник питания; 4 – коллектор

Для повышения эффективности откачки инертных газов используется несколько конструктивных решений, позволяющих реализовать указанные в § 5.1 физические принципы. Одно из них – применение катодов с гребенчатым профилем. В катодных пластинах выфрезерывают относительно узкие и глубокие канавки (рис. 5.8, а). Несколько иная конструктивная схема, позволяющая решить ту же задачу, – применение решетчатого катода (рис. 5.8, б). Большая часть ионов бомбардирует поверхность таких катодов под очень малым углом скольжения, что увеличивает коэффициент распыления. Кроме того, значительно увеличивается площадь поверхности, на которую напыляются атомы геттера и которая в то же время почти не подвержена ионной бомбардировке (решетчатые стенки вне основной зоны распыления). Относительная быстрота откачки аргона такими насосами достигает 10%.

Другой способ – использование электродных блоков триодного типа. Такие блоки представляют собой заземленный сетчатый анод и электрически изолированный катод в виде решетки (рис. 5.8, в) или сетки из титана с ячейками, меньшими анодных (рис. 5.8, г). В отдельных случаях под некоторым потенциалом находятся и анод, и катод (рис. 5.8, д), что позволяет использовать для питания обеих электрических цепей одинаковые выпрямители с относительно низким напряжением. Третьим электродом служат заземленные стенки или специальные коллекторные пластины (отечественный насос НМТО-0,16).

В триодном насосе, как и в насосе с гребенчатым катодом, значительная часть ионов падает на поверхность под малым углом скольжения,

вызывая интенсивное распыление геттерного вещества. Часть ионов, замедляясь, проходит сквозь катодные сетки, изменяет свою траекторию и с меньшей энергией бомбардирует катод со стороны коллекторных пластин. Остальные ионы достигают стенок насоса с очень небольшой или даже нулевой скоростью и эффективно замуровываются напыляемыми с катода атомами геттера. Относительная быстрота откачки аргона некоторыми модификациями триодного насоса достигает до 30%.

Эффективное поглощение инертных газов характерно и для магнетронного насоса с центральным катодным стержнем (рис. 5.8, е). Поскольку потенциал осевой области в этой конструкции фиксирован, изменение давления никак не влияет на режим разряда и распределение плотности ионного тока. Сильному распылению здесь подвержен только катодный стержень; торцевые пластины лишь незначительно эродируют вблизи стержня. Остальная поверхность торцевых пластин покрыта слоем напыленного титана, в котором замуровано более 80% инертного газа, поглощенного ячейкой. Магнетронный насос не обнаруживает аргоновой нестабильности; относительная быстрота откачки чистого аргона составляет 12–20%.

Четвертый способ – применение катодных пластин из материалов с существенно различными коэффициентами распыления*. Один из катодов выполняется, например, из титана, а другой – из тантала, имеющего больший коэффициент распыления. Осаждаясь на катоде из титана, атомы тантала замуровывают внедрившиеся в катодную пластину ионы и препятствуют их реэмиссии. Сходные результаты достигаются при выполнении одного из электродов из металла с высокой упругостью пара, например из магния. Разогрев этого электрода увеличивает концентрацию ионов в разрядном промежутке; соответственно увеличиваются скорость распыления геттерного материала, быстрота действия и производительность насоса.

Сравнительная оценка эксплуатационных характеристик насосов диодного и триодного типов позволяет сделать следующие выводы. Триодные насосы предпочтительнее при повышенных давлениях ($5 \cdot 10^{-4}$ Па и выше). При меньших давлениях более стабильны вакуумные параметры диодных насосов; они имеют, в частности, больший ресурс в непрерывном режиме откачки. Триодные насосы целесообразно использовать в установках с частым напуском газа, а диодные – в сверхвакуумных системах; запуск диодных насосов при повышенных давлениях желательно сопровождать термическим напылением дополнительных геттерных пленок. Триодные насосы характеризуются крайне слабым прозвучением эффекта "памяти" по аргону даже после его длительной откачки и меньшей продолжительностью стартового периода.

* Такие конструкции называют насосами с дифференциальными катодами либо просто дифференциальными насосами.

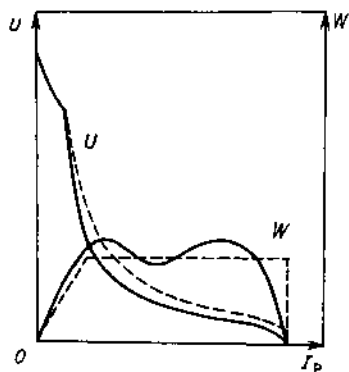


Рис. 5.9. Выходное напряжение U и электрическая мощность W , снимаемые с блока питания, как функции разрядного тока МЭРН:

пунктир – теоретически требуемые зависимости; сплошные кривые – характеристики типового блока питания

Перейдем к отдельным элементам МЭРН. Электродные блоки более подробно рассмотрены в следующих параграфах. Для создания магнитного поля используются обычно постоянные магниты, чаще всего керамические на основе феррита бария (отечественные марки 2БА; 2,8БА; 3БА; РА). Предельная напряженность поля, создаваемого такими магнитами, близка к $1,5 \cdot 10^5$ А/м; максимальная рабочая температура 420–520 К. Для создания полей с большей напряженностью (до $2 \cdot 10^5$ А/м) пригодны литые магниты из сплавов железа и кобальта (марки ЮНДК25А, ЮНДК35Т5); их максимальная рабочая температура 750 К. Еще большие напряженности (до $2,4 \cdot 10^5$ А/м) могут быть получены с помощью самарий-кобальтовых сплавов, однако максимальная температура их прогрева не превышает 450 К.

Для электропитания МЭРН обычно применяют выпрямители с напряжением холостого хода от 3 до 7 кВ. Для предотвращения дугового разряда при запуске используют ограничители тока короткого замыкания. К разрядному блоку должна подводиться оптимальная электрическая мощность, отвечающая мгновенному значению откачиваемого газового потока. При большей мощности начинается избыточный разогрев электродов, приводящий к росту термодесорбционных потоков; при недостаточной мощности падает производительность насоса. Поэтому разрядная система и блок питания в интервале давлений 10 – 10^{-4} Па должны иметь строго согласованные электрические характеристики (рис. 5.9). Этому требованию вполне удовлетворяет трансформаторный выпрямитель, ток короткого замыкания которого подбирается числом витков в обмотке W_I и магнитным шунтом (рис. 5.10).

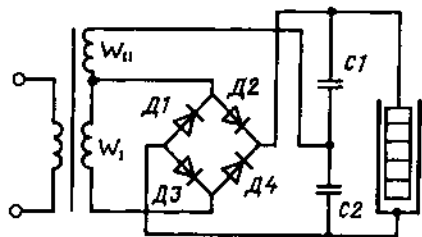


Рис. 5.10. Электрическая схема питания разрядных насосов

В стартовом режиме при давлении 1–0,1 Па напряжение на электродном блоке изменяется в пределах 200–600 В; электрически насос представляет собой нагрузку с сопротивлением 10^2 Ом. В этом режиме диоды $D1, \dots, D4$ открыты и с выпрямителя снимается ток, близкий к току короткого замыкания. Быстрота действия насоса мала из-за низкой энергии ионов; максимальный разрядный ток ограничивается нагревом электродов и конструкцией токовода. В диапазоне 10^{-1} – 10^{-3} Па напряжение возрастает и быстрота действия резко увеличивается; насос представляет собой нагрузку с сопротивлением от тысяч до сотен тысяч ом. Подводимую к электродному блоку мощность и в этом режиме необходимо ограничивать во избежание его перегрева.

При давлениях ниже 10^{-3} Па разрядный ток мал; напряжение превышает 2 кВ. Диоды $D1$ и $D2$ в этом режиме заперты. Наклон вольт-амперной характеристики регулируется подбором емкости конденсаторов $C1$ и $C2$ и числа витков обмотки W_{II} . Насос представляет собой нагрузку с сопротивлением от сотен килоом до сотен мегаом. При дальнейшем уменьшении давления выходное напряжение становится равным удвоенному амплитудному значению потенциала на вторичной обмотке трансформатора. При давлениях ниже 10^{-4} Па форма вольт-амперной характеристики блока питания не оказывает никакого влияния на работу насоса.

Для ограничения разрядного тока в стартовом и переходном режимах в источники питания вводится токовая защита; при токе нагрузки, превышающем заданный, выпрямитель автоматически отключается от сети. Это создает иногда серьезные эксплуатационные неудобства, поскольку защита срабатывает и при кратковременных бросках разрядного тока. Такие броски связаны обычно с электрическим пробоем при старте или со случайным кратковременным замыканием электродных блоков. Они бывают довольно часто, особенно в системах с частым напуском атмосферного воздуха, и не представляют опасности ни для насосов, ни для источников питания. Чтобы исключить эти трудности, в цепь токовой защиты источника питания целесообразно вводить устройство временной задержки с постоянной 100–200 с.

При эксплуатации в "дежурном" режиме питание МЭРН осуществляется обычно от высоковольтных химических источников тока.

Рассмотрим способы улучшения эксплуатационных характеристик МЭРН. Один из них – увеличение концентрации носителей заряда в газоразрядной плазме путем дополнительной инжекции атомов геттера или электронов. Особый интерес представляют комбинированные ИГН. В их основе лежит одновременное использование в пространстве откачки двух различных механизмов взаимодействия геттера с газом. Благодаря этому удается как минимум взаимно компенсировать недостатки каждого из механизмов или снять свойственные им ограничения. В современных промышленных насосах комбинированного типа используется система магнито-разрядный насос – резистивный испари-

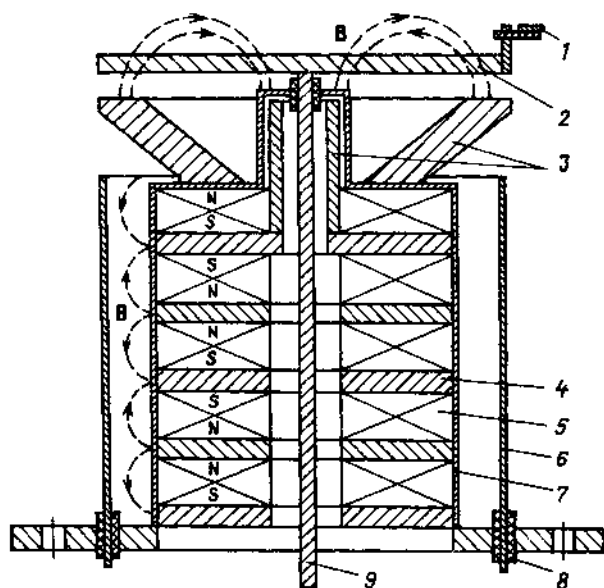


Рис. 5.11. Конструктивная схема разрядно-испарительного блока:

1 – устройство иницирования дугового разряда; 2 – электродуговой катод; 3 – магнитопровод; 4 – ферромагнитные вставки; 5 – постоянные магниты; 6, 7 – анод, катод разрядного промежутка; 8 – токоввод разрядного промежутка; 9 – силовой токоввод

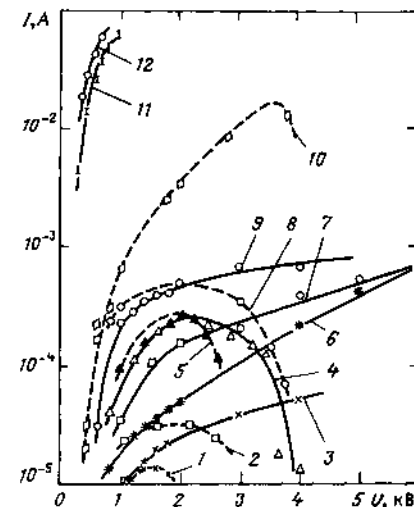
тель (см. § 5.4). Достижимый эффект состоит в увеличении быстроты действия по водороду и другим активным газам; параметры откачки инертных газов практически не меняются.

Значительно лучшие результаты могут быть получены при введении в пространство откачки плазменного испарителя, управляемого магнитным полем разрядных ячеек. Возрастание быстроты действия по активным газам дополняется здесь интенсификацией откачки инертных газов из-за роста концентрации ионной компоненты газоразрядной плазмы. Магнитное поле используется одновременно для нескольких целей – формирования структуры со скрещенными электрическим и магнитным полями, уменьшения тока дугового разряда и локализации траекторий КП. В развитие этой идеи разработано несколько моделей комбинированных насосов. Одна из них представлена на рис. 5.11.

Насос представляет собой автономный разрядно-испарительный блок с осесимметричными разрядными ячейками магнетронного типа. Магнитное поле формируется кольцевыми магнитами со встречным включением полюсов. Арочная конфигурация поля в зоне локализации КП создается магнитопроводом.

Рис. 5.12. Вольт-амперные характеристики разрядно-испарительного блока по рис. 5.11.

1, 2, 5, 8, 10 – включен только разрядный насос; 3, 4, 6, 7, 9 – включены разрядный насос и биметаллический испаритель титана; 11, 12 – включены разрядный насос и электродуговой испаритель при скорости испарения титана 3 и 6 мкг/с соответственно



Экспериментальные вольт-амперные характеристики магнетронных ячеек при различных значениях давления и тока дуги представлены на рис. 5.12. Для сравнения приведены такие же характеристики, но при инжекции в разрядный промежуток нейтральных атомов титана, испаряемых с поверхности не показанного на схеме резистивного биметаллического испарителя. Кривые сняты для магнетронной системы со следующими параметрами: диаметр и высота анода и ширина зазора анод – катод соответственно 120, 100 и 20 мм; магнитная индукция: в области катода $6 \cdot 10^{-2}$ Тл, в области анода $2 \cdot 10^{-2}$ Тл; катод выполнен из титана ВТ-1-0. Магнитная индукция на рабочей поверхности катода плазменного испарителя $5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Каждой кривой соответствуют фиксированные значения остаточного давления (в пределах от $2 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Па) и скорости испарения геттера ($4 \cdot 10^{-3}$ – 30 мкг/с).

Как видно, ток в магнетронной системе при включении дугового разряда возрастает более чем на 3 порядка. Примерно пропорционально току возрастает и быстрота действия по инертным газам. Инжекция в разрядный промежуток нейтральных атомов титана с поверхности биметаллического испарителя дает существенно меньший эффект. Эти результаты показывают перспективность комбинированных ИГН с плазменными источниками геттерных пленок.

Дополнительная инжекция электронов позволяет заметно улучшить эксплуатационные характеристики при сверхнизких давлениях 10^{-8} – 10^{-10} Па, для которых из-за недостатка свободных электронов типично затягивание зажигания разряда. Для подавления этого недостатка стандартная электродная система дополняется радиоактивным β -источником (разрядная ячейка с триггерным устройством).

Триггерное устройство представляет собой простейший умножитель электронов. На внешней стороне одной из катодных пластин нанесен слой β -активного нуклида. Испускаемые им электроны ускоряются

электрическим полем от дополнительного источника напряжения и бомбардируют эмиттер вторичных электронов, находящийся под положительным относительно катода потенциалом. Вторичные электроны, влетая через отверстие в катод в зону разряда, повышают эффективность ионизации и резко ускоряют зажигание; это способствует также сохранению постоянной быстроты действия в области сверхнизких давлений. Триггерное устройство размещается обычно в центральной ячейке электродного блока, имеющей увеличенный диаметр. Центральная ячейка соединена с остальными щелевыми отверстиями, что способствует быстрому распространению разряда. На основе электродных блоков с триггерным устройством разработаны промышленные насосы с быстротой действия $0,02-0,32 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для обеспечения быстрого зажигания разряда в сверхвысоком вакууме предложена еще одна конструктивная модификация электродной системы. Используются перфорированные катоды, в отверстиях которых устанавливаются изолированные электроды в виде острия или диска. При подаче на них высоковольтного импульса генерируется короткий электронный ступок, вызывающий испарение материала электродов и сопутствующее газовыделение. В результате формируется пространственный заряд, необходимый для зажигания.

Значительный эффект достигается в мультипакторном МЭРН. Для инжекции дополнительных электронов между перфорированным титановым катодом и дополнительным электродом из алюминия или меди, образующими объемный резонатор, с помощью СВЧ-генератора возбуждается вторично-эмиссионный (*мультипакторный*) разряд. Резонатор экспериментального образца питался от магнетрона с частотой $2,45 \text{ ГГц}$. При давлениях, меньших 10^{-4} Па , возбуждение мультипакторного разряда приводит к примерно 30-кратному росту быстроты действия насоса.

Среди других конструктивных усовершенствований, направленных на увеличение удельной быстроты действия и ресурса МЭРН, можно назвать следующие.

Применяют перфорированные катодные пластины со звездообразной формой отверстий, расположенных соосно анодным ячейкам. Такое исполнение электродного блока повышает быстроту действия по инертным газам, уменьшает опасность аргонной нестабильности и увеличивает эксплуатационную надежность МЭРН.

Используют составной анод. Каждую ячейку выполняют из несоприкасающихся полуцилиндров, зазор между которыми составляет одну десятую диаметра. Благодаря этому увеличивается газокинетическая проводимость электродного блока и ускоряется зажигание разряда при низких давлениях.

На внутренних поверхностях анодов размещают сетки из материала катода. Это позволяет повысить быстроту действия в диапазоне давлений $10^{-2} - 10^{-1} \text{ Па}$ и улучшить условия откачки водорода. С этой же

целью применяют катоды из титан-молибденового сплава и дифференциальные катоды из алюминия и циркония. При этом на стенках и электродах формируется пленка бинарного сплава цирконий – алюминий, обладающего повышенной сорбционной активностью. Описаны конструкции диодных насосов с магнитной системой на основе бариевых и редкоземельных гексаферритов 2БА, 2БА-1 и 3БА, размещенной непосредственно в вакуумной полости. Это позволяет более чем вдвое снизить массу насосов.

Разработан МЭРН в виде двух коаксиальных кольцевых магнитов, в зазоре между которыми размещена электродная система типа Пеннинга, а в центральной полости внутреннего магнита – система инверсно-магнетронного типа. Хорошие результаты дает применение для катодных пластин металлопористых материалов. Пластины изготавливаются из смеси, содержащей 30% мелкодисперсного электрографита, равномерно распределенного в геттерном веществе. Спекание заготовок производится при $T = 1100 \div 1300 \text{ К}$. Использование катодов из палладия расширяет интервал рабочих давлений и увеличивает ресурс при откачке водорода. Аналогичный результат достигается применением анодных ячеек прямоугольного сечения с примерным соотношением сторон $1 : 2$. В таких ячейках электронное облако принимает вытянутую вдоль большей оси форму. Это приводит к перераспределению областей эффективной ионизации молекул газа, уменьшению плотности ионного тока и снижает локальный разогрев катодов.

5.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РАЗРЯДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ НАСОСЫ

Разрядные насосы – одно из наиболее широко распространенных средств высоковакуумной откачки. Промышленными сериями выпускаются насосы с быстротой действия $5 \cdot 10^{-5} - 10 \text{ м}^3/\text{с}$; изготавливаются также единичные образцы большей производительности. Насосы различных фирм оптимизированы по конструктивным решениям электродной системы, магнитным и электрическим характеристикам, так что эти решения и характеристики можно рассматривать как типичные для современных МЭРН.

Выпускаемые в настоящее время отечественные разрядные насосы включают несколько промышленных серий. Важнейшая конструктивная особенность насосов самой ранней из них – серии НМДО* (насосы магниторазрядные диодные охлаждаемые) – применение перфорированных катодов и водяное охлаждение анода. Это дает примерно двукратное увеличение быстроты действия по инертным газам, уменьшает локальный разогрев электродов, сопутствующее ему повышенное тепловое газовыделение и позволяет заметно увеличить мощность, рассеиваемую

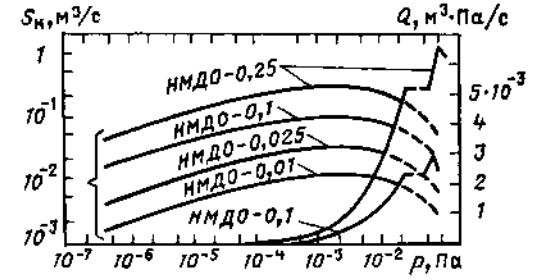
* Используется также аббревиатура НОРД (насосы охлаждаемые разрядные диодные).

Таблица 5.2. Характеристики охлаждаемых МЭРН отечественного производства

Характеристика	Модель насоса					
	НМДО-0,01	НМДО-0,025	НМДО-0,1	НМДО-0,25	НМДО-1,0	НМДО-0,16
Быстродействие по воздуху, м ³ /с	0,01	0,025	0,1	0,3	1,0	0,12 (0,2) *
Максимальная производительность, м ³ · Па/с	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	—
Диаметр входного отверстия, мм	32	100	100	160	250	160
Габариты, мм:						
в плане	100 x 120	200 x 200	175 x 390	254 x 424	543 x 564	280 x 355
высота	220	319	396	550	700	780
Масса, кг	7	13,5	46	120	300	60
Расход воды, м ³ /ч, не более	0,05	0,1	0,15	0,2	0,6	0,1
Блок питания	БП-10	БП-25			БП-63	БП-150
Ток короткого замыкания, А	0,1	0,3			0,7 · 4	0,7
Габариты, мм:						
в плане	370 x 430	430 x 530	428 x 530		548 x 645	428 x 530
высота	261	261	361		1805	361
Масса, кг	30	45	80		400	80

* При охлаждении электронной системы жидким азотом.

Рис. 5.13. Быстродействие и производительность насосов серии НМДО в зависимости от давления при откачке воздуха



ую на электродах, максимальное рабочее давление (до 10^{-1} Па) и быстродействие при давлении выше 10^{-3} Па. Давление запуска насосов этой серии $6-10$ Па, предельное остаточное давление $5 \cdot 10^{-7}$ Па (табл. 5.2, рис. 5.13 и 5.14). Преимущественная область применения — откачка технологического оборудования в диапазоне давлений $10^{-5} - 10^{-1}$ Па.

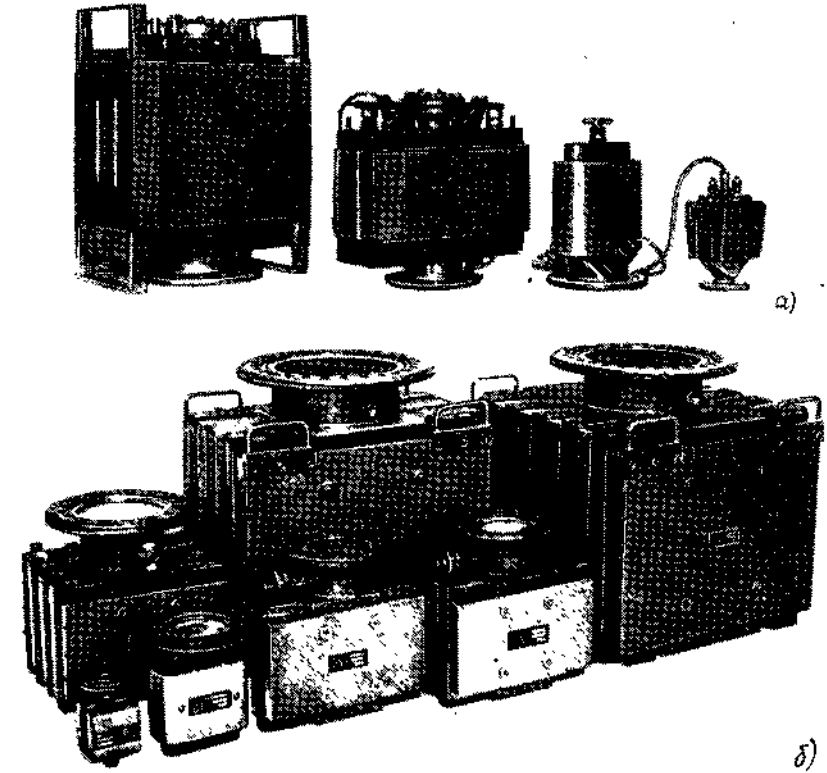


Рис. 5.14. Магнитные электроразрядные насосы серий НМДО (а) и НМД (б)

Таблица 5.3. Характеристики магнитных

Характеристика	Модель насоса				
	НМД-0,0063	НМД-0,025	НМД-0,063	НМД-0,1	
Быстрота действия, м ³ /с:					
по азоту	6 · 10 ⁻³	0,02	0,06	0,11	
по водороду	0,01	0,04	0,12	0,22	
по гелию	6 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻³	6 · 10 ⁻³	0,01	
по аргону	3 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ⁻³	3 · 10 ⁻³	5,5 · 10 ⁻³	
Диаметр входного отверстия, мм	25	100	100	100	
Разрядный ток при давлении 5 · 10 ⁻⁵ Па, мА	0,04	0,13	0,32	0,55	
Габариты, мм:					
в плане	80 × 85	157 × 84	320 × 106	320 × 180	
высота	160	220	320	320	
Масса, кг	2,9	8,4	21	32	
Блок питания	Модель	БП-0,0063	БП-0,025	БП-0,063	БП-0,1
	Ток короткого замыкания, А	0,1	0,2	0,6	0,65
	Габариты, мм:				
	в плане	480 × 300	480 × 300	480 × 320	480 × 320
	высота	220	220	300	300
Масса, кг	21	20	37	35	

* Блок имеет регулируемый ток короткого замыкания.

При откачке газовых смесей, близких по составу к воздуху, насосы могут продолжительное время (примерно 800 ч) работать при давлении до 10⁻¹ Па; диапазон (2,5 ÷ 7) · 10⁻² Па характеризуется неустойчивостью, связанной с изменением режима разряда. Откачка водорода при давлении 5 · 10⁻³ Па возможна примерно в течение 200 ч, затем производительность насоса резко падает. Она может быть восстановлена до номинального значения прогревом электродной системы. При откачке гелия быстрота действия монотонно падает со временем. Устойчивая работа в среде гелия при давлении 7 · 10⁻³ Па возможна в течение 500–600 ч, после чего возникает гелиевая неустойчивость.

Составляющие серию насосы, кроме модели НМДО-0,01, имеют разборную конструкцию. Их электродные блоки унифицированы: насос НМДО-0,025 содержит один такой блок, насос НМДО-0,1 – четыре, а насос НМДО-0,25 – шесть блоков, разделенных на две группы с независимым токовводом.

Анод представляет собой медную перфорированную пластину толщиной 16 мм; диаметр перфораций (анодных ячеек) 12 мм. Для лучшего теплосъема переемычки между анодными ячейками сделаны достаточно массивными, хотя это и снижает быстроту действия на единицу объема. Анод электрически соединен с заземляемым корпусом; по пери-

электроразрядных насосов серии НМД

	Модель насоса					
	НМД-0,16	НМД-0,25	НМДИ-0,25	НМД-0,4	НМД-0,63	НМД-1
	0,16	0,25	0,23	0,4	0,65	1,0
	0,32	0,5	0,7	0,8	1,3	2,4
	0,02	0,03	0,1	0,04	0,07	0,12
	8 · 10 ⁻³	0,01	0,07	0,02	0,03	0,06
	100	160	160	160	250	250
	0,6	1,25	1,2	2,5	3,5	5,5
	200 × 396	320 × 327	320 × 327	463 × 396	500 × 350	500 × 554
	320	340	340	320	580	580
	42	53	53	95	190	290
	БП-138*	БП-0,25	БП-73*	БП-138*	БП-0,63	БП-0,63 (два)
	0,75	0,75	0,75	0,75	1,0	1,0 · 2
	428 × 530	480 × 320	480 × 320	428 × 530	480 × 320	480 × 320
	361	300	300	361	300	600
	50	47	47	50	47	2 × 47

метру к нему припаяна тонкостенная трубка из нержавеющей стали, по которой циркулирует вода. Титановые катоды установлены на высоковольтных изоляторах. По оси насосов НМДО-0,1 и НМДО-0,25 на отдельном фланце установлен внутренний нагреватель для термического обезгаживания корпуса и электродной системы.

По конструктивному исполнению анода к серии НМДО близок насос триодного типа НМТО-0,16 (см. табл. 5.2). Запыляемые титаном поверхности анода и коллектора в зависимости от рабочего давления могут охлаждаться водой или жидким азотом. Охлаждение электродов увеличивает быстроту действия во всем диапазоне рабочих температур. Наибольший эффект, однако, достигается в сверхвысоковакуумной области. Предельное остаточное давление насоса – около 5 · 10⁻⁹ Па.

Серию НМД (насосы магниторазрядные диодные) составляют десять насосов диодного типа с быстротой действия 6 · 10⁻³ – 1,0 м³/с (табл. 5.3, рис. 5.14 и 5.15). Насосы не имеют принудительного охлаждения. Тем не менее благодаря конструктивно-геометрической оптимизации электродов и согласованию электрических характеристик блока питания и разрядной системы по своим пусковым характеристикам они близки к водоохлаждаемым насосам. Максимальное давление запуска насосов 1 Па, предельное остаточное давление 1 · 10⁻⁸ Па.

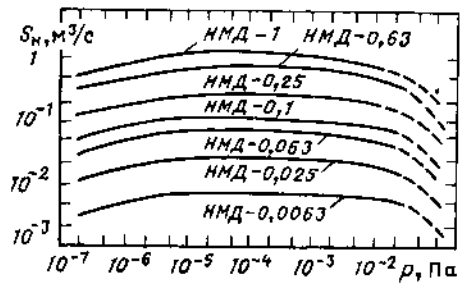


Рис. 5.15. Быстрота действия насосов серии НМД в зависимости от давления при откачке воздуха

Все составляющие серию насосы, кроме модели НМД-0,0063, имеют разборную конструкцию. Электродные блоки унифицированы для

групп насосов малой, средней и повышенной производительности: в пределах каждой из групп переход к последующей модели осуществляется увеличением числа электродных блоков. Так, число одинаковых электродных блоков составляет два (насос НМД-0,063), четыре (НМД-0,1), восемь (НМД-0,25); аналогичным образом в насосе НМД-0,63 используется шесть и в насосе НМД-1 — десять одинаковых электродных блоков больших размеров. Магнитная система набирается из пластинчатых оксидно-бариевых магнитов марки 2,8БА; размеры пластин 80 × 60 × 16 мм (насосы малой производительности) и 120 × 80 × 16 мм (насосы средней и повышенной производительности).

Электродные блоки включают электрически изолированный ячеистый анод высотой 20 мм с диаметром ячеек 16 мм, выполненный из тонколистовой нержавеющей стали, и катодные пластины из сплава ВТ-1-0 толщиной 2 мм, соприкасающиеся с корпусом. Зазор между анодом и катодными пластинами в зависимости от размеров электродного блока составляет от 3 до 7 мм; максимальная магнитная индукция 0,16 Тл (табл. 5.4). Входное отверстие перекрыто заземленной металлической сеткой. Металлокерамические вводы высокого напряжения собраны на отдельном фланце, что позволяет осуществлять их очистку и замену без снятия насоса. Насос с диаметром входного отверстия 160 мм выполнен в двух модификациях — со стандартными электродными блоками (модель НМД-0,25) и с электродными блоками, имеющими дифференциальные катоды (модель НМД-0,25). Модель НМД-0,25 характеризуется вчетверо большей быстротой действия по аргону и другим инертным газам.

Насосы имеют почти постоянную быстроту действия в интервале давлений $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$ Па и длительно сохраняют стабильные эксплуатационные характеристики. Их ресурс при давлении $1 \cdot 10^{-4}$ Па превышает $4 \cdot 10^4$ ч. Предельные температуры прогрева составляют 520 К (в сборе) и 720 К (со снятыми магнитами).

Характер пространственного распределения магнитных полей рассеяния для описанных насосов одинаков. Непосредственно у поверхности корпуса индукция достигает около 10^{-2} Тл и на расстояниях 30–50 см уменьшается до 10^{-4} Тл. В плоскости присоединительного фланца индукция поля рассеяния, как видно из табл. 5.4, для насосов

Таблица 5.4. Индукции магнитных полей рассеяния отечественных разрядных насосов

Модель насоса	$B_0, 10^{-4}$ Тл	$B, 10^{-4}$ Тл	$r_0, \text{см}$	$r_1, \text{см}$	$r_2, \text{см}$	$r_3, \text{см}$	$r_4, \text{см}$
НМД-0,000063	1270	2,7	5,6	10,8	13,0	10,6	9,7
НМД-0,0063	1250	3,6	6,0	22,1	12,4	10,8	18,0
НМД-0,025	1200	8,7	5,7	10,0	8,0	16,0	15,0
НМД-0,1	1400	2,5	8,7	19,4	17,6	20,0	10,0
НМД-0,25	1400	0,8	—	27,0	19,0	18,0	21,0
НМД-1	1600	3,1	16,5	36,0	35,0	—	28,0
НЭМ-30	800	1,8	2,2	25,5	21,0	16,8	17,0
НЭМ-100	750	12,0	23,0	31,8	26,8	32,4	26,2
НЭМ-300	—	—	—	17,7	7,5	9,5	—
НМДО-0,01	980	27,0	9,5	25,5	13,6	18,5	21,8
НМДО-0,025	950	16,2	11,5	16,5	11,0	18,5	15,0
НМДО-0,1	870	2,0	3,5	24,0	23,4	12,5	13,2
НМДО-0,25	900	39,4	35,8	43,5	38,6	44,5	41,8
НМТО-0,16	800	6,4	6,5	28,0	27,4	12,0	19,6

Примечание. Здесь B_0, B — индукция магнитного поля в центре электродной системы и в плоскости присоединительного фланца на оси насоса; r_0 — расстояние от плоскости присоединительного фланца (по оси насоса), на котором индукция магнитного поля не превышает 10^{-4} Тл; $r_1, 2, 3, 4$ — расстояние от соответствующих (1 — передней, 2 — боковой, 3 — верхней, 4 — нижней) граней насоса, на которых индукция магнитного поля не превышает 10^{-4} Тл.

различных моделей колеблется в довольно широких пределах. Наименьшим значением индукции в этой плоскости ($0,8 \cdot 10^{-4}$ Тл) характеризуется насос НМД-0,25. Снятие с корпуса боковых крышек приводит к заметному росту полей рассеяния, в особенности со стороны боковых граней, где индукция увеличивается примерно на порядок.

Для питания насосов серий НМДО и НМД используются унифицированные блоки с оптимизированными вольт-амперными характеристиками, допускающие включение в автоматизированные системы управления. Для электропитания насоса НМД-1 используются два одинаковых блока от насоса НМД-0,63. Напряжение холостого хода блоков всех моделей составляет 7 кВ.

Для откачки мощных генераторных ламп в процессе их эксплуатации, хранения и на промежуточных технологических этапах широко применяются миниатюрные разрядные насосы с быстротой действия $10^{-5} - 10^{-3}$ м³/с (табл. 5.5). Такие насосы содержат всего одну или несколько разрядных ячеек, что позволяет совмещать магнитопровод с корпусом и использовать осесимметричные магнитные поля. Благодаря этому улучшаются технические характеристики и повышается технологичность по сравнению с насосами традиционного исполнения.

Типичный миниатюрный МЭРН состоит из коварового цилиндрического корпуса, в основание которого вварены чашки из тонкой нержа-

Таблица 5.7. Характеристики разрядных

Характеристика	Насос с дифференциальными катодами			
	DI-1	DI-5	DI-11	DI-20
Быстрота действия, м ³ /с:				
по азоту	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,017
по аргону	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Диаметр входного отверстия, мм	19	—	37	37
Блок питания:				
напряжение холостого хода, кВ	4,5	4,75	4,75	4,75
ток короткого замыкания, А	10^{-3}	0,15	0,15	0,15
Габариты, мм:				
насоса	130 x 89 x x 100	157 x 83 x x 160	162 x 130 x x 160	251 x 132 x x 199
блока питания	—		483 x 248 x 178	
Масса, кг:				
насоса	2,7	3,6	6	12
блока питания	13,5	14,5	14,5	14,5

дается отрицательный потенциал 5 кВ. Электродному блоку придана повышенная механическая жесткость, что позволяет заметно снизить уровень вибрационных помех, создаваемых насосом из-за переменной составляющей напряжения электропитания на частоте 100 Гц. Магнитная система расположена с внешней стороны корпуса; индукция в центре электродной системы 0,125 Тл.

Блок питания имеет два высоковольтных вывода, что делает возможной независимую эксплуатацию двух групп насосов, работающих при различных давлениях. Ток короткого замыкания блока 0,2 А; его масса 13,6 кг. Возможна индикация давления по разрядному току, который на границах рабочего интервала давлений составляет 0,2 мкА ($p = 6 \cdot 10^{-8}$ Па) и 80 мА ($p = 2 \cdot 10^{-2}$ Па).

Универсальную серию МЭРН диодного типа с быстротой действия от $1 \cdot 10^{-3}$ до $2,4$ м³/с разработала фирма RIBER (табл. 5.6). Их рабочий диапазон давлений 10^{-10} — 10^{-1} Па. С помощью резистивных нагревателей насосы в сборе с ферритовыми магнитами могут прогреваться до 620 К. Благодаря симметричной конфигурации индукция магнитного поля рассеяния во входном сечении не превышает 10^{-4} Тл.

Электродные блоки выпускаются в трех конструктивных вариантах. В обычных условиях эксплуатации (откачка воздуха и других смесей с незначительным содержанием инертных газов) применяют стандартные блоки с пластинчатыми катодами из титана, тантала, циркония или

насосов фирмы PERKIN-ELMER

Насос с дифференциальными катодами				
DI-25	DI-60	DI-120	KI-220	DI-400
0,02	0,05	0,098	0,18	0,34
$5 \cdot 10^{-3}$	0,012	0,024	0,044	0,08
49	149	149	149	149
4,75	5,5	5,5	5,5	5,5
0,15	0,72	0,72	0,72	0,72
261 x 132 x x 199	384 x 226 x x 305	419 x 320 x x 304	419 x 419 x x 305	419 x 419 x x 524
12	58	95	110	195
14,5	59	59	59	59

сплава цирконий — титан; анод представляет собой набор тонкостенных цилиндрических ячеек из нержавеющей стали. Для откачки смесей с повышенным содержанием инертных газов используют блоки с дифференциальными катодами: одна из титановых катодных пластин напротив приосевой зоны анодных ячеек, т.е. в области наиболее интенсивного распыления, покрыта слоем геттера с большей атомной массой. Благодаря этому поглощение ионов аргона происходит преимущественно в периферийной зоне противоположного катода, где интенсивность распыления и, следовательно, вероятность реэмиссии атомов аргона значительно ниже. Относительная быстрота действия насосов с такими электродными блоками приближается к 0,3 (по аргону) и 0,4 (по гелию). Электродные блоки насосов для длительной откачки водорода имеют механическую конструкцию повышенной жесткости, обеспечивающую более интенсивный теплоем. Это позволяет, не опасаясь перегрева катодов, вести продолжительную откачку водорода при давлениях до 10^{-2} Па.

Интенсивность разряда в насосах фирмы RIBER со стандартными электродными блоками при откачке азота в интервале давлений 10^{-7} — 10^{-1} Па определяется аппроксимирующей функцией вида $I/p = 90S_{0H}$, где I — в А, p — в Па, S_{0H} — в м³/с. Для электропитания используются унифицированные блоки. Стартовый разрядный ток ограничивается трансформатором с магнитным шунтом. Блоки имеют двух-

Таблица 5.7 (продолжение)

Характеристика	Насос стандартного исполнения			
	CP-80	CP-150	CP-270	CP-500
Быстрота действия, м ³ /с:				
по азоту	0,08	0,14	0,26	0,5
по аргону	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Диаметр входного отверстия, мм	149	149	149	149
Блок питания:				
напряжение холостого хода, кВ	7	7	7	7
ток короткого замыкания, А	0,6	0,6	0,6	0,6
Габариты, мм:				
насоса	384 x 226 x x 305	419 x 320 x x 304	419 x 419 x x 305	419 x 419 x x 524
блока питания	—	—	—	—
Масса, кг:				
насоса	58	95	110	195
блока питания	59	59	59	59

уровневую защиту от токовой перегрузки, измеритель разрядного тока с логарифмической шкалой, отградуированной в единицах давления, и двухканальный выход для сопряжения с автоматизированной системой контроля и управления.

Таблица 5.8. Основные характеристики разрядных

Характеристика	Диодные насосы	
	IZ-2	IZ-8
Быстрота действия, м ³ /с:		
по азоту	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
по аргону	$(5 \div 6) \cdot 10^{-4}$	$(2 \div 2,5) \cdot 10^{-4}$
Давление, Па:		
предельное остаточное		$< 10^{-9}$
максимальное запуска		10^{-1}
Диаметр входного отверстия, мм	16	35
Разрядный ток при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Па, мА	—	—
Габариты насоса, мм	137 x 106 x x 92	200 x 127 x x 185
Масса насоса, кг	0,5	10
Блок питания:		
напряжение холостого хода, кВ	4	4
ток короткого замыкания, А	0,15	0,2

Ряд моделей МЭРН со стандартными электродными блоками и блоками с дифференциальными катодами выпускает фирма PERKIN-ELMER (табл. 5.7). Рабочий диапазон давлений этих насосов 10^{-8} – 1 Па; температуры тренировочного прогрева 520 К (в сборе) и 750 К (со снятыми магнитами). Близкие характеристики имеют МЭРН, выпускаемые и другими фирмами (табл. 5.8, 5.9).

Важным эксплуатационным преимуществом обладают насосы VACION (фирма VARIAN), для которых разработан универсальный блок питания и управления, пригодный для насосов диодного и триодного типов. Коммутация электрических цепей при смене насоса осуществляется с помощью печатной платы, вставляемой в блок со стороны внешней панели без его разборки. Блок имеет логарифмическую шкалу для измерения давления по разрядному току.

Этой же фирмой начат выпуск МЭРН нового поколения серии Star Cell с микропроцессорным управлением (табл. 5.10), серии малогабаритных насосов с быстротой действия до 2 дм³/с для откачки электровакуумных приборов и масс-спектрометров и специализированного насоса для откачки водорода Hi-Q VACION, имеющего производительность до 1 м³ · Па/с.

Электродный блок насосов Star Cell состоит из анода и двух электрически изолированных катодных пластин с перфорациями звездчатой формы напротив анодных ячеек. Рабочее напряжение 7 кВ. Катоды с профилированными отверстиями по оси анодов позволяют длительно и высокоэффективно откачивать инертные газы при давлении до 10^{-3} Па. Насосы имеют малые габариты и практически свободны от

насосов фирмы LEYBOLD-HERAEUS

Характеристика	Триодные насосы				
	IZ-30	IZ-80	IZ-120	IZ-270	IZ-500
Быстрота действия, м ³ /с:					
по азоту	0,03	0,08	0,12	0,27	0,5
по аргону	$(7,5 \div 9) \cdot 10^{-3}$	$0,02 \div 0,024$	$0,03 \div 0,036$	$0,07 \div 0,081$	$0,125 \div 0,15$
Давление, Па:					
предельное остаточное					
максимальное запуска			$< 5 \cdot 10^{-9}$		
Диаметр входного отверстия, мм	63	100	100	150	150
Разрядный ток при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Па, мА	0,6	1	2	3,5	7
Габариты насоса, мм	225 x 130 x x 205	355 x 152 x x 282	355 x 152 x x 438	408 x 247 x x 436	408 x 480 x x 436
Масса насоса, кг	13,5	22	42	75	135
Блок питания:					
напряжение холостого хода, кВ	-6,2	-6,2	-6,2	-6,2	-6,2
ток короткого замыкания, А	0,2	0,2	0,5	0,5	1,2

Таблица 5.9. Основные характеристики

Характеристика	Диодные насосы		
	140	270	500
Быстрота действия, м ³ /с:			
по азоту	0,14	0,27	0,5
по аргону	—	—	—
Давление, Па:			
предельное остаточное	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
максимальное запуска	10 ⁻¹	10 ⁻¹	10 ⁻¹
Диаметр входного отверстия, мм	154,2	154,2	154,2
Разрядный ток при давлении 5 · 10 ⁻⁵ Па, мА	1	2	4
Габариты, мм	312 × 216 × 457	312 × 270 × 698	508 × 270 × 698
Масса, кг	55	78	138
Выходные параметры блока питания:			
напряжение холостого хода, кВ	7,5	7,5	7,5
ток короткого замыкания, А	0,52	0,52	0,52

магнитных полей рассеяния. Они не требуют принудительного охлаждения: без демонтажа магнитов допускают прогрев до 620 К. Предельное остаточное давление — менее 10⁻⁹ Па.

Насосы имеют единый блок питания, позволяющий автоматически регулировать напряжение и разрядный ток во всем интервале рабочих давлений. Дистанционное устройство сопряжения блока с управляющей ЭВМ обеспечивает развязку пульта оператора от высокого напряжения. Масса блока 22 кг; габариты 380 × 200 × 150 мм.

Продолжительность эксплуатации МЭРН до замены электродов лимитируется разрушением катодных пластин в результате распыления или растрескивания (при откачке водорода). При давлении 10⁻⁴ Па для диодных насосов она составляет (45 ÷ 50) · 10³ ч, падая до 5 · 10³ ч при давлении 10⁻³ Па. Триодные насосы имеют на 25–30% меньший ресурс. Для стабилизации параметров при сверхвысоковакуумной откачке полезен периодический прогрев насосов до 400–450 К. На стабильность характеристик и ресурс положительно влияет также сокращение времени пребывания насосов под атмосферным давлением; в этом случае укорачивается и их стартовый период.

Эффективность систем откачки на основе МЭРН удается заметно повысить, применяя *комбинированные ионно-геттерные насосы*. В этих насосах в одном корпусе совмещены испарительный и магнито-разрядный откачные блоки, в результате чего на распыляемые штенки геттера попадает значительное число возбужденных в разряде молекул газа,

разрядных насосов фирмы VARIAN

Диодные насосы	Триодные насосы				
	1000	20	30	60	110
1,0	0,02	0,03	0,06	0,11	0,11
—	4,2 · 10 ⁻³	6,3 · 10 ⁻³	0,013	0,02	0,02
10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁹
10 ⁻¹	1	1	1	1	1
273,1	38	72	108	154,2	154,2
—	0,13	0,2	0,4	0,8	0,8
582 × 518 × 305	582 × 214 × 9,5	132 × 187 × 11,8	214 × 132 × 18	353 × 132 × 290	312 × 216 × 457
7	—5,2	—5,2	—5,2	—5,2	—5,2
1,8	0,167	0,167	0,167	0,167	0,8

имеющих большие коэффициенты прилипания. Благодаря этому быстрота действия комбинированного насоса намного превышает ее суммарное значение для отдельно взятых испарительного и разрядного откачных блоков. Эксплуатационные преимущества комбинированных ЭФН особенно существенны в системах откачки установок с частым напуском атмосферного воздуха и в сверхвысоковакуумных установках.

Один из первых отечественных комбинированных насосов выполнен на базе разрядного насоса НЭМ-300, по оси которого установлен прямо-накальный резистивный испаритель насоса ГИН-05М. Быстрота действия этого насоса 1,6 м³/с ($p = 1 \cdot 10^{-5}$ Па), предельное остаточное давление 3 · 10⁻⁸ Па; давление запуска около 1 Па. По аналогичной конструктивной схеме выполнена промышленная серия комбинированных насосов типа ЭГИН (табл. 5.11).

Все модели этой серии выполнены по единой компоновочной схеме. По оси корпуса в его нижней части на фланце установлен блок прямонакальных титан-молибденовых испарителей, число которых зависит от производительности насоса. Электродные разрядные блоки размещены в плоских карманах по периферии корпуса. Постоянные магниты установлены между карманами с наружной стороны корпуса (модели ЭГИН-1/01 и ЭГИН-1,6/0,25) или в герметичных полостях внутри корпуса. Тепловое обезгаживание насосов производится нагревате-

Таблица 5.9 (продолжение)

Характеристика	Триодные насосы		
	220	400	800
Быстрота действия, м ³ /с:			
по азоту	0,22	0,4	0,8
по аргону	0,05	0,08	0,17
Давление, Па:			
предельное остаточное	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
максимальное запуска	1	1	1
Диаметр входного отверстия, мм	154,2	154,2	273,1
Разрядный ток при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Па, мА	1,8	3,5	—
Габариты, мм	312 x 270 x 698	508 x 270 x 698	582 x 518 x 582
Масса, кг	78	138	305
Выходные параметры блока питания:			
напряжение холостого хода, кВ	-5,2	-5,2	-5
ток короткого замыкания, А	0,8	0,8	3,2 · 2

лями — внутренними, смонтированными на цоколе (модели ЭГИН-1/01 и ЭГИН-1,6/0,25), и наружными, состоящими из нескольких съемных секций. Предельное остаточное давление насосов $7 \cdot 10^{-8}$ Па; наибольшее давление запуска 13 Па; максимальное рабочее давление $7 \cdot 10^{-3}$ Па. Анодное напряжение разрядных блоков 7 кВ, напряжение на испарителе 0—13 В.

Таблица 5.10. Основные характеристики насосов серии Star Cell

Характеристика	Star Cell 30	Star Cell 45	Star Cell 60
Быстрота действия при $p = 10^{-4}$ Па, дм ³ /с:			
по воздуху	35	47	60
по водороду	70	95	120
по метану	35	47	60
по кислороду	35	47	60
по аргону	7,9	10,5	13,5
Диаметр входного отверстия, мм	35	63	100
Габариты, мм	310 x 136,5 x x 212	310 x 136,5 x x 232	310 x 136,5 x x 240
Объем, дм ³	9	9,8	10
Масса, кг	19	20	21

Таблица 5.11. Характеристики комбинированных ионно-теттерных насосов типа ЭГИН

Характеристика	ЭГИН-1/0,1	ЭГИН-1,6/0,25	ЭГИН-5/1	ЭГИН-10/1,5	ЭГИН-50/5
Быстрота действия по воздуху, м ³ /с:					
номинальная	1	1,6	5	10	50
при включении только разрядных блоков	0,1	0,25	1,0	1,5	5,0
Диаметр входного сечения, мм	160	250	400	630	1000
Максимальный ток испарителя, А	50	50	110	110	110
Максимальная мощность, потребляемая насосом в режиме запуска, кВт	1,13	2,25	9,76	14,84	42
Число испарителей	2	2	6	6	6
Габариты, мм	532 x x 368 x 523	630 x 432 x 538	758 x x 820 x 1000	1100 x 1100 x 1000	1800 x 1420 x 1440
Масса, кг	87	147	300	550	1800

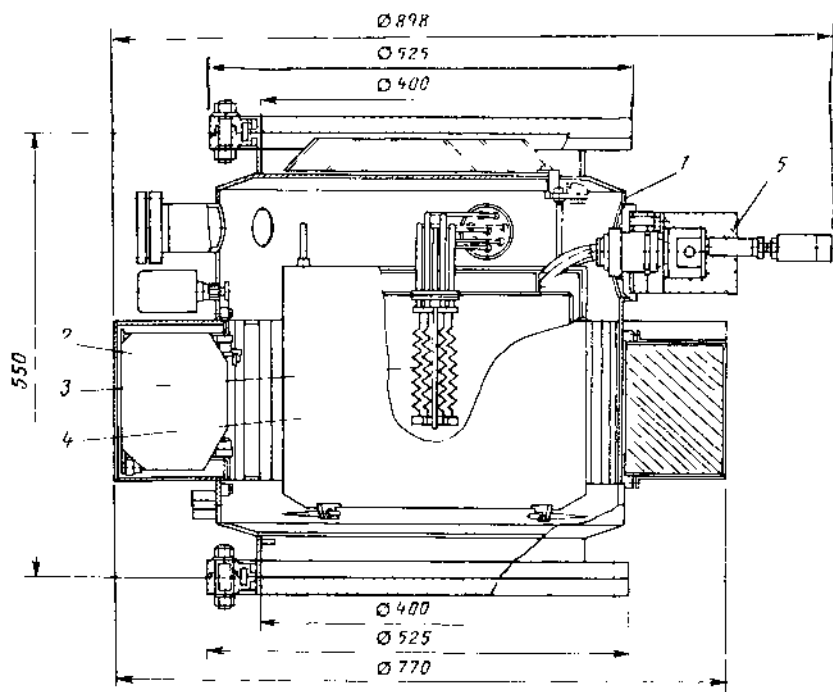


Рис. 5.16. Конструктивная схема насоса НВГМ-5-1.

1 – корпус; 2 – магнетронный модуль; 3 – испаритель; 4 – охлаждаемый экран, запыляемый геттерной пленкой; 5 – устройство ввода жидкого азота

Для сверхвысоковакуумной откачки аналитической аппаратуры и оборудования (оже-спектрографов, установок молекулярно-лучевой эпитаксии и др.) разработаны комбинированные модульные ИГН серии НВГМ (рис. 5.16, 5.17, табл. 5.12). Их особенность – применение сравнительно высокопроизводительного секционированного блока магнетронных модулей, что практически полностью исключает броски давления при включении отгенированного резистивного испарителя. Насосы

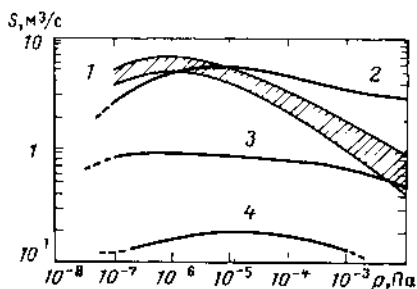


Рис. 5.17. Быстрота действия насосов НВГМ-5 в зависимости от давления при охлаждении экрана жидким азотом.

1 – при совместной работе разрядных модулей и плазменного испарителя (воздух); 2 – при совместной работе разрядных модулей и резистивного прямонакального испарителя (воздух); 3, 4 – при работе только разрядных модулей (воздух, аргон)

Таблица 5.12. Основные характеристики комбинированных насосов серии НВГМ

Характеристика		НВГМ-2-1	НВГМ-5-1	НВГМ-5-2
Быстрота действия, м³/с	по воздуху	номинальная 2,5 при включении 0,4	5,0 0,8	5,0 0,8
	по аргону		0,09	0,2
Диаметр входного отверстия, мм		250	400	400
Габариты, мм:				
	высота	520	550	450
	высота с вводом жидкого азота	520	750	750
	диаметр в плане	516	770	770
	в плане с вводом жидкого азота	517	898	770
Масса, кг		140	280	240
Блок питания	Число на один насос	БП-187	1	2
		БП-341	1	1
Габариты, мм:				
	высота	БП-187 БП-341	238 160	
	в плане	БП-187 БП-341	520 x 535 520 x 372	
Масса, кг		БП-187 БП-341	50 26	

сы пригодны для стабильной длительной откачки водорода, активных и инертных газов, а также паров и газовых смесей агрессивных веществ, в том числе содержащих галогены, мышьяк и т.п.

Съемный испаритель расположен по оси цилиндрического корпуса внутри экрана, охлаждаемого водой или жидким азотом. Для защиты откачиваемой камеры от запыления геттером во входных патрубках установлены жалюзийные экраны. По периметру корпуса лучеобразно смонтированы разрядные модули триодного типа с заземленным анодом. Съемные внешние магниты из клиновидных блоков в сборе составляют замкнутую кольцевую систему. Благодаря этому магнитные поля рассеяния практически отсутствуют: в плоскости присоединительного фланца и на оси насоса магнитная индукция не превышает $0,5 \times 10^{-4}$ Тл.

Насосы НВГМ-2-1 и НВГМ-5-1 со снятыми испарителем и экраном могут быть применены как автономный МЭРН с двумя одинаковыми

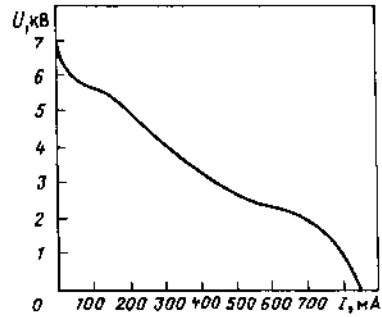


Рис. 5.18. Вольт-амперная характеристика блока питания разрядных модулей насосов серии НВГМ

присоединительными фланцами. Внутренняя полость насосов пригодна для использования в технологических целях, что делает возможным их применение в качестве откачного модуля пролетного типа в ускорителях и других протяженных системах. Насосы допускают эксплуатацию в вертикальном и в горизонтальном положениях. Модификации НВГМ-2-1 и НВГМ-5-1 могут присоединяться к откачиваемой камере сверху, снизу или сбоку; насос НВГМ-5-2 предназначен для установки над камерой или сбоку.

В основном конструктивном варианте в насосах используется резистивный прямонакальный испаритель на базе титан-молибденовых шпильки. Предельное остаточное давление при охлаждении геттерной панели жидким азотом ниже $5 \cdot 10^{-11}$ Па, давление запуска не более 10 Па, максимальное рабочее давление 10^{-2} Па. В схеме блока питания испарителя БП-341 предусмотрены плавные подъем и спад тока накала в интервале 0–65 А при напряжении на испарителе до 8 В. В конструктивном варианте, предназначенном для откачки технологического оборудования, нечувствительного к броскам давления при включении испарителя, используется плазменный испаритель со стабилизацией дуги вращающимся магнитным полем.

Электрическое питание разрядных модулей от блоков БП-187 в двухсекционном насосе НВГМ-2-1 осуществляется через два, а в четырехсекционных насосах НВГМ-5 — через четыре автономных высоковольтных ввода. Напряжение холостого хода блока питания 7 кВ, ток короткого замыкания 0,8 А (рис. 5.18).

Для откачки напылительных установок разработан водоохлаждаемый комбинированный насос О1АГМ-4000 с быстротой действия 4 м³/с (по азоту) и давлением запуска до 2 Па. В насосе применен испарительный блок из четырех биметаллических прямонакальных испарителей с суммарным запасом титана 220 г. Скорость испарения регулируется автоматически в зависимости от давления в откачиваемой камере.

Несколько иная компоновочная схема принята для комбинированных насосов фирмы VEB HOCHVAKUUM. Разрядные блоки этих насосов имеют катодные электроды в виде набора отдельных ламелей из титана, скрепленных по внешнему контуру, так что ионы газа падают на поверхность ламелей под большим углом. Благодаря этому возрастает поток распыляемых атомов титана и увеличивается вероятность необратимого поглощения ионов инертных газов. Прямонакальный резистивный испаритель, состоящий из четырех титановых спиралей с независимым токоподводом, закрепленных на фланце, монтируется на боковой грани насоса, образуя прямой угол с его осью. Поверхности, запыляемые титаном, охлаждаются водой. Насосы имеют предельное остаточное давление $1 \cdot 10^{-9}$ Па и наибольшее давление запуска 1 Па; со снятыми магнитами их корпус может прогреваться до 720 К. Диаметр входного отверстия насосов 160 мм, быстрота действия определяется числом электродных блоков (от 2 до 16) и находится в пределах от 0,14 до 1,0 м³/с (по воздуху) и 0,03–0,225 м³/с (по аргону).

В промышленных масштабах выпускаются и другие модификации комбинированных насосов. Фирмой VARIAN разработан насос с использованием резистивного испарителя косвенного накала MINI Ti-BALL тм и разрядного насоса триодного типа с быстротой действия 0,03 м³/с. Насос состоит из водоохлаждаемого корпуса, на торце которого монтируется испаритель, а на образующей — разрядный насос. Быстрота действия насоса 0,8 м³/с, масса 20,1 кг, размеры в плане 203 × 360 мм, высота 406 мм. Комбинированные насосы фирмы LEYBOLD-HERAEUS выполняются на базе триодных разрядных блоков и прямонакальных резистивных испарителей. Новые модели комбинированных насосов строятся по модульному принципу.

Интересные возможности сулят комбинированные насосы на основе плазменных источников геттерных пленок. В этих насосах оптимальным образом сочетаются два фактора, интенсифицирующие процесс откачки. Плазменный испаритель является мощным генератором носителей электрического заряда, инжекция которых в зону пеннинговского или магнетронного разряда кардинально увеличивает их интенсивность (см. рис. 5.12), и, следовательно, быстроту действия по инертным газам. Магниторазрядный блок, в свою очередь, удобен как "даровой" источник магнитного поля для стабилизации дугового разряда и управления траекториями заряженных частиц. Испытания образцов таких насосов дают весьма обнадеживающие результаты.

Модель комбинированного насоса НМДИ-40 с плазменным источником геттерных пленок выполнена по следующей схеме. Коаксиально цилиндрическому корпусу на съемном днище установлен вкладыш-сильфон, в полости которого по окружности расположены магниторазрядные блоки. Плоскость электродов ориентирована перпендикулярно оси; постоянные магниты и магнитопроводы смонтированы на внешней поверхности вкладыша. Магниторазрядная ступень окружена цилиндрическим экраном, вокруг которого размещен кольцевой катод плазменного испарителя. Распыляемый геттер осаждается на охлаждаемой панели, установленной между корпусом и катодом испарителя. При диаметре входного отверстия насоса 630 мм его параметры составляют: быстрота действия в интервале давлений $7 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па 16 м³/с (по азоту) и 40 м³/с (по водороду); наибольшее рабочее и предельное остаточное давления $7 \cdot 10^{-2}$ и $7 \cdot 10^{-8}$ Па. Ресурс испарителя при

рабочем давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па превышает $5 \cdot 10^4$ ч, что на порядок выше, чем у комбинированного насоса типа ЭГИН; вдвое превышена также удельная быстроота действия.

5.5. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

При создании сверхвысоковакуумных систем некоторых ускорителей возникают серьезные трудности. Они порождаются стремлением уменьшить поперечные размеры при одновременном увеличении конечной энергии пучков и, следовательно, протяженности камер. Минимальное давление в таких камерах, откачиваемых периодически размещенными внешними насосами, может оказаться неприемлемо высоким для ускорения или накопления пучков требуемой интенсивности. Эти ограничения носят принципиальный характер для сильноточных синхротронов и накопителей, перезарядных электростатических ускорителей многозарядных ионов, тяжелоионных циклотронов.

Сходные затруднения неизбежны и при создании малоапертурных генераторов γ -квантов, сверхпроводящих линейных ускорителей с бегущей волной, перезарядных мишеней и ионных источников, находящихся под высоким электрическим потенциалом или в средах с особыми свойствами (газ, жидкость при повышенных давлении и температуре, хладагент, интенсивные радиационные поля и т.п.).

При всем многообразии конкретных научно-прикладных задач, решаемых с помощью ускоренных пучков, в обсуждаемом контексте можно выделить три ключевые проблемы — лимитирующее влияние проводимости откачиваемой камеры, энергообеспечение насосов, расположенных в труднодоступных местах, и габаритные ограничения. Эти проблемы получают эффективное решение при переходе к *интегрированным вакуумным системам*.

Интеграция вакуумных систем реализуется следующими приемами, используемыми раздельно или совокупно:

размещением насосов непосредственно в камере там, где формируются зоны с интенсивным выделением газа (*пространственная интеграция*);

использованием для питания насосов энергии магнитных, электрических и электромагнитных полей, присущих установке, а также энергии ускоряемых или циркулирующих в ней пучков и электромагнитного излучения (*энергетическая интеграция*);

использованием отдельных элементов камеры для выполнения дополнительных функций, связанных с организацией процесса откачки газа или поглощения ионов газа (*функциональная интеграция*).

Интеграция вакуумного тракта, исключая лимитирующее влияние газокинетической проводимости, позволяет радикально улучшить ос-

новные параметры вакуумной системы. На несколько порядков снижается среднее давление в протяженных малоапертурных камерах. Одновременно удается уменьшить или полностью исключить затраты энергии для питания насосов от внешних источников, что имеет принципиальное значение при их размещении в труднодоступных местах. Резко снижаются также масса и габариты элементов вакуумной системы в целом.

Наиболее ярким примером эффективности интегрированного вакуумного тракта являются современные ускорители и накопители с магнитным управлением пучком, для откачки которых используются встроенные в камеру разрядные насосы, работающие в собственном магнитном поле ускорителя. Системы такого типа обладают еще одним важным достоинством — возможностью непосредственного измерения молекулярной концентрации в камере по разрядному току. Первый ускоритель с интегрированным вакуумным трактом создан в СССР в 1965 г. Внутри камеры в осевом магнитном поле ускорителя установлена "многослойная" электродная система пеннинговского типа, образующая кольцевой разрядный насос. Впоследствии аналогичный принцип нашел применение практически на всех отечественных и зарубежных накопительных кольцах, а также на микротронах.

Величина, ориентация и временной характер магнитных полей ускорителей сильно отличаются от магнитных характеристик МЭРН. Для получения данных, необходимых для конструирования встроенных насосов, изучены характеристики электродных систем диодного типа в магнитных полях, свойственных ускорителям. Эксперименты выполнены в постоянных полях с индукцией 0,05–4,5 Тл, в пульсирующих полях с индукцией до 1,5 Тл, ориентированных вдоль оси анодных ячеек, и в постоянных полях с индукцией до 0,5 Тл, ориентированных под углом φ к оси. Выбранные магнитные характеристики исчерпывают возможные области применения встроенных насосов в электрофизических установках различных типов — от синхротронов и накопителей со сверхпроводящей магнитной системой, в которых насосы размещаются в межполюсном промежутке электромагнита, где поле однородно, до систем транспортировки пучка и циклотронов, где насосы могут размещаться в области неоднородных магнитных полей рассеяния. Поле создавалось обычными или сверхпроводящими электромагнитами. Варьировались индукция, напряжение на разрядном промежутке насоса, геометрия электродной системы и ее ориентация относительно силовых линий.

Полученные экспериментальные результаты можно подытожить следующим образом:

во всем изученном интервале индукций подтверждена справедливость обсуждавшихся в § 5.2 и 5.3 критериев оптимизации электродных систем, в том числе параметра подобия Vd_a , обеспечивающих достижение максимального разрядного тока при заданном поле и связывающих

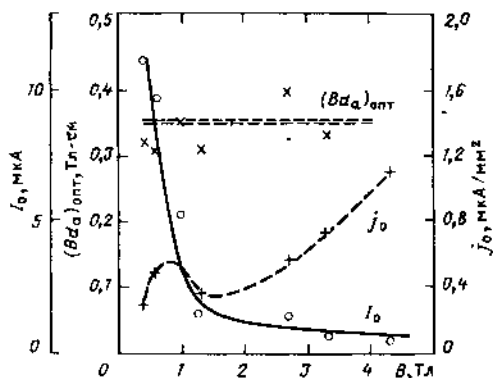


Рис. 5.19. Параметр подобия $(Bd_a)_{\text{опт}}$, максимальный разрядный ток I_0 и максимальная плотность разрядного тока j_0 на одну ячейку оптимизированной электродной системы в однородном магнитном поле в зависимости от индукции (азот, $p = 4 \cdot 10^{-4}$ Па, $U_a = 7$ кВ)

размеры анодных ячеек и параметры магнитного и электрического полей (рис. 5.19);

при работе в импульсных полях с характеристическим временем порядка 1 с разрядный ток I_p меняется намного медленнее, чем магнитное поле;

быстрота действия достигает максимума к концу импульса и затем медленно падает, так что усредненная за период следования импульсов, она приблизительно пропорциональна коэффициенту заполнения tf (t , f — длительность и частота следования импульсов). Отсутствие корреляции между кинетическими зависимостями разрядного тока и быстротой действия объясняется сорбционно-десорбционными процессами на напыленных слоях;

при продолжительной эксплуатации насосов в импульсных полях кинетические кривые $I_p(t)$ и $S(t)$ носят устойчивый характер;

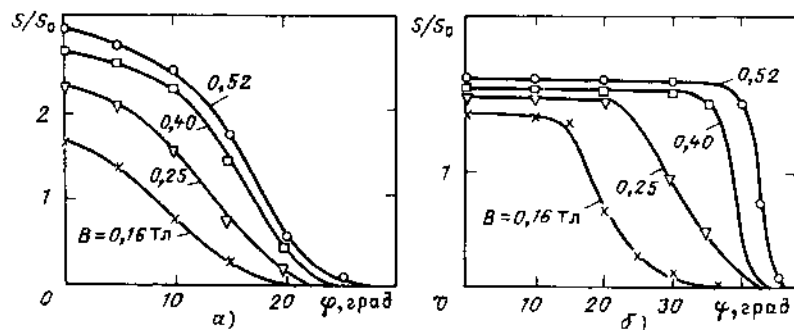


Рис. 5.20. Зависимость относительной быстроты действия МЭРН от угла φ между направлением поля и осью ячейки при различной индукции для квадратных ячеек со стороной 9,5 мм (а) и 20 мм (б)

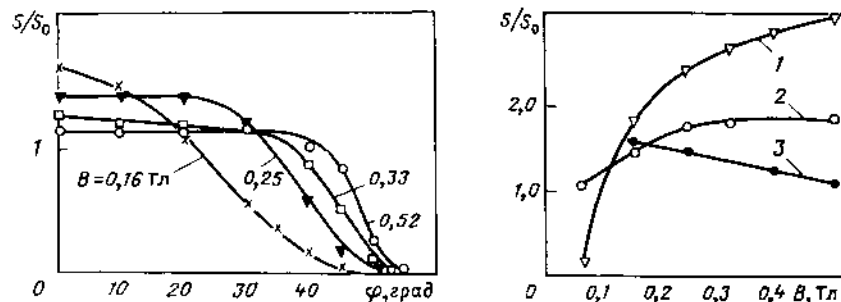


Рис. 5.21. Зависимость относительной быстроты действия МЭРН от угла φ при различной индукции для квадратных ячеек с нарушенной симметрией электрического поля

Рис. 5.22. Зависимость относительной быстроты действия МЭРН в однородном магнитном поле от индукции для квадратных ячеек размером 9,5 x 9,5 мм (1), 20 x 20 мм (2) и 20 x 20 мм с вырезами на гранях (3)

при подаче на электродную систему импульсного напряжения усредненная за период следования импульсов быстрота действия приблизительно пропорциональна коэффициенту заполнения tf ;

интервал углов φ , в котором насосы сохраняют работоспособность в наклонных полях, расширяется с увеличением магнитной индукции и диаметра анодных ячеек (рис. 5.20);

асимметрия электрического поля в анодных ячейках, создаваемая вырезами в ее гранях, на 20–30% увеличивает предельно допустимые значения угла φ в наклонных магнитных полях (рис. 5.21);

такая же асимметрия электрического поля при малых углах φ и в однородных магнитных полях приводит к аномальному росту разрядного тока и быстроты действия с уменьшением индукции (рис. 5.22).

Для встроенных насосов, устанавливаемых в неоднородных магнитных полях, целесообразно поэтому использовать анодные электроды варьируемой геометрии. В зависимости от компоновки вакуумного тракта возможны следующие конструктивные варианты:

уменьшение высоты анодного электрода l_a по мере роста угла φ в соответствии с соотношением

$$l_a \leq a \operatorname{ctg} \varphi, \quad (5.28a)$$

где a — сторона квадратной анодной ячейки;

использование квадратных ячеек с разновысокими гранями в соответствии с соотношением

$$l'_a \leq a \operatorname{ctg} \varphi, \quad (5.28b)$$

где l'_a — высота граней, пересекаемых магнитными силовыми линиями;

использование прямоугольных ячеек со сторонами a и b , связанными соотношением

$$b > a \sec \varphi + l_{at} \operatorname{tg} \varphi, \quad (5.28\text{в})$$

причем большая грань параллельна вектору магнитной индукции.

При работе в сверхвысоковакуумной области удельная мощность, рассеиваемая на электродах МЭРН, не превышает 10^{-2} Вт/см², что исключает их нагрев. Это позволяет использовать "сотовые" аноды с очень высоким (0,95–0,98) коэффициентом заполнения, сваренные из металлической ленты толщиной 0,1–0,2 мм. В очень сильных полях (синхротроны со сверхпроводящей магнитной системой) оптимальный диаметр ячеек составляет всего несколько миллиметров, что делает нетехнологичным традиционное исполнение анодного электрода. Более удобно здесь использовать несколько тонких (2–3 мм) перфорированных пластин. Такие аноды, получившие название *виртуальных*, применены, в частности, в электронном накопителе BESSY, ряде других ускорительно-накопительных комплексов. Электродные блоки, предназначенные для работы в сильных полях, должны эксплуатироваться только в условиях сверхвысокого вакуума. Их включение при давлении выше 10^{-5} Па приводит к быстрому "зарастанию" анодных ячеек напыляемыми атомами геттера.

В насосах, работающих при давлениях выше 10^{-3} Па, для теплоотвода используют массивные водоохлаждаемые аноды из меди с высверленными ячейками. Коэффициент заполнения такого анода не превышает 0,6. Если встроенный насос должен работать в широком интервале давлений, в одном электродном блоке целесообразно устанавливать ячейки различного размера.

Компоновочная схема и конструкция встроенных насосов зависят от ориентации магнитного поля относительно откачиваемой камеры. Если силовые линии параллельны продольной оси камеры, то удобны многослойные (блочные) электродные системы кольцевой формы; ускоряемый пучок проходит в свободной центральной области насоса. В камерах, ось которых ортогональна полю, модули встроенного насоса устанавливают обычно вдоль камеры; в большинстве электронных накопителей с этой целью в камере предусматривается специальный отсек. Модуль имеет длину 300–400 мм и ширину около 35 мм.

Важный конструктивный элемент встроенных насосов – высоковольтные изоляторы, на которых крепится анодный электрод. Конструкция изоляторов должна исключать их загрязнение атомами геттера. В противном случае при работе насоса быстро возрастает ток утечки и измерение давления по разрядному току становится невозможным. При снижении электрического сопротивления изолятора до 10^8 Ом происходит его сильный разогрев и насос выходит из строя. Конструкция изоляторов должна обеспечивать также возможность свободного продольного

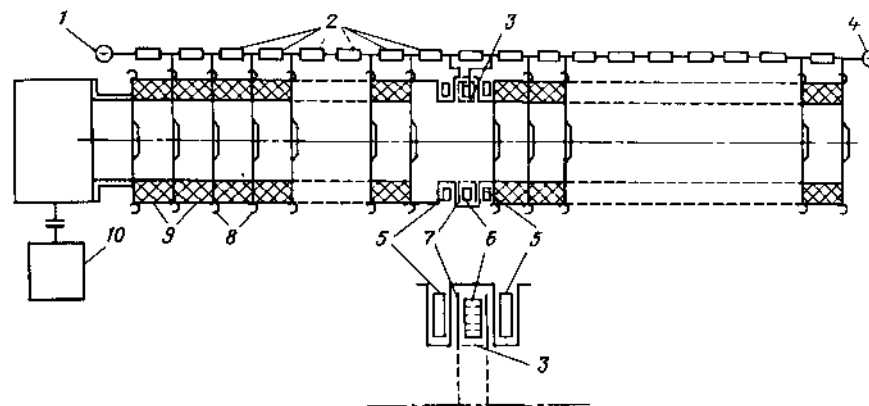


Рис. 5.23. Функциональная схема высоковольтного ускорителя с интегрированным вакуумным трактом:

1, 4 – отрицательный и положительный электроды источника ускоряющего напряжения; 2 – резисторы высоковольтного делителя; 3 – электростатический экран; 5 – постоянные магниты; 6, 7 – анодный и катодный электроды встроенного разрядного насоса; 8, 9 – электроды и изоляционные кольца ускорительной трубки; 10 – система внешней откачки ускорителя

перемещения электродов для компенсации разницы в их тепловом расширении.

Другие возможности эффективного использования пространственно-энергетической интеграции рассмотрим на примере вакуумного тракта высоковольтных и индукционных ускорителей. Трудности здесь состоят в необходимости подачи электропитания к насосам, находящимся под высоким потенциалом, и в габаритных ограничениях. Для их устранения электрическое питание на встроенные насосы, распределенные по длине ускорительной трубки, подают с источников, автоматически приобретающих тот же потенциал, что и сами насосы. С этой целью в высоковольтных ускорителях используют резистивные делители, включаемые параллельно трубке для выравнивания потенциала (рис. 5.23). По такой схеме без увеличения диаметра ускорительных трубок может быть построен вакуумный тракт перезарядных электростатических ускорителей с энергией около 50 МэВ. Газ, напускаемый в перезарядную мишень, целесообразно откачивать встроенным прямопролетным насосом.

В индукционных ускорителях делители формируют с помощью дополнительных диэлектрических вставок; вставки образуют вспомогательный высоковольтный промежуток, параллельно которому подключается электродная система встроенного насоса. При работе ускорителя с высокой скважностью для увеличения действующего значения напряжения электродная система шунтируется дополнительным RC-кон-

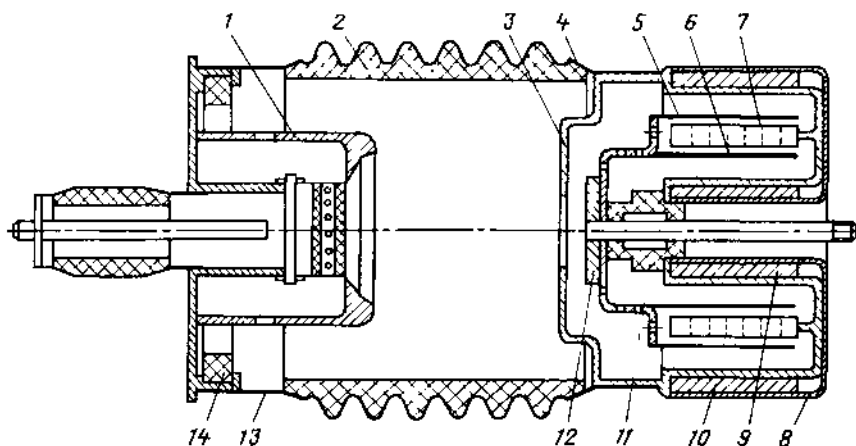


Рис. 5.24. Функциональная схема ускорительной трубки скважинного генератора γ -квантов с интегрированным вакуумным трактом; источник питания встроенного насоса — емкостный накопитель (пояснения в тексте)

туром. По такой схеме, в частности, выполнена одна из моделей малогабаритного индукционного ускорителя на энергию 0,5 МэВ, предназначенного для фотоядерного каротажа нефтяных скважин. Ускоритель представляет собой отпаянную ускорительную трубку, охватываемую индукторами. В корпусе установлены электронная пушка и мишень-анод, бомбардируя которую ускоренный электронный ступок генерирует короткий импульс электромагнитного излучения. В корпусе смонтированы также нераспыляемый геттер из губчатого титана, катодные пластины и кольцевой анод встроенного насоса. Анод электрически соединен с участком положительной полярности вспомогательного высоковольтного промежутка. Катодная пластина закреплена непосредственно на корпусе; вторая катодная пластина изолирована с помощью диэлектрического кольца. Постоянные магниты создают в зоне электродной системы поле осевой ориентации с индукцией 0,05–0,1 Тл. К корпусу приварен медный штенгель для откачки трубки в процессе высокотемпературного обезгаживания и последующей отпайки методом холодной сварки.

Трубка по рис. 5.24 имеет меньшую длину и распределенную емкость, что позволяет использовать ее в наносекундном диапазоне. В корпусе, образованном ускоряющими электродами 4, 13 и изолятором 2, смонтированы электронная пушка 1, антикатод 3, нераспыляемый геттер 14 и мишенный узел, установленный на опорном изоляторе 11. Мишенный узел представляет собой фигурный перфорированный коллектор 12, на котором коаксиально закреплены внешняя 5 и внутренняя 6 перфорированные титановые втулки. Между ними на стойке размещен коль-

цевой решетчатый электрод 7, так что втулки 5, 6 и электрод 7 совместно с кольцевыми магнитами 9 и 10 и магнитопроводом 8 образуют встроенный насос радиального типа. В свою очередь, мишенный узел и электрод 4 с электрически присоединенными к нему антикатодом 3 и анодом 7 образуют емкостный накопитель, заряжающийся электронными ступками, падающими на коллектор 12. После поглощения коллектором некоторого числа ступков электрический потенциал накопителя оказывается достаточным для зажигания разряда и устанавливается динамическое равновесие между зарядом электронного пучка, поступающего на коллектор, и зарядом, стекающим с мишени на корпус. При работе ускорителя с высокой скважностью емкостный накопитель шунтируется дополнительным RC -контуром.

Таким образом, при включении ускорителя, когда газовая нагрузка резко возрастает вследствие термического газовыделения деталей и электронно-стимулированной десорбции с мишени, в трубках происходит самовключение разрядного насоса, что существенно улучшает вакуумные условия. При этом ни одна из конструкций в принципе не нуждается во внешних источниках электропитания насосов. При отсутствии пучка десорбционные потоки откачиваются нераспыляемым геттером.

Условия, необходимые для эффективной работы описанных интегрированных систем, выполняются в достаточно широком диапазоне параметров ускорителей. Эквивалентные электрические схемы ускорительных трубок представляют собой последовательно-параллельные реактивные цепи емкостного характера. Емкость конденсатора RC -контура, шунтирующего электродную систему встроенного насоса, для типичных параметров ($\tau \approx 10^{-7}$ с; $\nu = 10 \div 100$ Гц; $E = 0,5$ МэВ) находится в пределах $10^2 - 10^3$ пФ; напряжение на электродной системе колеблется в интервале 6–3 кВ, что вполне приемлемо для нормальной работы насоса.

Трубки компактны; устойчивы к воздействию механических ударов, вибрации, повышенных температур; экономичны. Контроль остаточного давления при их хранении осуществляется по разрядному току встроенного насоса. Лабораторные испытания показали их перспективность для транспортабельных и малогабаритных ускорителей прикладного назначения.

ЭФН эффективны как средство откачки и других установок с интегрированным вакуумным трактом. В их числе малогабаритные изохронные циклотроны, электромагнитные сепараторы для разделения нейтральной и заряженной компонент пучков быстрых частиц, плазменные ионные источники, перезарядные и инверсионные мишени, высокоточные электронные ускорители с фольговым выводом пучка.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТИПЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ НАСОСОВ

6.1. НЕРАСПЫЛЯЕМЫЕ ЛЕНТОЧНЫЕ ГЕТТЕРЫ

Губчатый титан, его сплавы, другие нераспыляемые геттеры в виде таблеток, втулок и дисков с пористой структурой традиционно используются для высоковакуумной откачки генераторных ламп, источников света, иных электровакуумных и электрофизических приборов. Технологические изыскания по их совершенствованию привели к созданию нераспыляемых геттеров нового типа – пористых композиций на основе металлов IV группы – циркония, титана, их сплавов; активное вещество (сплав) наносится тонким слоем в виде мелкодисперсного порошка на металлические и диэлектрические подложки. Эти геттеры экономичны, надежны, имеют широкий интервал рабочих температур, устойчивы к воздействию внешних электрических и магнитных полей, вибрации, ударным механическим нагрузкам; их сорбционная емкость и скорость поглощения активных газов существенно превышают аналогичные характеристики геттеров из чистых циркония и титана.

Геттерный слой наносится прессованием, накаткой, спеканием в вакууме либо плазменными методами. Его глубина обычно не превышает 100 мкм; в отдельных случаях формируются слои толщиной до 0,4 мм. В качестве подложек применяют чаще всего гибкие ленты из константана, нержавеющей стали и других немагнитных сплавов толщиной 0,1–0,4 мм. Одновременно лента служит токопроводом для резистивного нагрева геттера. Средний размер зерен в геттерном слое около 10 мкм, его поверхностная плотность 0,3–0,4 кг/м². Пористость активного вещества 25–40%; удельная площадь физической поверхности 10² – 10³ м²/кг, примерное соотношение площадей физической и проективной поверхностей от 10² до 10³.

Первичная активация осуществляется лучистым нагревом геттера с помощью внешнего источника или пропусканием по подложке электрического тока; одновременно вспомогательным насосом откачиваются выделяющиеся газы. В термодесорбционном спектре, полученном, к примеру, при активации геттера ST707, наблюдаются пики, соответствующие выделению водяных паров (температурный интервал 320–500 К, максимум при $T = 383$ К), оксида углерода (температурный интервал 360–680 К, максимум при $T = 473$ К) и водорода. Десорбция водорода происходит в температурном диапазоне 400–1050 К и характеризуется двумя пиками с максимумами при 503 и 813 К; их примерное соотношение 1 : 8. Основное количество газа выделяется в интервале температур 610–1050 К. Максимальные высоты пиков, соответствующих парам воды и оксиду углерода, относятся к высоте основного пика водорода как 1 : 2,6 и 1 : 4,2.

Термохимические процессы, идущие при активации, приводят к качественным изменениям фазового состава поверхности. До активации атомное содержание циркония и ванадия в поверхностном слое геттера составляет всего 25%; остальное – атомы углерода (около 60%), кислорода и железа (около 2%); цирконий и ванадий к тому же содержатся в виде оксидов. Прогрев в вакууме резко увеличивает содержание циркония и уменьшает долю углерода; атомные концентрации ванадия и кислорода заметных изменений не претерпевают. При температуре прогрева свыше 800 К элементный состав стабилизируется на следующем уровне: цирконий (68%), ванадий (10%), углерод (12%), кислород (10%); цирконий и ванадий восстанавливаются до металлического состояния, а атомы железа, начиная с температуры около 500 К, вообще исчезают с поверхности.

Для геттеров характерно эффективное диффузионное поглощение водорода с образованием его твердых растворов. Удельная быстрота сорбции самого легкого изотопа водорода в оптимальных условиях близка к 10 м³/(с · м²); она остается почти неизменной в интервале давлений 10⁻⁵ – 10⁻¹ Па. Поглощение водорода протекает в широком диапазоне температур, начиная с комнатной. Предельное остаточное давление в прогретых камерах, откачиваемых НЛГ при 300 К, близко к 2,7 × 10⁻⁹ Па*; основные остаточные газы – водород и смесь метана, водяных паров и оксида углерода. При увеличении температуры геттера в спектре масс остаточных газов резко возрастает доля водорода и метана. Сорбция водорода носит обратимый характер. После насыщения геттерного слоя поглощенный водород может быть десорбирован прогревом геттера до температуры, несколько превышающей рабочую.

Поглощение водорода сопровождается отрицательным побочным эффектом – охрупчиванием геттерного слоя. Это приводит к заметному снижению термомеханических характеристик геттера и ограничивает предельно допустимую концентрацию растворенного водорода.

Тяжелые активные газы – водяные пары, азот, оксид углерода, кислород – поглощаются практически необратимо, образуя устойчивые до $T = 1300$ К химические соединения; равновесное давление этих газов пренебрежимо мало. Скорость их сорбции геттером относительно водорода составляет 0,35–0,55 (оксид углерода), 0,15–0,20 (азот), 0,6–0,7 (кислород). Поглощение водяных паров начинается уже при комнатной температуре и носит диссоциативный характер, причем сорбируемый кислород блокирует дальнейшее поглощение водорода. Полное необратимое насыщение геттера кислородом происходит не более чем за 20–30 циклов откачки водяного пара. Удельная скорость сорбции водяных паров при температурах 300 и 600 К составляет соответственно

* Для откачки не поглощаемых геттером инертных газов и метана используется разрядный насос малой производительности.

$(1,5 \div 2) \cdot 10^{-2}$ и $0,4-0,5 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Примерно такой же механизм характерен и для сорбции оксида углерода.

Инертные газы геттером не сорбируются. Углеводороды поглощаются лишь при высоких температурах и с очень малой скоростью; даже при $T = 1000 \text{ К}$ она составляет менее 1% скорости сорбции оксида углерода.

В некоторых типах геттеров содержится сравнительно большое количество аргона; его концентрация достигает около $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$. Наиболее вероятный источник аргона – его использование в технологическом цикле изготовления геттера. Скорость выделения атомов аргона из реактивированного геттера – от $5 \cdot 10^{11}$ (цирконий-никелевый сплав) до $2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (титан). Присутствие водорода стимулирует десорбцию аргона.

Важные достоинства НЛГ – гибкость конструктивно-компоновочных решений, компактность, простота построения сорбирующих структур – ловушек, эффективно захватывающих молекулы газа. Благодаря этому достигаются значительные удельные значения сорбционной емкости и быстроты действия по активным газам (в особенности по водороду), намного превышающие аналогичные значения для нераспыляемых геттеров традиционного технологического исполнения. Так, удельная быстрота действия оптимизированных геттерных модулей может достигать $10^2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, а их сорбционная емкость $10^4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$ (водород, $T = 300 \text{ К}$).

К настоящему времени наиболее широкое применение получили НЛГ на основе сплавов циркония. Эти сплавы представляют собой одно- или многофазные интерметаллические кристаллические структуры вида Zr_3Al_2 , Zr_5Al_3 , Zr_5Al_4 , Zr_2Fe и др. Разработаны также геттеры на основе титана и композитные геттеры цирконий–углерод, имеющие экстремально высокие пористость (около 50%) и удельную площадь поверхности. Силицид циркония Zr_5Si_3 (ZrSi_2) сохраняет высокие геттерные свойства до температуры 1400 К. Крупнейшим производителем НЛГ является фирма SAES GETTERS, покрывающая около 75% потребностей зарубежных стран. Наибольшее распространение среди разработок этой фирмы получили геттеры ST101 (бинарный сплав, содержащий 84% циркония и 16% алюминия), ST198 на основе бинарного цирконий-железного сплава, ST199 на основе однофазного бинарного цирконий-никелевого сплава и ST707 [тройной сплав циркония (70%), ванадия (24,6%) и железа]. Близкие по свойствам к этим сплавам модификации ленточных геттеров выпускаются и в нашей стране. Разработаны также НЛГ с легирующими микродобавками, позволяющими повысить сорбционную емкость и коэффициент прилипания газов, используемых в специализированных вакуумно-технологических процессах.

Важнейшими характеристиками, определяющими эксплуатационные особенности и области применения НЛГ, являются предельно достижимое давление, коэффициенты прилипания откачиваемых газов, термомеханическая устойчивость, температурно-временные режимы реактива-

Таблица 6.1. Сравнительные вакуумные характеристики НЛГ при рабочей температуре 293 К

Характеристика	НЛГ на основе сплава цирконий–алюминий		НЛГ на основе сплава цирконий–ванадий–железо				
	773	973	773	973	773	973	
Температура активации* ¹ , К							
Откачиваемый газ	H_2	CO	H_2	CO	H_2	CO	H_2
Начальная удельная быстрота действия* ² , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	0,1	0,01	10	3	6	0,5	6
Сорбционная емкость* ³ , $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{м}^2$	–	–	200	0,27	270	0,2	270

*¹ Продолжительность активации 45 мин.

*² Определена при поглощении не более $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{м}^2$ газа.

*³ Определена при условии, что быстрота действия после поглощения указанного количества газа при постоянном давлении $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ падает не более чем до 10% ее начального значения.

ции (регенерации) и стабильность вакуумных характеристик, в том числе при откачке многокомпонентных газовых смесей. Рассмотрим более детально эти вопросы на примере широко применяемых геттеров ST101 (отечественный аналог – *циаль*) и ST707 (табл. 6.1).

Температурный диапазон эксплуатации и реактивации геттера ST707 смещен в область более низких температур по сравнению с геттером ST101. В большинстве случаев это улучшает технико-экономические характеристики средств откачки на основе НЛГ.

Процессы обратимого поглощения водорода цирконий-алюминиевыми геттерами в первом приближении описываются законом Сивертса. Равновесное давление водорода над поверхностью геттера p_0 , лимитирующее предельно достижимое остаточное давление, пропорционально квадрату концентрации поглощенного газа:

$$p_0 = kG_0^2 \exp(A - B/T), \quad (6.1)$$

где k – размерностный коэффициент; G_0 – количество газа, поглощенного единицей массы геттера (средняя концентрация поглощенного газа); A, B – константы сорбции (табл. 6.2). В частности, при поглощении водорода зависимость (6.1) имеет вид:

для геттера ST101

$$\lg p_0 = 2 \lg G_0 + 6,53 - 7000/T; \quad (6.2a)$$

для геттера ST707

$$\lg p_0 = 2 \lg G_0 + 6,93 - 6116/T. \quad (6.2b)$$

Таблица 6.2. Константы сорбции водорода и дейтерия различными нераспыляемыми геттерами

Константа	ST101		ST707		Ti	
	H ₂	D ₂	H ₂	D ₂	H ₂	D ₂
A	11,1	11,3	11,1	11,8	7,4	7,0
B, 10 ³ К	16,7	16,6	14,0	14,5	10,8	10,0

В (6.2) давление выражено в Па, G_0 — в м³ · Па/кг. Теплота сорбции водорода равна 51 (ST101) и 120 (ST707) кДж/моль.

Коэффициент прилипания β при откачке изотопов водорода зависит от состава и структуры геттера и атомной массы газа; он является сложной функцией количества поглощенного газа и температуры геттера. Как видно из рис. 6.1, при малых концентрациях коэффициент прилипания мало зависит от температуры и сравнительно близок для всех трех изотопов водорода. По мере ее роста на зависимость $\beta = f(T)$ начинают противоречивым образом влиять два фактора — температурный рост скорости диффузионного переноса газа в толщу геттера, способствующий сохранению и даже увеличению коэффициента прилипания, и одновременно температурный рост равновесного давления водорода в соответствии с (6.1). В интервале значений T и G_0 , соответствующих близости равновесного и рабочего давлений откачиваемого газа, коэффициент β резко падает (кривая 1 на рис. 6.2). В предельном случае мини-

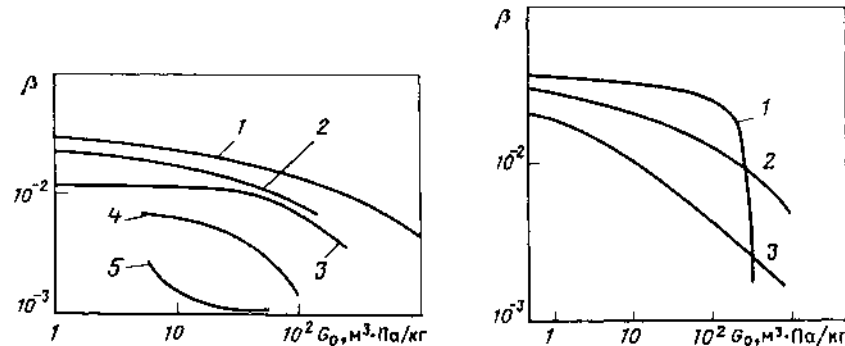
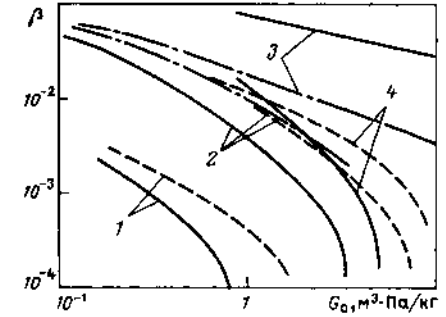


Рис. 6.1. Коэффициенты прилипания водорода (1), дейтерия (2) и трития (3–5) на геттере типа цинка в зависимости от количества поглощенного газа G_0 при значениях температуры геттера 473 К (1–3), 573 К (4) и 373 К (5) и давлении откачиваемого газа $8 \cdot 10^{-4}$ Па (1), $(3 \div 8) \cdot 10^{-4}$ Па (2), $(2 \div 10) \cdot 10^{-4}$ Па (3), $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па (4, 5)

Рис. 6.2. Коэффициенты прилипания водорода на геттере ST101 в зависимости от количества поглощенного газа при различной температуре геттера: 673 К (1), 473 К (2) 293 К (3). Давление откачиваемого газа $8 \cdot 10^{-4}$ Па

Рис. 6.3. Коэффициенты прилипания азота (1), оксида углерода (2, 3) и диоксида углерода (4) на геттерах ST101 (сплошные линии), ST707 (пунктир) и ST171 (штрихпунктир) в зависимости от концентрации поглощенного газа при температурах 300 К (1, 2, 4) и 673 К (3)



мальное достижимое давление над геттером равно равновесному давлению p_0 и $\beta = 0$.

При откачке свободного от примесных газов водорода в высоковакуумной области наиболее целесообразен температурный интервал 500–700 К (водород, дейтерий) и $T = 500$ К (тритий). При переходе к рабочим давлениям 10^{-6} Па и менее температура должна быть снижена до комнатной.

Поглощение водорода геттером ST707 имеет некоторые особенности. На участке, соответствующем примерно одному монослою поглощенного водорода*, при температурах ниже 773 К экспериментальные изотермы сорбции имеют излом; в области меньших концентраций их наклон к оси абсцисс уменьшается. Излом изотерм свидетельствует о том, что обычное истолкование механизма сорбции как диссоциативной диффузии молекул водорода, поступающих на границы зерен посредством системы пор, не отвечает действительному ходу этого процесса. При концентрации сорбата, меньшей $4,4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/м}^2$, и тех же температурах равновесное давление несколько выше, чем это следует из закона Сивертса и отвечающего этому закону соотношения (6.26).

Существенно иной характер носит поглощение оксида и диоксида углерода и других тяжелых активных газов. Коэффициент прилипания этих газов для чистой поверхности больше, чем коэффициент прилипания водорода (см. рис. 6.2 и 6.3). Однако из-за практического отсутствия диффузии даже при повышенных температурах с увеличением концентрации поглощенного газа коэффициент прилипания резко падает. Сорбционная емкость для этих газов, как видно из табл. 6.1, намного ниже, чем для водорода.

Интерпретируя поглощение оксида углерода и других тяжелых газов как адсорбцию, из сравнительных данных по коэффициентам прилипания легко определить реальную площадь физической поверхности гет-

* С учетом соотношения площадей физической поверхности зерен и проективной поверхности геттерного слоя это соответствует концентрации водорода порядка $4,4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/м}^2$.

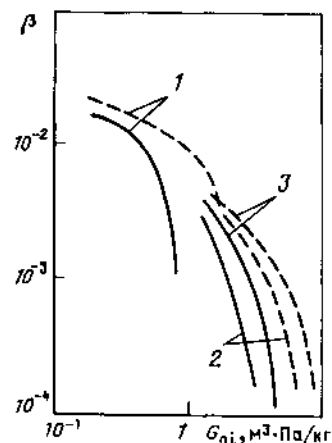


Рис. 6.4. Коэффициенты прилипания водорода на геттерах ST101 (сплошные линии) и ST707 (пунктир) при $T = 300$ К в зависимости от концентрации предварительно поглощенного азота (1), оксида углерода (2) и его диоксида (3)

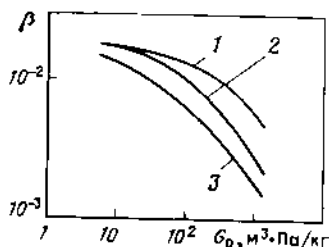


Рис. 6.5. Коэффициенты прилипания чистого водорода (1) и водорода, содержащего 1% кислорода (2) или оксида углерода (3), на геттере ST101 при температуре 573 К в зависимости от концентрации поглощенного газа. Давление над геттером $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па

тера. Соотношение площадей физической и проективной поверхностей сорбционно-активного слоя составляет около 10^2 (ST101) и 70 (ST707).

Тяжелые активные газы даже в небольших количествах оказывают сильное отрицательное влияние на сорбцию водорода (рис. 6.4). Это влияние особенно заметно при пониженных температурах. Так, для геттера ST101 при температуре 573 К подавление сорбции водорода становится ощутимым уже при 1%-ном содержании примесных газов (рис. 6.5). При более высоких температурах этот эффект ослабевает. При $T = 700$ К дискриминирующее воздействие оксида углерода на сорбцию водорода становится заметным лишь при поглощении геттером более $300 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/кг}$ этого газа. Поэтому для эффективной откачки водорода в присутствии активных примесных газов геттеры на основе бинарного цирконий-алюминиевого сплава необходимо поддерживать при температуре около 700 К. При температуре 673 К предельное давление при откачке таких смесей близко к 10^{-5} Па. Геттеры на основе тройного цирконий-ванадий-железного сплава менее чувствительны к примесным газам. Водород никакого влияния на сорбцию тяжелых газов не оказывает. Рекомендуемые фирмой SAES GETTERS эксплуатационные режимы нераспыляемых геттеров на основе циркония даны в табл. 6.3.

Важным фактором, определяющим ресурс и другие эксплуатационные характеристики НЛГ, является режим реактивации. Она проводится при заметном уменьшении коэффициента прилипания из-за насыщения геттера и после каждой экспозиции НЛГ, даже находящегося при комнатной температуре, в воздушной среде. Кроме того, при преимущественной

Таблица 6.3. Рекомендуемые рабочие температуры, К, нераспыляемых ленточных геттеров

Условия эксплуатации	ST101	ST707
Откачка смесей активных газов (N_2 , CO , CO_2 , O_2) при полном давлении менее 10^{-3} Па	673	553
Откачка смесей активных газов в интервале давлений $10^{-3} - 10^{-1}$ Па	973	723
Высокопроизводительная откачка водорода при наличии в системе фоновых активных газов	673	553
Сверхвысоковакуумная откачка газовых смесей при давлении 10^{-8} Па и менее	—	293
Откачка водорода при давлении до 10^{-1} Па, но при очень малой (менее 10^{-6}) относительной концентрации примесных газов	—	293

откачке водорода реактивация должна производиться и при сохранении геттером начальных вакуумных параметров во избежание отслаивания, растрескивания и шелушения геттерного слоя из-за водородного охрупчивания и возникающих термомеханических напряжений.

При первичной и последующих активациях НЛГ доминируют диффузионный перенос и десорбция водорода. Поскольку скорость этих процессов определяется прежде всего температурой, основными параметрами цикла регенерации являются его продолжительность t_0 и максимальная температура $T_{\text{макс}}$. Для геттера ST101 при откачке водорода эти параметры связаны соотношением

$$t_0 = \frac{7,4 \cdot 10^{-3} m}{S} \left(\frac{1}{G_{0 \text{ кон}}} - \frac{1}{G_{0 \text{ нач}}} \right) 10^{-(4,4 - 7000/T_{\text{макс}})} + 4,6 \frac{V}{S} \lg \frac{G_{0 \text{ нач}}}{G_{0 \text{ кон}}}, \quad (6.3)$$

где m — масса геттера, кг; S — быстрота действия вспомогательного насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; $G_{0 \text{ кон}}$, $G_{0 \text{ нач}}$ — конечная и начальная концентрация газа реактивируемого геттера, $\text{м}^3 \cdot \text{Па/кг}$; V — объем камеры, где расположен геттер, м^3 . Второе слагаемое в формуле (6.3) в большинстве случаев пренебрежимо мало. Чтобы избежать самоотравления геттера в процессе реактивации, быстрота действия вспомогательного насоса и скорость подъема температуры должны подбираться таким образом, чтобы давление над геттером не превышало 10^{-2} Па.

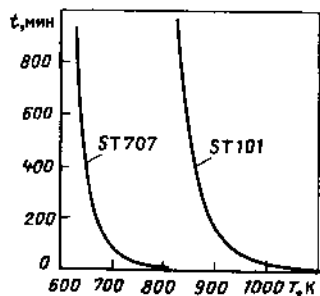


Рис. 6.6. Соотношения между продолжительностью цикла регенерации и максимальной температурой геттера

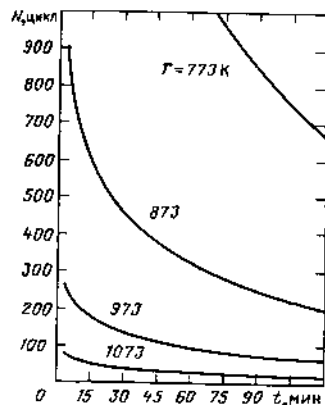


Рис. 6.7. Предельное число циклов регенерации N по критерию термоциклической усталости геттерного сплава в зависимости от их продолжительности и температуры

Используя соотношение (6.3), можно найти продолжительность цикла регенерации при произвольной температуре (рис. 6.6). В большинстве случаев при откачке водорода $t_0 = 45$ мин; тогда $T_{\text{макс}}$ равна 973 К (ST101) и 723 К (ST707). Близкие по эффективности результаты для геттера ST707 достигаются также в режиме $T_{\text{макс}} = 773$ К, $t_0 = 10$ мин. При откачке дейтерия и трития продолжительность цикла регенерации возрастает.

При выборе температурно-временного режима реактивации необходимо учитывать также термоциклическую усталость геттерного сплава. Максимальное число термоциклов N , которое без признаков растрескивания и шелушения может выдержать геттерный слой, по эмпирическим данным фирмы SAES GETTERS составляет

$$N = 6,6 \cdot 10^7 t^{-0,4} \exp(-1,2 \cdot 10^{-2} T), \quad (6.4)$$

где t — продолжительность эксплуатации геттера при температуре T , включая цикл регенерации. Представление о предельном числе термоциклов при фиксированных температурах дают кривые на рис. 6.7.

Предельно допустимая концентрация газа в слое геттера по критерию водородного охрупчивания не должна превышать $(2,5 \div 2,7) \cdot 10^3 \text{ м}^3 \times \text{Па/кг}$ (эмпирические оценки)*. Концентрация водорода к началу

* Для сравнения отметим, что предельная концентрация, определенная из стехиометрических соотношений при растворении водорода в системе цирконий-алюминий, примерно вчетверо выше.

цикла регенерации, обеспечивающая длительную работоспособность геттера, должна быть примерно вдвое меньше.

НЛГ устойчивы к воздействию корпускулярного и электромагнитного излучений, что имеет принципиальное значение для встроенных средств откачки ускорителей, термоядерных установок и газоразрядных приборов.

Образцы НЛГ, насыщенные имплантированными при энергиях 10–30 кэВ ионами водорода, прочно удерживают их при последующих радиационных воздействиях на геттер; концентрация имплантированных ионов достигает $3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$. Начальный коэффициент внедрения молекулярных ионов водорода при энергиях 10–30 кэВ и температуре геттера, близкой к комнатной, — около 0,95; при повышении температуры коэффициент внедрения несколько уменьшается. При имплантации ионов гелия с энергией 30 кэВ коэффициент внедрения падает до нуля при концентрациях поглощенных частиц чуть более 10^{22} м^{-2} ($T = 293$ К) и 10^{21} м^{-2} ($T = 623$ К). Коэффициент внедрения уменьшается с углом скольжения ионного пучка. Фотодесорбционные характеристики НЛГ при воздействии вакуумного ультрафиолетового излучения с энергией квантов $5 \cdot 10^3$ эВ сходны с характеристиками нержавеющей стали; коэффициент фотодесорбции близок к $2,5 \cdot 10^{-2}$. Обработка геттерного слоя в тлеющем разряде при энергии ионов 400 эВ также не ухудшает его сорбционных характеристик. Более того, при интегральной плотности потока бомбардирующих стенку ионов 10^{22} м^{-2} после обработки разрядом и последующей реактивации быстрота действия геттера увеличивается примерно на 20%.

6.2. СРЕДСТВА ОТКАЧКИ НА ОСНОВЕ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ГЕТТЕРОВ

Привлекательность средств откачки на основе НЛГ определяется их эксплуатационной гибкостью, надежностью, отсутствием магнитных и электрических возмущений. Однако коэффициенты прилипания НЛГ сравнительно малы. Даже непосредственно после первичной активации, т.е. в наиболее благоприятных условиях, максимальные значения коэффициентов прилипания для водорода лишь немногим превышают 0,01. Поэтому приемлемые значения КЗ средств откачки могут быть получены лишь путем формирования на основе НЛГ сорбирующих структур лопушечного типа — коаксиальных цилиндров, звездочек, спиралей, П-образных конфигураций и т.п. (рис. 6.8, а). Принципы построения и оптимизации подобных структур подробно рассмотрены в гл. 2. Влетая в такие структуры, молекулы газа до момента обратного вылета претерпевают несколько соударений с сорбирующими стенками. Благодаря этому вероятность их поглощения геттером и, следовательно, КЗ существенно возрастают (рис. 6.8, б). Как видно из рис. 6.9, путем геометрической оптимизации сорбирующих структур можно добиться пример-

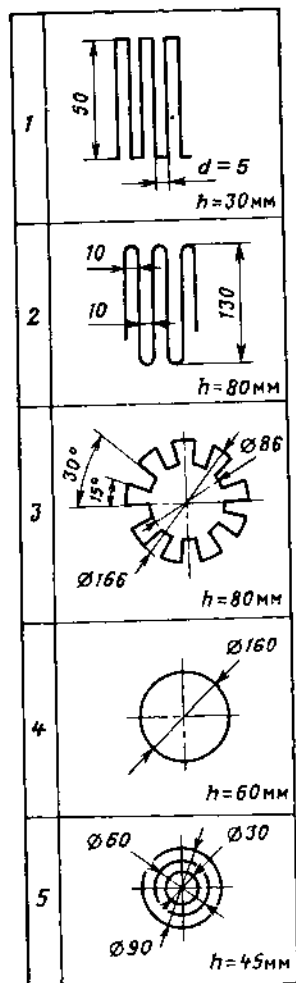


Рис. 6.8. Схемы сорбирующих структур ленточного типа на основе НЛГ (а) и их коэффициенты захвата Γ в функции коэффициента прилипания (б) (h — ширина ленты; номера кривых соответствуют номерам схем)

но десятикратного увеличения КЗ по сравнению с коэффициентом прилипания собственно НЛГ. С учетом этих соображений на основе НЛГ разработаны и выпускаются промышленными сериями автономные насосы и геттерные модули, встраиваемые непосредственно в откачиваемые камеры.

Основной элемент насосов — унифицированные цилиндрические патроны с ленточным геттером в форме многолучевой звездочки (рис. 6.10). Лента закреплена между торцевыми кольцами патрона; его полая центральная область предназначена для размещения нагревателя. Патроны набраны в блок и смонтированы на опорном фланце; по оси фланца установлен сквозной резистивный нагреватель. Размеры патронов и их число в блоке определяют производительность насоса. Блок может размещаться в корпусе или непосредственно в откачиваемой камере.

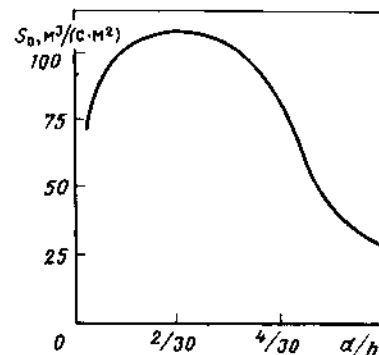
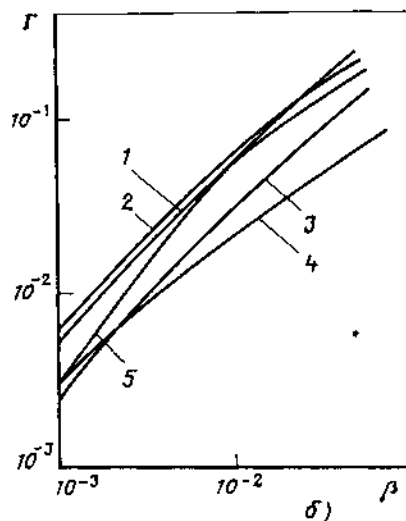


Рис. 6.9. Быстрота действия геттерного модуля П-образного типа (поз. 1 на рис. 6.8, а) по водороду на единицу площади проективной поверхности в зависимости от геометрических соотношений при рабочей температуре 673 К. Температура активации 973 К

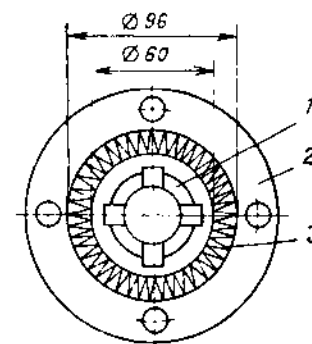


Рис. 6.10. Конструктивная схема высоковакуумного насоса SOPB-AC (вид сверху). 1 — нагреватель; 2 — фланец; 3 — НЛГ

Типичные вакуумные характеристики насосов при различных температурах представлены в табл. 6.4; быстрота действия измерена при давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Сорбционная емкость по оксиду углерода определена как полное количество газа, после поглощения которого и последующей регенерации насос сохраняет не менее 10% начальной быстроты действия; сорбционная емкость по водороду определена по критерию охрупчивания.

Для откачки электровacuумных приборов и других реципиентов малого объема выпускают миниатюрные ГН на основе сплавов циркония. Их начальная быстрота действия до 10^{-2} $\text{m}^3/\text{с}$; мощность, потребляемая в режиме реактивации, до 70 Вт; максимальный рабочий ток 2,5 А; диапазон рабочих давлений 10^{-7} — 10^3 Па. С этой же целью разработаны отечественные ГН на основе высокопористого губчатого титана. Насосы выпускаются в трех вариантах. Их основной функциональный элемент — геттерный штабик массой 16, 32 и 60 г с запеченным апундированным подогревателем резистивного типа; рабочая температура геттера около 1000 К. Максимальное давление в насосах при откачке водорода 10^{-1} Па; предельное остаточное давление при комнатной температуре 10^{-7} Па. Сорбционная емкость по азоту — от 0,02 до 0,1 $\text{m}^3 \cdot \text{Па}$ в зависимости от модификации насоса; сорбционная емкость по водороду на 2–3 порядка выше.

Для встроенных систем откачки вакуумных камер установок управляемого термоядерного синтеза и ускорителей разработаны унифици-

Таблица 6.4. Основные вакуумные характеристики насосов SORB-AC (фирма SAES GETTERS) минимальной и максимальной производительностей

Режим активации	Марка насоса	Быстрота действия, м ³ /с				Полная сорбционная емкость, м ³ · Па			
		H ₂		CO		H ₂		CO	
		293 К	673 К*	293 К	673 К*	293 К	673 К*	293 К	673 К*
$T_{\text{макс}} = 973 \text{ К}$, $t_0 = 45 \text{ мин}$	ST101GP50W	0,13	0,20	0,065	0,1	67	Зависит от рабочего давления	6,7	
	ST101GP500W	1,50	2,00	0,50	0,75	1064		112	
$T_{\text{макс}} = 723 \text{ К}$, $t_0 = 45 \text{ мин}$	ST707GP50W	0,07	0,10	0,03	0,05	80,8		36	
	ST707GP500W	0,85	1,00	0,21	0,37	1330		600	

* В числителе указана рабочая температура для насосов серии ST101GP, а в знаменателе – для насосов серии ST707GP.

рованные одинарные и двойные модули на основе НЛГ П-образной формы из сплавов ST101 и ST707 (рис. 6.11, табл. 6.5 и 6.6).

Для придания необходимой механической жесткости каждое плечо модуля фиксируется на оси с помощью дистанционных втулок из алюмооксидной керамики. Толщина ленточной константановой подложки 0,2 мм. Геттерный слой с каждой стороны имеет толщину 70 мкм. Модули геометрически оптимизированы: в соответствии с рис. 6.9 соотноше-

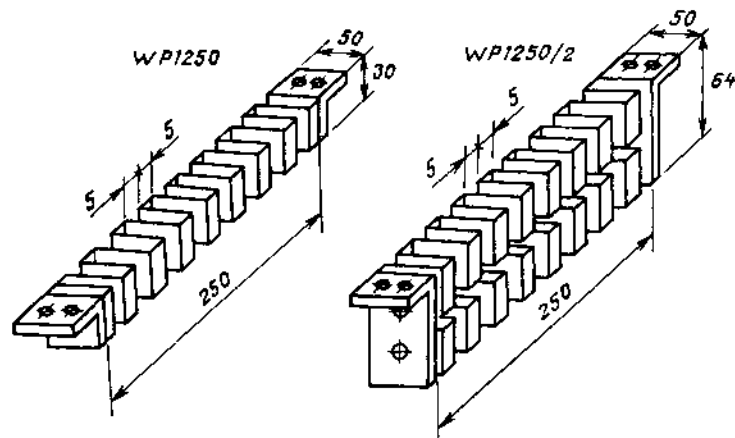


Рис. 6.11. Геттерные модули фирмы SAES GETTERS

Таблица 6.5. Физические и геометрические характеристики геттерных модулей фирмы SAES GETTERS

Характеристика	ST101WP1250	ST101WP1250/2	ST707WP1250	ST707WP1250/2
Площадь поверхности геттера, м ²	0,15	0,3	0,15	0,3
Масса геттерного слоя, г	51	102	58	116
Электрическое сопротивление, Ом	0,28	0,14	0,28	0,14
Масса модуля, кг	0,445	0,830	0,45	0,845

Таблица 6.6. Основные вакуумные характеристики геттерных модулей

Режим активации	Марка модуля	Быстрота действия, м ³ /с				Сорбционная емкость, м ³ · Па			
		H ₂		CO		H ₂		CO	
		293 К	673 К*	293 К	673 К*	293 К	673 К*	293 К	673 К*
$T_{\text{макс}} = 973 \text{ К}$, $t_0 = 45 \text{ мин}$	ST101WP1250	0,85	1,10	0,30	0,56	130	Зависит от рабочего давления	15	
	ST101WP1250/2	1,05	1,25	0,40	0,63	270		30	
$T_{\text{макс}} = 723 \text{ К}$, $t_0 = 45 \text{ мин}$	ST707WP1250	0,56	0,70	0,20	0,36	153		17	
	ST707WP1250/2	0,74	0,94	0,21	0,37	306		34	

* В числителе указана рабочая температура для модулей серии ST101WP, а в знаменателе – для модулей серии ST707WP.

ние d/h для них выбрано равным 0,2 и 0,1. Быстрота действия модулей, указанная в табл. 6.6, измерена при давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Сорбционная емкость по водороду лимитирована охрупчиванием. Сорбционная емкость по оксиду углерода определена как полное количество газа, после поглощения которого и последующей регенерации быстрота действия модуля становится равной 40% начального значения. Все табличные характеристики указаны для модулей, имеющих с тыльной и боко-

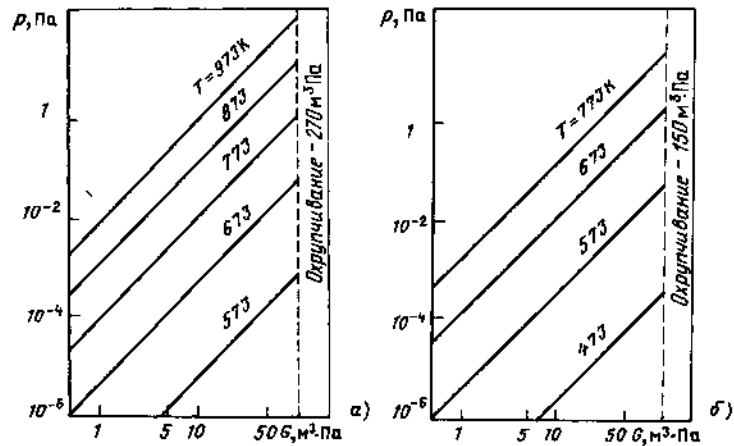


Рис. 6.12. Расчетное равновесное давление водорода при различных температурах в зависимости от количества поглощенного газа для геттерных модулей ST101WP1250 (а) и ST707WP1250 (б), соответствующее закону Сиверта

вых сторон тепловые экраны для повышения экономичности и защиты камеры.

По мере насыщения активного слоя откачиваемым газом коэффициент прилипания β и, следовательно, КЗ модулей падают. Текущее значение КЗ можно определить по методике, изложенной в гл. 2. Коэффициент прилипания берется из экспериментальных зависимостей $\beta = f(G_0, T)$.

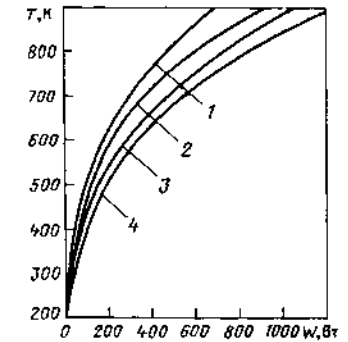
Представление о динамике равновесного давления водорода для модулей на основе геттеров ST101 и ST707 и параметрах их активации, обеспечивающих одинаковые начальные характеристики, дают рис. 6.12 и табл. 6.7. Предельное содержание поглощенного водорода по критерию охрупчивания для одинарных модулей составляет $136 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$ (ST101WP1250) и $154 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$ (ST707WP1250).

Нагрев модулей в рабочем и регенерационном режимах осуществляется пропусканием по подложке постоянного или переменного тока. Элек-

Таблица 6.7. Продолжительность активации, ч, геттерных модулей различных типов

Марка модуля	Температура активации, К					
	1023	973	923	873	723	623
ST101WP1250	0,25	0,75	3,25	16,0	—	—
ST707WP1250	—	0,75	—	—	1,0	2

Рис. 6.13. Температура ленточного геттера в зависимости от электрической мощности, подводимой к модулям WP1250A (1), WP1250/2A (2), WP1250B (3) и WP1250/2B (4)



трические и тепловые характеристики модулей приведены в табл. 6.8 и на рис. 6.13. Буквой А в таблице обозначены модули с тепловыми экранами, буквой В — неэкранированные модули. Тип геттера на тепловые и электрические характеристики модулей не влияет.

Из отдельных модулей можно набирать геттерные панели с быстротой действия около $10 \text{ м}^3/\text{с}$ для откачки крупных установок. Панели представляют собой набор параллельных модулей, смонтированных между двумя ламелями на коробчатой несущей раме; рама одновременно выполняет функции теплового экрана. Для контроля теплового режима в центральной части панели на стороне, обращенной к экрану, можно устанавливать термопару.

Отметим эксплуатационные особенности высоковакуумных средств откачки на основе НЛГ. При каждом рабочем цикле и при каждой экспозиции геттерного модуля (даже находящегося при комнатной температуре) в воздушной среде в нем необратимо сорбируется некоторое количество тяжелых химически активных газов, поэтому вакуумные параметры такого модуля после его регенерации ниже значений, присутствующих модулю после первичной активации. Темпы ухудшения вакуумных характеристик зависят от скорости накопления тяжелых газов и, следовательно, от состава откачиваемых смесей. Сорбционное "истощение" происходит к моменту поглощения геттерным слоем суммарно некоторого количества тяжелых газов $G_{\text{окр}} = \sum \xi_i G_{0i}$, причем влияние каждого парциального компонента на этот процесс оценивается весовым коэффициентом $\xi \ll 1$. По эмпирическим количественным оценкам

Таблица 6.8. Ток, А, необходимый для нагрева геттерных модулей до различных температур

Марка и исполнение модуля	Рабочая температура, К					
	473	553	673	773	973	
WP1250	А	10,5	15,0	22,5	29,0	45,5
	В	13,0	19,5	30,0	39,0	63,0
WP1250/2	А	16,0	23,0	35,0	46,0	74,0
	В	22,0	31,5	46,5	60,0	91,0

критерий сорбционного истощения для геттеров типа цираль и ST101 имеет вид

$$G_{0CO} + G_{0CO_2} + 0,25G_{0N_2} + 0,2G_{0O_2} + 0,1G_{0H_2O} \leq \leq 290 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/кг.} \quad (6.5)$$

Накопление такого количества тяжелых газов необратимо снижает быстродействие модуля примерно на 60% в сравнении с ее значением после первичной активации.

После 20 экспозиций геттера при комнатной температуре на воздухе и его регенерации при $T = 673 \text{ K}$ (ST101) и 553 K (ST707) быстрота действия по водороду падает вдвое; после 40 экспозиций быстрота действия составляет лишь 40% начального значения. При экспозиции в среде сухого азота при тех же условиях быстрота действия сохраняется на уровне 60%. Более того, после нескольких экспозиций в среде сухого чистого азота она даже несколько увеличивается. Работа в среде аргона обеспечивает еще большую стабильность вакуумных характеристик.

Температура геттера, продолжительное время находящегося на воздухе, не должна превышать 323 K . При большей температуре возможно окисление и растрескивание геттерного слоя. Температура возгорания гидридов, образующихся при поглощении водорода, составляет 773 K (ST101) и 623 K (ST707). Попадание атмосферного воздуха в вакуумную систему, содержащую включенный или регенерируемый геттерный модуль, приводит к прожогам ленты, если его температура выше 723 K (ST101) и 473 K (ST707). При меньших температурах происходит частичное окисление и разрушение геттерного слоя. Сорбционная емкость и коэффициент прилипания уменьшаются не слишком сильно, если продолжительность контакта атмосферного воздуха с геттером при температуре до 573 K (ST101) не более 2–3 мин.

Вакуумные характеристики модуля после экспозиции на воздухе могут быть частично восстановлены путем более продолжительной активации при повышенной температуре (например, 2 ч при температуре $1000\text{--}1020 \text{ K}$ вместо стандартных 45 мин при 973 K). Нагрев до температуры свыше 973 K в обычных условиях нежелателен из-за начинающегося испарения меди, входящей в состав подложки.

Хорошие вакуумные характеристики и эксплуатационные достоинства делают НЛГ перспективным средством высоко- и сверхвысоковакуумной откачки водорода, других активных газов. НЛГ применяются в электровакуумной технике, электронике, светотехнике, научном приборостроении и ряде других областей.

Интересные возможности связаны с использованием НЛГ в накопителях заряженных частиц, столкновителях, источниках синхротронного излучения, ускорителях и каналах транспортировки многозарядных ионов. Одной из важных вакуумно-технических задач при создании этих уникальных установок является разработка сверхвысоковакуумных распределенных встроенных насосов с быстротой действия по водо-

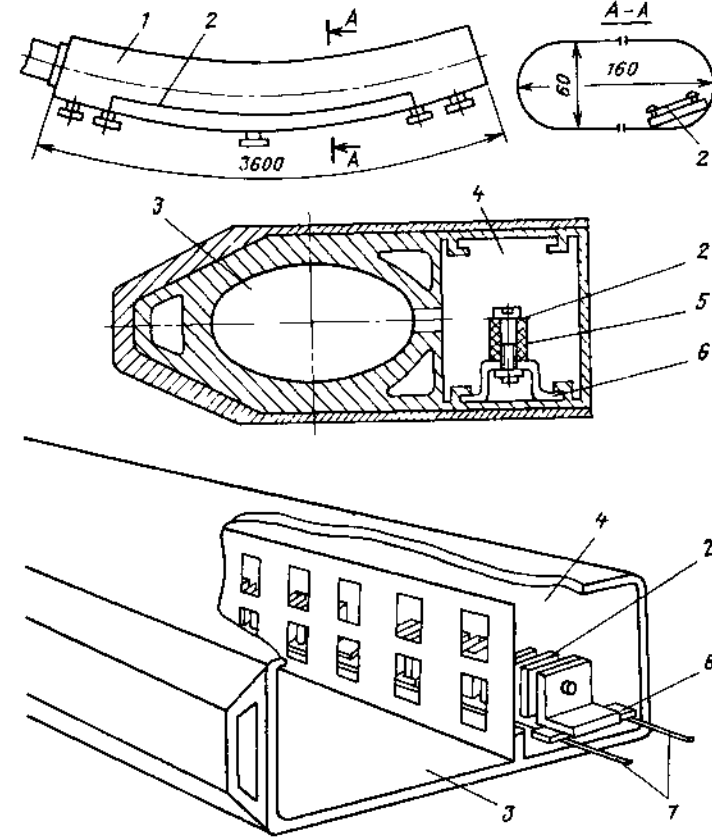


Рис. 6.14. Варианты конструктивных схем вакуумного тракта ускорителей с распределенными встроенными насосами на основе НЛГ:

1 – поворотный магнит; 2 – цирконий-алюминиевый НЛГ; 3 – канал для пучка; 4 – канал для встроенных насосов; 5 – изолятор; 6 – рамка; 7 – направляющие

роду $0,1\text{--}0,2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$. Ленточные геттеры в ряде случаев более предпочтительны для этих целей, чем разрядные насосы. Это связано со следующими положительными особенностями НЛГ: независимостью вакуумных характеристик от магнитной индукции; в несколько раз большей быстротой действия по водороду при близких габаритах; энергопотреблением только в период активации и регенерации; устойчивостью в импульсных режимах откачки; возможностью использования в качестве нагревателя при тепловом обезгаживании вакуумной камеры; меньшими начальными и эксплуатационными затратами. Некоторые из возможных конструктивных схем распределенных встроенных насосов на основе НЛГ даны на рис. 6.14.

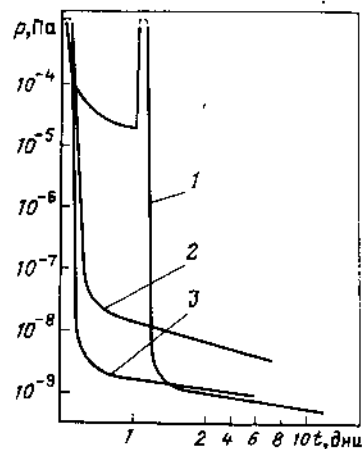


Рис. 6.15. Кинетика откачки 7-метровой секции вакуумной камеры электрон-позитронного столкновителя LEP (ЦЕРН). Продолжительность прогрева камеры при $T = 400$ К составляет 24 ч (кривая 1) и 2 ч (кривые 2 и 3). При снятии кривой 2 быстрота откачки камеры внешними насосами уменьшена до $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Модельный эксперимент по изучению фоновых вакуумных параметров электрон-позитронного столкновителя со встроенным ленточным геттером дает следующие результаты (см. также рис. 6.15 и 6.16). На торцах камеры устанавливались разрядный и турбомолекулярный насосы с суммарной быстротой действия $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; как встроенное средство откачки использовался промышленный НЛГ с шириной ленты 30 мм, так что площадь сорбционно-активной поверхности составляла 500 см^2 на 1 м ленты. При этих условиях быстрота откачки камеры ленточным геттером на 1 м по водороду составила: в области давлений ниже 10^{-5} Па при температуре ленты 293 К для геттера ST101 ($T_{\text{макс}} = 973 \text{ К}$, $t_0 = 45$ мин) $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ и для геттера ST707 ($T_{\text{макс}} = 773 \text{ К}$, $t_0 = 45$ мин) $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$; в области давлений свыше 10^{-5} Па и тех же режимах активации для геттера ST101 ($T = 673 \text{ К}$) $0,7 \text{ м}^3/\text{с}$ и для геттера ST707 ($T = 553 \text{ К}$) $0,35 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сорбционная емкость на 1 м НЛГ при $T = 300 \text{ К}$ близка к $10^3 \cdot \text{Па}$ (H_2) и $10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$ (CO , CO_2); последнее значение соответствует плотности поглощенных молекул порядка 10^{20} м^{-2} . Современная технология подготовки и сверхвысоковакуумной тренировки камер ускорителей позволяет стабильно получать удельную десорбционную нагрузку со стенок около $2,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. При этих условиях возможна длительная устойчивая эксплуатация вакуумной системы при давлениях порядка 10^{-8} Па; интервал между циклами регенерации составит несколько лет. В начальный период эксплуатации частота циклов регенерации будет существенно больше.

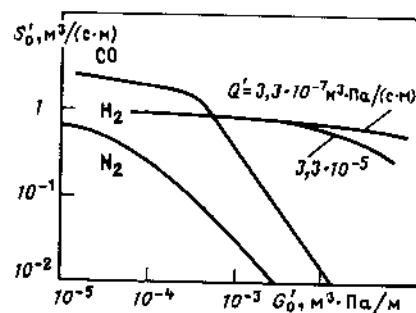


Рис. 6.16. Быстрота действия на 1 м встроенного ленточного геттера ST101 при комнатной температуре в зависимости от удельного количества поглощенных газов

Близкие результаты получены и в модельном эксперименте по изучению вакуумных параметров синхротрона — накопителя многозарядных тяжелых ионов. Ленточный геттер ST101 шириной 30 мм фиксировался винтами на керамическом основании в полости камеры эллиптического сечения размером 160×60 мм и длиной 3,6 м. С торцов камера откачивалась двумя МЭРН с быстротой действия $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Для активации использовался генератор на 80 А при напряжении 30 В. Первичная активация и последующие активационные циклы осуществлялись при давлении не выше $1 \cdot 10^{-3}$ Па. В режиме регенерации встроенный насос работал в общей сложности 36 ч при температуре 973 К без заметного ухудшения характеристик; НЛГ при этом использовался и как нагреватель для обезгаживания камеры при температуре 623 К. После охлаждения до комнатной температуры в камере устанавливалось давление $2 \cdot 10^{-8}$ Па, причем в центральной части оно лишь примерно вдвое превышало давление на торцах. По проектным оценкам, стоимость системы откачки накопителя с использованием встроенных НЛГ на 35% ниже стоимости аналогичной системы на основе МЭРН. При конструировании протяженных средств откачки на основе НЛГ должны предусматриваться компенсаторы их теплового расширения.

Практически показана перспективность НЛГ и в установках управляемого термоядерного синтеза. В термоядерных реакторах и других высоковакуумных установках со значительным энерговыделением применение НЛГ особенно заманчиво, поскольку они хорошо совместимы с приемными устройствами, воспринимающими потоки лучшей энергии и быстрых частиц. К таким устройствам, являющимся одновременно зонами экстремально высоких тепловых и газовых нагрузок, относятся диверторные пластины, приемники заряженных и нейтральных атомных пучков водорода, детали электродной и оптической систем сильноточных ионных источников и плазменных пушек. В этих установках предполагается использовать блоки на основе геттерных модулей с суммарной быстротой откачки по водороду $(1 \div 2) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$. Блоки имеют быстроту действия $(1 \div 3) \cdot 10^2 \text{ м}^3/\text{с}$ при равновесном давлении 10^{-4} Па. Мощность, потребляемая каждым блоком в режиме реактивации, 30 кВт, в рабочем режиме при $T = 473 \text{ К}$ — 1,4 кВт.

Применение НЛГ облегчает техническое воплощение ряда физических идей, способствующих ослаблению влияния холодных частиц газа на параметры термоядерной плазмы. Один из механизмов такого влияния — рециркуляция атомов водорода и примесных газов. Геттерирование, т.е. поглощение атомов водорода, циркулирующих в периферийной зоне между плазменным шнуром и стенкой камеры, позволяет заметно уменьшить поток энергии, уносимый из плазмы этими атомами. Эксперименты с НЛГ на токамаках подтвердили сделанный вывод: установленные вблизи стенки геттерные панели, занимающие лишь 0,5% площади камеры, примерно на 10% уменьшили интенсивность потока циркулирующих атомов. На токамаке TFTR с этой целью смон-

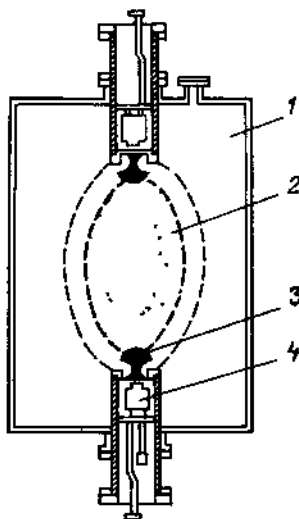


Рис. 6.17. Конструктивная схема токамака ISX-B с откачивающим лимитером

1 — разрядная камера; 2 — плазменный шнур; 3 — откачивающий лимитер; 4 — встроенный геттерный насос

тировано 36 блоков геттерных панелей со значительно большей относительной площадью; их быстрота действия по дейтерию превышает $650 \text{ м}^3/\text{с}$.

При использовании НЛГ в термоядерных установках возможно их водородное охрупчивание на этапе разрядной очистки камеры. Этот процесс проводят при сравнительно высоком давлении водорода (при-

мерно 1–10 Па), и насыщение геттера идет очень быстро. Для предотвращения охрупчивания разработан метод пассивирования НЛГ. С этой целью активированный геттер при комнатной температуре окисляют, подвергая воздействию дозированных потоков кислорода. Сорбционные свойства НЛГ восстанавливаются при его последующей обработке разрядом.

Еще один метод ослабления отрицательного влияния примесей в периферийной зоне плазменного шнура, перспективный для использования нераспыляемых геттеров, — применение откачивающего лимитера. В термоядерных установках с откачивающим лимитером устройства, поглощающие значительные потоки водорода, должны находиться в непосредственной близости от плазменного шнура (рис. 6.17); их рабочее давление близко к 0,1–1 Па. Такое устройство на основе цирконий-алюминиевого геттера испытано на токамаке ISX-B.

В канале откачки лимитера был установлен блок типа SORB-AC с внешним диаметром 96 мм и высотой 127 мм; масса геттерного сплава 0,33 кг. Блок работал в условиях импульсных периодических газовых нагрузок (водород с содержанием до 10% примесных газов) продолжительностью до нескольких секунд; максимальное давление составляло 1 Па. Измеренная быстрота действия около $2 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении 0,1–1 Па оказалась выше расчетной; эксперимент в целом подтвердил приемлемость НЛГ как активного элемента вакуумного тракта токамаков с откачивающим лимитером.

Применение нераспыляемых геттеров на основе циркония для извлечения, накопления и ввода газообразного трития предусмотрено также в ряде проектов вакуумно-тритиевого контура термоядерных реакторов

с магнитным и инерциальным удержанием плазмы. Особенно перспективны в этом отношении композиции цирконий–кобальт. Равновесное содержание трития в цирконий-кобальтовых пластинах на 1–2 порядка больше, чем в обычно используемом для этих целей уране.

Ведущиеся физико-технологические исследования направлены на создание геттерных сплавов с улучшенными вакуумными и ресурсными характеристиками. Разрабатываются оптимизированные по составу и технологии нанесения сплавы и композиции, ориентированные на конкретные области применения и эксплуатационные условия. В частности, заметное улучшение характеристик специализированных НЛГ для длительной откачки изотопов водорода дает нанесение на геттерный слой тонкой пленки палладия. Начаты изыскания по применению нераспыляемых геттеров совместно с турбомолекулярными и разрядными насосами. Положительный эффект здесь могут дать возбуждение и ионизация молекул газа в зоне электрического разряда.

6.3. ИМПЛАНТАЦИОННЫЕ НАСОСЫ

На разработку новых принципов и средств безмасляной высоко- и сверхвысоковакуумной откачки мощное стимулирующее воздействие оказывают многие направления фундаментальных и прикладных физико-технических исследований. Поэтому вполне естественно постоянное привнесение в вакуумную технику новых или ранее не использовавшихся ею физических и физико-химических эффектов. Наибольшее их число связано с взаимодействием возбужденных молекул, быстрых атомов, ионных и электронных пучков, плазмы и электромагнитного излучения с веществом в твердой или жидкой фазе. На этой основе за последние 10–15 лет предложено несколько новых методов откачки газов, преимущественно водорода. Ни одна из высказанных идей не вышла пока из стадии лабораторных исследований. Отдельные экспериментальные результаты не нашли еще полного объяснения или, более того, противоречат друг другу. Тем не менее некоторые из предложенных методов уже сегодня кажутся многообещающей альтернативой традиционным приемам и способам, во всяком случае при решении специальных вакуумно-физических задач. Один из новых методов — *имплантационный* — рассмотрен в этом параграфе, несколько других — в § 6.4.

Импантационная откачка основана на эффекте внедрения ионов и быстрых молекул газа с энергией $10^2 - 10^5 \text{ эВ}$ в приемные пластины (приемники) — неподвижные или обновляемые металлические твердо- и жидкофазные поверхности. Наиболее интересные возможности такой подход сулит при работе с интенсивными ионными и молекулярными пучками водорода, обратимо поглощаемыми гидридообразующими металлами — титаном, цирконием, ниобием, литием, натрием и др.

Коэффициент внедрения μ , являющийся интегральным показателем эффективности имплантационной откачки, определяется как доля

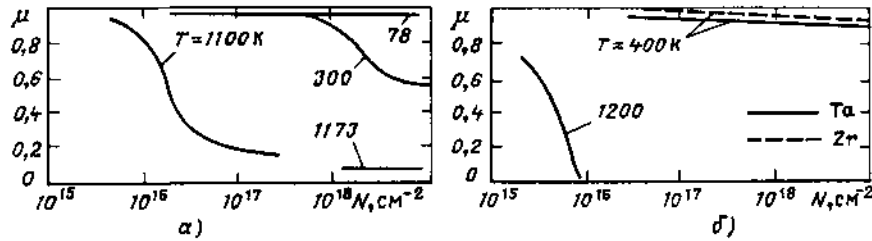


Рис. 6.18. Коэффициент внедрения ионов водорода в зависимости от концентрации поглощенных частиц для приемников из титана (а), тантала и циркония (б) при различных температурах. Энергия пучка 10–35 кэВ

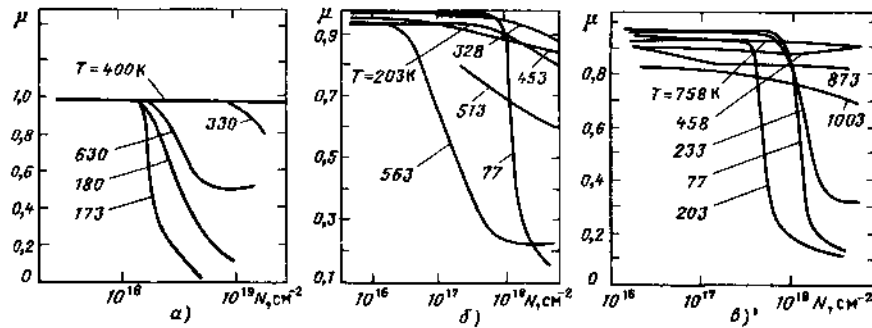


Рис. 6.19. Коэффициент внедрения ионов дейтерия в зависимости от концентрации поглощенных частиц для приемных пластин из титана (а), ниобия (б) и эрбия (в) при различных температурах. Энергия пучка 18–60 кэВ; плотность тока до 1,5 мА/см²

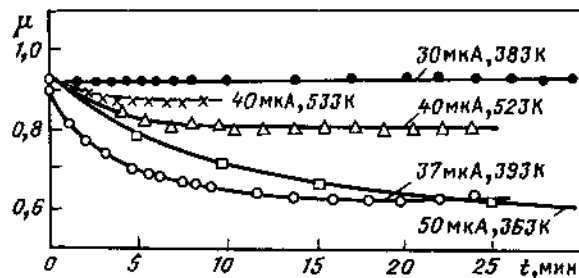
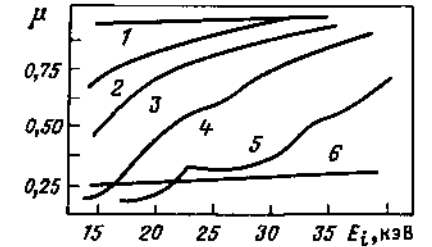


Рис. 6.20. Кинетические зависимости коэффициентов внедрения ионов дейтерия в приемник из лития при различных температурах. Энергия пучка 18 кэВ

Рис. 6.21. Коэффициент внедрения ионов водорода в зависимости от энергии пучка для приемников из титана (1), никеля (б) и для двуслойной мишени (титан–никелевая пленка) при толщине пленки $6 \cdot 10^{-6}$ см (2), $1,2 \cdot 10^{-5}$ см (3), $1,6 \cdot 10^{-5}$ см (4), $2,6 \cdot 10^{-5}$ см (5). Плотность тока на приемнике 0,12 мА/см²



внедренных в приемную пластину частиц $N_{вн}$ по отношению к числу бомбардирующих ее N :

$$\mu = N_{вн}/N. \quad (6.6)$$

Из представленных на рис. 6.18–6.24 экспериментальных данных видно, что в очень широком интервале параметров бомбардирующих частиц коэффициент внедрения остается близким к 0,9 и почти неизменным. К примеру, коэффициент внедрения в диапазоне энергий 10–60 кэВ и плотностей тока пучка 0,12–1,5 мА/см² почти не зависит от этих параметров. Легко объяснимое исключение составляет ход экспериментальных кривых для биметаллических приемных пластин (рис. 6.21).

Использование биметаллических приемных пластин открывает интересные технические возможности. Приемники*, состоящие из массивной подложки с высоким коэффициентом внедрения и пленки из металла, не растворяющего водород (никеля, золота, платины и др.), являются своеобразными ловушками для быстрых ионов. Такой пленкой может быть и пассивированный слой металла подложки. Толщина пленки при этом, разумеется, должна быть меньше длины пробега иона. При выполнении этого условия коэффициенты внедрения для системы металл–пленка и для чистого металла подложки, как видно из рис. 6.21, практически совпадают (кривая 2 для ионов с энергией свыше 25 кэВ и кривая 3 для ионов с энергией свыше 35 кэВ). С уменьшением энергии и соответственно длины пробега часть ионов задерживается пленкой и коэффициент внедрения начинает падать, приближаясь к своему значению для массивного материала пленки. То же происходит с увеличением толщины пленки. Коэффициент реэмиссии водородных атомов для биметаллических приемников не превышает $6 \cdot 10^{-2}$ и очень медленно возрастает с увеличением плотности ионного пучка.

Коэффициенты внедрения, реэмиссии и другие константы взаимодействия молекулярных и атомарных ионов с металлическими приемниками при одинаковой энергии, приходящейся на один нуклон, практи-

* В более общем смысле следует говорить о приемниках с различными свойствами поверхностного слоя и металлической матрицы по отношению к падающим частицам (см. § 6.4).

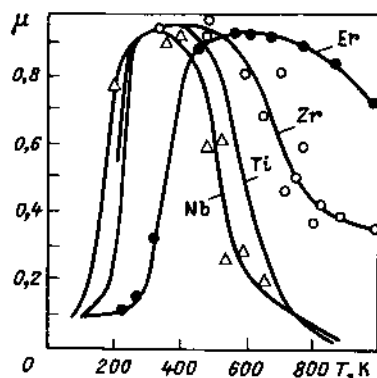


Рис. 6.22. Температурная зависимость коэффициентов внедрения ионов водорода для твердофазных приемников из различных металлов. Энергия пучка 18 кэВ; концентрация поглощенных частиц $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

чески совпадают. Это подтверждает диссоциативный характер соударения молекулярных ионов с поверхностью.

Характерный вид с уплощенной вершиной имеет температурная зависимость коэффициентов внедрения (рис. 6.22 и 6.23). Пологий макси-

мум в температурном диапазоне 350–500 К присущ также аналогичным зависимостям для приемников из титана, бомбардируемых ионами водорода и дейтерия с более высокими энергиями – до 60 кэВ. В последнем случае концентрация поглощенных частиц достигала 10^{19} см^{-2} . Для приемников из жидкого лития можно говорить даже о существовании широкого плато на уровне 0,9–0,97, доходящего до $T = 650 \text{ К}$ (рис. 6.23, 6.24). Уменьшение коэффициента внедрения при более высоких температурах связано с начинающейся диссоциацией гидридов и реэмиссией водорода.

После достижения критической концентрации имплантированных атомов коэффициент внедрения резко падает. Как видно из кривых, приведенных на рис. 6.18 и 6.19, абсолютное значение критической концентрации сильно зависит от температуры приемника. В области оптимальных с этих позиций температур критическая концентрация для большинства гидридообразующих металлов несколько превышает 10^{18} см^{-2} ; для титана и лития она более чем на порядок выше. В области криогенных и повышенных температур критическая концентрация намного ниже.

Насыщенные приемные пластины реактивируются прогревом.

Качественное объяснение приведенным экспериментальным данным дает обращение к механизму диффузии. В области средних температур в системах водород–активный металл внедрение быстрых ионов сопровождается их экзотермическим растворением и образованием гидридов. Поскольку энергия активации диффузии значительно меньше теплоты растворения (табл. 6.9), внедренные атомы оказываются в потенциальной яме, и их реэмиссия с поверхности мала. Однако с ростом температуры кинетическая энергия колебательного движения внедренного атома и вероятность преодоления им поверхностного энергетического барьера возрастают; коэффициент внедрения в этих условиях уменьшается.

Существенное влияние на процессы внедрения и реэмиссии водородных атомов оказывает также радиационное повреждение кристалличес-

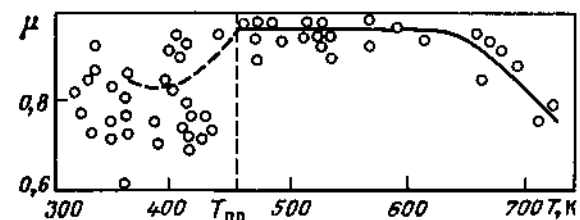


Рис. 6.23. Температурная зависимость коэффициента внедрения ионов дейтерия для приемников из твердо- и жидкофазного лития. Энергия пучка 18 кэВ; концентрация поглощенных частиц $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($T_{пл}$ – температура плавления лития)

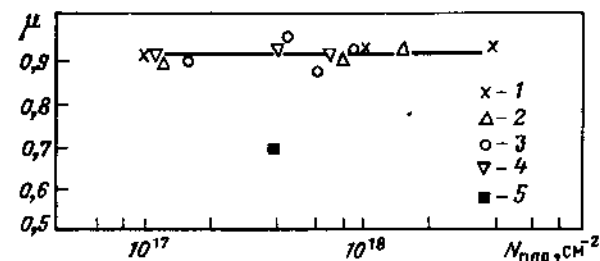


Рис. 6.24. Коэффициент внедрения ионов H_2^+ в приемник из лития в зависимости от плотности потока падающих частиц (в пересчете на протоны) при различных значениях температуры мишени и энергии пучка:

1 – 10 кэВ, 563 К; 2 – 5 кэВ, 563 К; 3 – 10 кэВ, 623 К; 4 – 10 кэВ, 683 К; 5 – 10 кэВ, 443 К (твердофазный литий)

кой решетки материала приемных пластин, в частности образование дополнительных вакансий. Об этом свидетельствуют существование пиков на температурных зависимостях потока реэмиссии, изменение энергии активации при облучении приемника, значительная подвижность внедренных атомов при криогенных температурах и ряд других факторов. Их подробное обсуждение выходит за рамки этой книги.

Приведенные данные показывают, что гидридообразующие металлы могут быть использованы как эффективные поглотители быстрых атомов водорода. Наибольшими коэффициентами внедрения (0,97–0,98) характеризуются титан, цирконий и литий (в жидкой фазе). Максимальной сорбционной емкостью обладает титан (около трех поглощенных атомов водорода на атом титана). Температурный интервал, соответствующий предельным значениям коэффициента внедрения, составляет 300–400 К (ниобий), 300–450 К (титан), 300–500 К (цирконий), 430–650 К (литий) и 500–800 К (эрбий). Для достижения наибольшего ресурса необходимо, чтобы насыщение приемников происходило равномерно. Расчетный ресурс приемных пластин из титана в одном цикле

Таблица 6.9. Некоторые диффузионные константы в системе водород — гидридообразующие металлы

Система	Коэффициент диффузии, см ² /с		Энергия активации, кДж/моль*	Теплота растворения, кДж/моль
	D ₀	D _{373 К}		
Ti — H ₂	1,8 · 10 ⁻²	9,4 · 10 ⁻¹⁰	41,8–59,4 (51,9)	80–143
Zr — H ₂	7 · 10 ⁻³	7,1 · 10 ⁻⁸	29,7–47,7 (35,6)	122–170
Nb — H ₂	5 · 10 ⁻⁴	1,9 · 10 ⁻⁵	(10,2)	
Nb — D ₂	5,4 · 10 ⁻⁴	9,8 · 10 ⁻⁶	10–21 (12,4)	35–97
Nb — T ₂	4,5 · 10 ⁻⁴	6,8 · 10 ⁻⁶	(13,0)	
V — H ₂	4,4 · 10 ⁻⁴	1,1 · 10 ⁻⁵	10–15 (11,4)	63,6
V — D ₂	3,1 · 10 ⁻⁴	3,4 · 10 ⁻⁶	(14,0)	
Ta — H ₂	7,0 · 10 ⁻⁴	6,2 · 10 ⁻⁸	27–31 (28,9)	72,0
Ta — D ₂	4,6 · 10 ⁻⁴	2,6 · 10 ⁻⁸	(30,3)	
Pd — H ₂	5,25 · 10 ⁻³	2,3 · 10 ⁻⁶	(24,0)	
Pd — D ₂	2,5 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻⁶	21–26 (21,5)	16,8
Pd — T ₂	10,5 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻⁶	(26,0)	

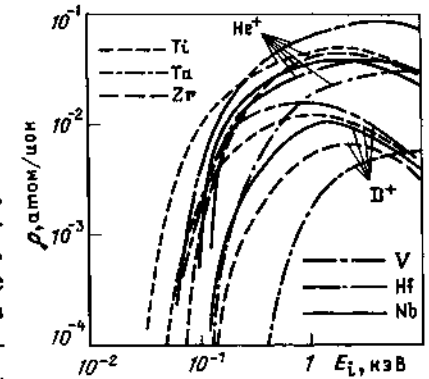
* В скобках приведены значения, использованные при вычислении D_{373 К}.

поглощения при плотности пучка протонов 1 мА/см² и оптимальной температуре — около 100 мин. При продолжительной эксплуатации приемных пластин концентрация поглощенных частиц водорода в каждом цикле не должна превышать 10¹⁹ см⁻² из-за опасности разрушения пластин в результате blisterобразования.

Вакуумный имплантационный насос для откачки водорода, таким образом, должен содержать ионизатор откачиваемого газа, устройство для ускорения ионов водорода и приемные пластины с системой их тепловой реактивации и удаления выделившихся газов. Главная техническая трудность, препятствующая пока практическому использованию этих насосов, определяется ограниченным ресурсом приемных пластин.

Один из факторов, лимитирующих ресурс, уже обсуждался. Это насыщение пластин поглощенными атомами, требующее их периодической реактивации. Для того чтобы исключить остановку на период реактивации, разработан ряд конструктивных схем имплантационных насосов непрерывного действия. В них предусматривается функциональное разделение процессов откачки и реактивации между двумя рабочими камерами насоса, связанными между собой приемными пластинами типа бесконечной ленты и узкими каналами с ограниченной газокинетичес-

Рис. 6.25. Энергетическая зависимость коэффициентов распыления некоторых металлов легкими ионами



кой проводимостью. В то время, пока в камере имплантации осуществляется откачка, другая часть приемника, реактивируется. После насыщения работающей пластины в камеру имплантации вводится реактивированная приемная пластина. Далее процесс повторяется.

Другой фактор, лимитирующий ресурс приемных пластин, — их распыление падающим пучком. Физический порог распыления металлических материалов легкими ионами близок к 100 эВ; при больших энергиях, как видно из рис. 6.25, коэффициент распыления быстро возрастает, достигая максимума в диапазоне 0,5–1 кэВ. При дальнейшем росте энергий падающих частиц коэффициент распыления медленно уменьшается; в температурном интервале до 0,7T_{пл} он от температуры практически не зависит; при больших температурах экспоненциально возрастает. Поскольку основное число атомов водорода концентрируется на узком конечном участке пробега иона, распыление падающим пучком тонкого слоя мишени с толщиной, равной длине пробега, приведет к выделению ранее поглощенного водорода. Поэтому ресурс приемных пластин должен определяться с учетом процесса распыления.

Для ориентировочных оценок коэффициент распыления титана легкими ионами можно принять равным 5 · 10⁻³. При таком предположении утонение приемной пластины из титана в результате распыления на глубину, равную длине пробега протона, скажем, с энергией 15 кэВ (10⁻⁵ см) произойдет при полном числе упавших на поверхность ионов около 2 · 10²⁰ см⁻². Это значение всего в несколько раз выше критической концентрации по критерию насыщения. При меньших энергиях пучка коэффициент распыления возрастает, а длина пробега иона уменьшается. В совокупности это дает еще более неблагоприятные результаты при оценке ресурса приемных пластин. Высказанные соображения иллюстрируют трудности создания твердофазных приемных пластин, обладающих приемлемым ресурсом.

Особый интерес в этой связи представляют непрерывно возобновляемые жидкометаллические приемники водородных пучков, в особенности пленки щелочных металлов. Ранее уже отмечались экстремально высокие значения коэффициента внедрения атомов водорода в жидкофазные литиевые мишени. Как видно из рис. 6.23 и 6.24, в зависимости от энергии бомбардирующих частиц он составляет 0,9–0,97 при

концентрации внедренных атомов до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Литий имеет сравнительно низкую температуру плавления (445 К); давление насыщенных паров в точке плавления составляет всего $4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$. Лишь при увеличении температуры до 600 К давление паров превышает 10^{-3} Па . По кинематической вязкости жидкий литий при рабочих температурах близок к воде: он способен образовывать тонкие пленки, смачивающие металлические подложки. Низкая скорость испарения и малый атомный номер лития ($Z = 3$) делают возможным его использование в термоядерных установках в непосредственной близости от плазменного шнура. Определенными физическими и эксплуатационными достоинствами обладают также натрий и галлий.

Применение жидкометаллических приемников делает вполне реальным создание эффективных поглотителей водородных и, возможно, гелиевых пучков, обладающих практически неограниченным ресурсом. Такой приемник выполняется в виде тонкой пленки, текущей по твердой охлаждаемой подложке, или капельной струи. При замкнутой циркуляции жидкий металл нагревом вне установки очищает от растворенного газа и вновь подают в зону имплантации; транспортировку металла с необходимой скоростью легко осуществить магнитогидродинамическим способом. Попутно решается еще одна важная задача — поглощение интенсивных тепловых потоков, излучаемых плазменным шнуром или другими источниками имплантируемых пучков. Теплоаккумулирующая способность особенно велика у галлия.

По критериям магнитогидродинамической устойчивости течения длина рабочей области приемника, т.е. зоны имплантации, должна быть близка к 10 см при толщине пленки 1–2 мм. Скорость течения жидкого металла может ограничиваться эрозией подложки, что особенно вероятно при ее контакте с более тяжелым галлием. Поэтому скорость течения не должна превышать 10 м/с (литий) и 5–7 м/с (галлий). При указанных размерах рабочей области и скоростях пленки ожидаемые продолжительность ее контакта с пучками и плотность допустимых тепловых потоков составляют 10^{-2} с , 10 МВт/м^2 (литий) и 30 МВт/м^2 (галлий).

Для примера в табл. 6.10 и 6.11 сведены проектные параметры двух жидкометаллических имплантационных устройств — пленочной и капельной диафрагм для экспериментального термоядерного реактора-токамака. Диафрагмы размещаются непосредственно в разрядной камере; в рабочем режиме они воспринимают значительные тепловые нагрузки и интенсивные корпускулярные потоки, формируя плазменный шнур на начальном этапе разряда.

Конструкция пленочной диафрагмы не требует особых пояснений. Основным элементом капельной диафрагмы является трубчатый контур в верхней части разрядной камеры, снабженный фильтровой пластиной. Продавливая сквозь эту пластину под давлением жидкий металл, можно создавать квазинепрерывную многослойную вертикальную за-

Таблица 6.10. Основные расчетные параметры пленочной жидкометаллической диафрагмы термоядерного реактора-токамака

Характеристика	Рабочая жидкость	
	Литий	Галлий
Протяженность зоны имплантации, м	0,1	0,07
Ширина диафрагмы, м	0,9	0,9
Толщина пленки в рабочей области, мм	2	2
Скорость пленки в зоне имплантации, м/с	2–10	1,5–7
Максимальная плотность поглощаемого ионного пучка, м^{-2}	10^{22}	10^{21}
Максимальная плотность теплового потока в стационарном режиме, МВт/м^2	10	30
Максимальная отводимая тепловая мощность, МВт	2	4,5
Температура жидкого металла, К:		
на входе в зону имплантации	480	330
максимальная на поверхности пленки	623	1023
на выходе из рабочей области	500	410
Максимальный расход жидкого металла, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	40	28

Таблица 6.11. Основные расчетные параметры капельной жидкометаллической диафрагмы термоядерного реактора-токамака

Характеристика	Рабочая жидкость	
	Литий	Галлий
Ширина капельной завесы, м	0,2	0,2
Диаметр капель, мм	2	3
Максимальная скорость капель, м/с	20	14
Максимальная плотность теплового потока в стационарном режиме, МВт/м^2	8	20
Максимальная отводимая тепловая мощность, МВт	1,6	4,0
Число слоев завесы	10	10
Температура жидкого металла, К:		
на входе в рабочую область	480	330
максимальная на поверхности капли	623	1023
на выходе из рабочей области	575	710
Максимальный расход жидкого металла, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	20	13

весу из капель лития или галлия. Завеса формируется на внешней стороне плазменного шнура. Летящие капли падают в коллектор; конденсат перекачивают затем в систему очистки жидкого металла от поглощенного газа. Очищенный металл вновь транспортируют в подающий трубчатый контур.

По выполняемым функциям и важнейшим параметрам — воспринимаемой тепловой мощности, плотности потоков ионных и нейтральных

пучков, температурным режимам — диафрагмы сходны с другими элементами вакуумного тракта токамака: экранами, приемными пластинами дивертора, откачивающими лимитерами. Поэтому приведенные в табл. 6.10, 6.11 данные можно рассматривать как типичные характеристики наиболее энергонапряженных функциональных элементов термоядерного реактора.

Физические и конструктивно-технологические задачи, связанные с созданием жидкометаллических приемных устройств, еще требуют своего разрешения. К их числу относятся устойчивость течения и циркуляции пленок жидких металлов в сильных магнитных полях, динамические сорбционные свойства открытых жидкометаллических поверхностей по отношению к гелию и тяжелым изотопам водорода в сильных радиационных полях, кинетика распыления жидких пленок лития и галлия ионами гелия, дейтерия и трития и собственными ионами, коррозионная стойкость приемных и транспортирующих устройств, устойчивость струйно-капельного переноса жидких металлов в неоднородном нестационарном магнитном поле и т.п. Тем не менее многоцелевое применение жидкометаллических имплантационных устройств в системах дополнительного нагрева плазмы, открытых плазменных ловушках с магнитными пробками, диверторных системах токамаков, сильноточных ускорителях ионов газа представляется реальной и эффективной альтернативой традиционным конструктивно-физическим решениям вакуумного тракта.

6.4. МЕМБРАННЫЕ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ НАСОСЫ

Термином *мембранные насосы* охвачена группа электрофизических средств откачки, существенно различных по механизмам поглощения газа. Однако все эти насосы объединяет единый конструктивно-физический признак. Их основным функциональным элементом является мембрана, имеющая асимметричную проницаемость по отношению к откачиваемому газу. Основу этих средств откачки, таким образом, составляют системы газ — металл, для которых "прозрачность" мембраны по определенным частицам газа в направлении откачки соизмерима с единицей и намного выше, чем в обратном направлении. Для придания мембране асимметричной проницаемости могут применяться различные способы.

Перспективны системы на основе палладия и его сплавов по отношению к водороду, находящемуся в атомарном состоянии. Вероятность проникновения падающего атома водорода сквозь палладиевую мембрану составляет 0,1—0,2 и почти не зависит от ее толщины, температуры и давления газа; обратная же проницаемость мембраны по отношению к молекулярному водороду на несколько порядков ниже. Такой результат получен на модели насоса, в котором атомарное состояние достигалось путем термической диссоциации молекулярного водорода на нака-

ленной металлической нити; быстрота действия насоса составляла $(2 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Аналогичные опыты проведены с использованием высокочастотной диссоциации водорода при температуре мембраны 300—1000 К. Эффект активации существен здесь лишь при температурах, близких к комнатной: при $T = 1000 \text{ К}$ он не обнаружен.

Сходные эксперименты выполнены с системой дейтерий—никель. Измерения проводились в температурном диапазоне 300—1000 К. Мембрана толщиной 20 мкм предварительно окислялась на воздухе при $T = 1000 \text{ К}$. Окисленный слой затем частично восстанавливался в среде чистого водорода при давлении 10^2 Па и температуре 1100 К так, чтобы на поверхности оставался очень тонкий, близкий к моноатомному слой оксидов. Пучок тепловых атомов дейтерия (степень атомизации в пучке $0,6 \pm 0,3$) истекал из зоны безэлектродного высокочастотного разряда; плотность потока в пучке изменялась от $2,5 \cdot 10^{11}$ до $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В высокотемпературной области вероятность проникновения атомов водорода сквозь мембрану близка к 0,18 и не зависит от ее температуры; атомарное состояние сохраняется примерно при десяти отражениях частицы от поверхности. Мембрана, находящаяся при температуре свыше 700 К, эквивалентна насосу с удельной быстротой действия $100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при давлении 10^{-5} Па ; "коэффициент компрессии" такого насоса близок к 10^7 . При снижении температуры и увеличении плотности пучка вероятность проникновения резко падает.

Асимметричную проницаемость предложено формировать также ионной бомбардировкой мембраны. Расчетная модель такого устройства, названного *твердотельным диффузионным насосом*, дает примерно трехкратное соотношение прямого и обратного газовых потоков. Это соотношение не зависит от давления, что позволяет в принципе осуществлять высоковакуумную откачку газа. Данных об экспериментальной проверке такого предложения нет.

К этому же направлению примыкают работы по формированию на поверхности мембраны тонких, термически устойчивых оксидных пленок, препятствующих реэмиссии внедренного газа.

Продолжается технологическое совершенствование палладиевых насосов, в которых асимметрия прямого и обратного потоков откачиваемого водорода создается окислением диффундирующего сквозь мембрану газа на стороне высокого давления. Образующиеся водяные пары не оказывают никакого влияния на палладий. Вакуумный агрегат такого типа содержит тонкую гофрированную мембрану из палладиевого сплава, устройство для ее нагрева, натекаТЕЛЬ для регулируемого напуска кислорода в форвакуумную камеру, ловушку, охлаждаемую жидким азотом, и форвакуумный насос. Наилучшие результаты получены для сплава палладий (76%) — серебро. Быстрота действия агрегата по водороду, отнесенная к единице площади входного сечения, при толщине мембраны 0,1 мм и давлении водорода 10^{-3} Па состав-

ляет $70\text{--}150 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Это выше аналогичной удельной быстроты действия диффузионных, турбомолекулярных и магнитоэрозийных насосов. Оптимальная температура мембраны – около 600 К.

При утонении мембраны до 20 мкм и тщательной очистке сплава от примесных атомов, главным образом углерода, получен еще более высокий результат – до $300 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Напускаемый на сторону высокого давления поток кислорода должен быть слегка избыточен по отношению к диффундирующему потоку водорода. Особо важно то обстоятельство, что однажды очищенная мембрана сохраняет свои свойства при последующей эксплуатации даже в условиях “углеводородного” вакуума. Образующийся при распаде углеводородных молекул углерод, растворяясь в металле, диффундирует к выходной стороне мембраны и там окисляется. Водяные пары, азот и оксид углерода в температурном интервале 400–1000 К с палладием не взаимодействуют.

Сходный принцип положен в основу устройства для непрерывной откачки кислорода. Устройство выполнено в виде замкнутой трубчатой системы из ниобия, во внутренней полости которой для непрерывного поглощения кислорода прокачивается литий или другой щелочной металл.

Другим нетрадиционным методом высоковакуумной откачки является каталитическое окисление водорода (*каталитические насосы*). В центральной части модели каталитического насоса установлены накаливаемые сетки из ренийевой или иридиевой проволоки общей площадью 460 см^2 . Сетки окружены экранами, покрытыми слоем закиси меди. Площадь экранов $1,23 \text{ м}^2$, их температура 530 К. Рядом с экранами размещена ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Молекулы водорода с вероятностью около 0,4 диссоциируют на накаливаемых сетках. Образующийся атомарный водород с высокой скоростью восстанавливает закись меди. Выделяющиеся в процессе этой реакции водяные пары конденсируются на охлажденных поверхностях ловушки. Быстрота действия насоса – около $6 \text{ м}^3/\text{с}$, потребляемая мощность – свыше 13 кВт. Применение дорогостоящего рения или иридия связано с возможностью отравления обычно используемого вольфрама азотом и оксидом углерода. Кроме того, на скорость термической диссоциации водорода на вольфраме сильно влияет кислород.

Наибольший интерес мембранная технология откачки представляет пока для исследований в области управляемого термоядерного синтеза. Это объясняется, во-первых, исключительным значением тяжелых изотопов водорода как топлива термоядерных реакторов и, во-вторых, естественным выполнением во многих плазменных установках условий, необходимых для формирования асимметрично проницаемых мембран: плазменный шнур окружен сильно неравновесным, частично ионизованным водородом, находящимся в атомарном состоянии.

Ориентация на установки управляемого термоядерного синтеза заставляет, однако, учитывать и лимитирующие факторы, прежде всего

ионную эрозию мембран. Скорость эрозии палладия в интервале энергий падающих ионов 5–25 кэВ при $T = 300 \text{ К}$ оценивается коэффициентами распыления 0,6 (для ионов H^+) и 1,0 атом/ион (для ионов He^+). При нагреве скорость распыления возрастает, особенно при температурах свыше 1000 К. Это более чем на 2 порядка превосходит значения, приемлемые для конструкционных материалов термоядерных реакторов. Из-за столь интенсивной ионной эрозии чистый палладий как материал мембран, испытывающих непосредственное воздействие горячей плазмы и ионных пучков, неприменим. Для практического воплощения мембранной технологии необходимы поиски материалов и композиций, сохраняющих свойства асимметричной проницаемости и обладающих одновременно существенно большей эрозионной стойкостью в сравнении с палладием. Весьма перспективными в этом отношении кажутся биметаллические и многослойные материалы.

Сделаем качественные оценки, обобщающие содержание двух последних параграфов.

Для создания имплантационных насосов и формирования структур с асимметричной проницаемостью необходимо, чтобы свойства поверхностного слоя с обеих сторон мембраны (приемной пластины) для частиц газа, падающих на эти слои извне и изнутри (со стороны металлической матрицы), были различны. “Входной” будем называть сторону мембраны, граничащую с откачиваемыми частицами. В идеальном случае поверхностный слой входной стороны должен быть абсолютно прозрачен для внешних, т.е. падающих на поверхность, частиц газа и полностью непроницаем для атомов, диффундирующих из толщи металла (матрицы). Поверхностный слой с “выходной” стороны мембраны должен обладать противоположными свойствами.

Упрощая реальную физическую модель процесса и интерпретируя для наглядности переход частицы сквозь поверхностные слои с каждой из сторон мембраны как преодоление некоторого энергетического барьера ϵ , рассматриваемую систему можно охарактеризовать следующими параметрами:

$\epsilon_{\text{вх}}$ – энергетический барьер, который должна преодолеть налетающая с входной стороны частица, чтобы пройти сквозь входной поверхностный слой и оказаться в металлической матрице;

$\epsilon_{\text{вх}}$ – энергетический барьер, который должна преодолеть частица, находящаяся в пределах матрицы, чтобы пройти сквозь входной поверхностный слой и оказаться в свободном пространстве;

$\epsilon_{\text{вых}}$ – энергетический барьер, который должна преодолеть налетающая с выходной стороны мембраны частица, чтобы пройти сквозь выходной поверхностный слой и оказаться в матрице;

$\epsilon_{\text{вых}}$ – энергетический барьер, который должна преодолеть частица, находящаяся в пределах матрицы, чтобы пройти сквозь выходной поверхностный слой и оказаться в свободном пространстве;

$E_{0вх}$, E и $E_{0вых}$ — кинетические энергии частиц, находящихся соответственно в свободном пространстве с входной стороны мембраны, в матрице и в свободном пространстве с выходной стороны

Модель поведения частицы при ее взаимодействии с мембраной будет описываться вероятностной комбинацией параметров. Проанализируем наиболее интересные из возможных комбинаций в их связи с имплантационными и мембранными насосами. Очевидно, что предпочтительным в анализируемом аспекте было бы следующее соотношение параметров:

$$E_{0вх} > \epsilon_{0вх}; \epsilon_{вх} \rightarrow \infty; \epsilon_{вых} \rightarrow 0; \epsilon_{0вых} \rightarrow \infty. \quad (6.7)$$

Для реально рассматриваемых систем частица газа — мембрана требуются асимметричной проницаемости соответствуют комбинации

$$E_{0вх} > \epsilon_{0вх}; \epsilon_{вх} > E; E > \epsilon_{вых}; \epsilon_{0вых} > E_{0вых}; \quad (6.8a)$$

$$E_{0вх} > \epsilon_{0вх}; \epsilon_{вх} > E; E \approx \epsilon_{вых}; \epsilon_{0вых} \approx E_{0вых}; \quad (6.8б)$$

$$E_{0вх} > \epsilon_{0вх}; \epsilon_{вх} > E; E < \epsilon_{вых}. \quad (6.8в)$$

Комбинации (6.8a) и (6.8б) соответствуют непрерывному переносу газа сквозь мембрану, идущему, правда, с разными скоростями: соотношению (6.8б) отвечает замедленный перенос. Эти комбинации реализуются в описанных выше мембранных насосах. Комбинация (6.8в) справедлива для накопления газа в матрице (имплантационные насосы). Процессу классической диффузии газа в мембране соответствует комбинация

$$E_{0вх} \geq \epsilon_{0вх}; \epsilon_{вх} \approx E; E \geq \epsilon_{вых}; E_{0вых} \approx \epsilon_{0вых}. \quad (6.9)$$

Соотношение

$$E_{0вх} < \epsilon_{0вх} \quad (6.10)$$

отвечает отражению падающих на мембрану молекул.

Как видно из приведенных соотношений, необходимую направленность потоку частиц, падающему на мембрану, можно придавать вариациями обеих групп параметров E и ϵ . В первом варианте управляющим фактором является кинетическая энергия частиц газа в свободном пространстве; во втором — состояние поверхностных слоев мембраны. Возможны, естественно, и одновременные вариации параметров из обеих групп.

Начнем рассмотрение с параметров $E_{0вх}$ и $\epsilon_{0вх}$. Необходимое условие прозрачности входного поверхностного слоя для налетающих частиц $E_{0вх} > \epsilon_{0вх}$ может быть реализовано как увеличением $E_{0вх}$ при $\epsilon_{0вх} \approx \text{const}$, так и уменьшением $\epsilon_{0вх}$ при $E_{0вх} \approx \text{const}$; степень прозрачности поверхностного слоя тем больше, чем значительнее разница между $E_{0вх}$ и $\epsilon_{0вх}$. Энергетический барьер $\epsilon_{0вх}$ здесь можно рассматривать как эквивалент температуры мембраны T .

Первый из этих способов реализуется "искусственно" в имплантационных насосах и "естественно" в плазменных установках. В имплантационных насосах падающие на приемник ионы ускорены электрическим полем до эквивалентных температур T_i , превышающих 10^7 К (порядка 10^3 эВ), так что $T_i/T \approx 2 \cdot 10^4$ и выше. В токамаках для большей части периферийной плазмы $T_i \approx 10^2$ эВ, так что $T_i/T \approx 3 \cdot 10^3$ и выше.

Типичным примером реализации второго способа — уменьшения $\epsilon_{0вх}$ — является атомизация молекул до их падения на поверхность мембраны. Это эквивалентно уменьшению энергетического барьера $\epsilon_{0вх}$ на величину, равную энергии диссоциации молекулы.

При некоторых условиях асимметрия перехода молекул сквозь входной поверхностный слой возникает как прямое следствие физических закономерностей адсорбционного взаимодействия даже при равновесных условиях на входной стороне мембраны. Рассмотрим, к примеру, цепочку адсорбционно-диффузионных взаимодействий молекулярного водорода с чистой металлической поверхностью; температуры газа и мембраны будем полагать одинаковыми. Как отмечалось в § 1.1, коэффициент прилипания водорода на атомно чистых поверхностях по порядку близок к 1; адсорбция носит диссоциативный характер. Следовательно, при достаточно низких давлениях остаточного газа вероятность диссоциативного захвата падающей молекулы водорода, миграции образовавшихся атомов по поверхности и их последующей диффузии в матрицу также соизмерима с 1. В рамках принятой модели энергетических барьеров это соответствует малости $\epsilon_{0вх}$. В то же время при температурах менее 1200–1300 К водород десорбируется преимущественно в виде молекул. При малых концентрациях атомов вероятность ассоциативной десорбции водорода как результата встречи двух водородных атомов на поверхности также крайне мала. Это эквивалентно высоким значениям $\epsilon_{вх}$.

Экспериментальные данные подтверждают подобную модельную интерпретацию. Мембраны из палладия толщиной 20 мкм при давлении менее 10^{-4} Па и температуре выше 820 К оказываются проницаемыми примерно для шести молекул водорода из каждых десяти, падающих на поверхность, причем это соотношение не зависит от температуры. Для других металлов переходной группы, например никеля, экстремально высокая проницаемость по равновесному газу достигается лишь в области сверхнизких давлений, не представляющей практического интереса.

Вторую пару параметров (E и $\epsilon_{вх}$) необходимо подчинить соотношению $\epsilon_{вх}/E > 1$. Поскольку имплантированный водород находится в термическом равновесии с матрицей, какие-либо тепловые процедуры здесь бесполезны. Об одном из возможных способов уже говорилось в предыдущем параграфе. Это нанесение на поверхность матрицы тонкой пленки металла с очень малой диффузионной подвижностью водорода.

Другой возможный способ – естественная или целенаправленная пассивация поверхности.

Пассивация связана не только с упоминавшимся ранее окислением мембраны при взаимодействии с кислородом. Пассивированные поверхности могут образовываться даже в сверхвысоком вакууме в результате термической сегрегации примесных неметаллических атомов – углерода, серы, фосфора, кислорода и др. Такой процесс идет по следующей схеме. После ионной очистки в разряде поверхность металлического образца становится атомно чистой и приобретает чрезвычайно высокую химическую активность. Прогрев приводит к диффузионному переносу растворенных атомов углерода, других неметаллов из толщи образца на поверхность, где они переходят в хемосорбированное состояние. Такой процесс может оказаться энергетически предпочтительным. Поэтому при очень малых объемных концентрациях примесных атомов – вплоть до 10^{-8} – на поверхности могут устойчиво существовать даже их монослои.

В условиях высокого и среднего вакуума ($p = 10^{-5} \div 10^{-2}$ Па) эффективное и быстрое пассивирование может вызываться химическим связыванием поверхностью активных газов остаточной среды или специально напускаемыми смесями. Интересна следующая экспериментальная иллюстрация такой возможности: даже в условиях непрерывного распыления поверхности падающим ионным пучком для поддержания стойкой пассивации ниобия при температуре выше 600 К достаточно парциального давления кислорода либо сероводорода порядка 10^{-4} Па.

Естественная пассивация в вакууме ниобия и других металлов с высокой химической активностью позволяет создавать средства откачки термализованных атомов водорода и одновременно пучков бомбардирующих поверхность ионов водорода. Экспериментально показано, в частности, что мембраны из ниобия в интервале температур 700–1600 К с вероятностью 0,1–0,6 стационарно проницаемы для атомарных ионов дейтерия с энергией от 30 до $7 \cdot 10^3$ эВ при плотности падающего ионного потока до $3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ · с $^{-1}$; давление в вакуумной системе при этом поддерживалось на уровне 10^{-5} Па. Напуск кислорода или сероводорода с парциальным давлением около 10^{-4} Па увеличивает вероятность проникновения ионов почти до 1. Вероятность стационарного захвата сопутствующих термализованных потоков атомарного дейтерия составляет 0,1–0,2; в некоторых экспериментах она приближается к единице.

Оптимальное соотношение для третьей пары параметров $E > \epsilon_{\text{вых}}$. Наиболее интересной иллюстрацией соответствующего асимметричного перехода водорода сквозь мембрану служат описанные выше палладиевые насосы, в которых диффундирующий водород на выходной стороне мембраны окисляют. В рамках барьерной модели это эквивалентно уменьшению $\epsilon_{\text{вых}}$. Аналогичных результатов, но в еще более широких

интервалах давлений и температур можно ожидать, по-видимому, при использовании мембран из ванадия, ниобия и тантала.

Радиационный метод асимметризации газопроницаемости, составляющий физическую основу твердотельного диффузионного насоса, в рамках барьерной модели соответствует одновременно увеличению $\epsilon_{\text{вх}}$ и снижению $\epsilon_{\text{вых}}$.

Подчеркнем, что перечисленные способы управляемого изменения относительного энергетического состояния частиц водорода и поверхностных слоев не сказываются, как правило, на свойствах мембран по отношению к равновесному молекулярному водороду. Остаются справедливыми известные физико-химические закономерности диффузионного переноса и процессов растворения водорода, сохраняется очень низкая водородопроницаемость подавляющего большинства металлов и т.п.

Опыт создания нетрадиционных высоковакуумных насосов еще слишком мал, чтобы делать уверенные выводы об их перспективности и возможных масштабах использования. Тем не менее уже можно утверждать, что ведущиеся в этом направлении исследования окажут заметное влияние на дальнейшее развитие электрофизических средств откачки.

* * *

Анализ достигнутого уровня и направленности исследований позволяет дать следующий прогноз путей дальнейшего развития электрофизических насосов и систем откачки на их основе:

переход на модульное построение ЭФН и блоков откачки, допускающее их агрегатирование;

расширение числа модификаций и масштабов использования комбинированных ИГН;

промышленное освоение испарительных насосов с плазменными источниками геттерных пленок, в особенности для высокопроизводительной откачки вакуумного технологического оборудования в интервале давлений $10^{-5} - 10^{-3}$ Па;

технологическая оптимизация и промышленное освоение автономных и встроенных средств высоковакуумной откачки на основе нераспыляемых геттеров;

создание специализированных испарительных ГН и ИГН на основе геттерных материалов с улучшенными сорбционными характеристиками;

расширение масштабов использования высоковакуумных устройств и установок с интегрированным вакуумным трактом;

создание опытно-промышленных образцов имплантационных насосов и средств вакуумирования на основе мембран с асимметричной газо-

проницаемостью, в особенности при откачке неравновесных газовых сред;

увеличение коэффициента использования геттера и срока службы резистивных испарителей прямого и косвенного нагрева путем создания лучших по теплофизическим и термомеханическим критериям конструкций, эффективного контроля температуры и автоматизированного регулирования либо стабилизации скорости испарения геттерного вещества;

повышение быстроты действия по инертным газам, ресурса и улучшение удельных характеристик магнитоэрозийных насосов путем использования новых магнитных и катодных материалов, дифференциальных катодов, совмещения корпуса с магнитопроводом, интенсификации разряда и применения электродных систем с оптимизированной геометрией;

улучшение технико-экономических, массогабаритных и эксплуатационных характеристик ЭФН и систем откачки на их основе путем технологической, энергетической и структурно-геометрической оптимизации и введения гибкого микропроцессорного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кo всей книге

- Вакуумная техника/ Под ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1985.
- Грошковский Я. Техника высокого вакуума: Пер. с польск. М.: Мир, 1975.
- Дэшман С. Научные основы вакуумной техники: Пер. с англ. М.: Мир, 1964.
- Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы. М.: Машиностроение, 1977.
- Саксаганский Г.Л. Испарительные геттерные и ионно-геттерные насосы: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1988.
- Саксаганский Г.Л. Источники возобновляемых геттерных пленок: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1988.
- Саксаганский Г.Л. Современные турбомолекулярные и электрофизические насосы: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1981.
- Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении/ Г.Л. Саксаганский, Ю.Н. Котельников, М.Д. Малев, Г.В. Смирницкая, В.Б. Юферов; Под ред. Г.Л. Саксаганского. М.: Атомиздат, 1976.
- Тезисы докл. 5-й Всесоюз. конф. "Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума". (Л., 25–26 сентября 1985 г.) М.: КМС ВСНТО, 1985, Ч. I и II.
- Цейтлин А.Б. Современное состояние и перспективы развития вакуумной техники: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1986.
- O'Hanlon J.F. A user's guide to vacuum technology. N. Y.: Wiley Intersci. Publ. 1980.
- Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 25–29 March 1974)// Jap. J. Appl. Phys. Suppl. 2, Part 1. Tokyo, 1974.
- Proc. 7th Intern. Vacuum Congr. and 3rd Intern. Conf. Solid Surfaces. Vienna, 12–16 Sept. 1977. Vienna: G. Berger and Söhne, 1977. Vol. 1.
- Proc. 8th Intern. Vacuum Congr. Cannes, 22–26 Sept. 1980. Supplement a la Revue "Le vide, les couches minces", N 201. Paris, 1980.
- Proc. 9th Intern. Vacuum Congr. and 5th Intern. Conf. Solid Surfaces. Madrid, 26–30 Sept. 1983. Madrid: Inst. de Fisica de Materiales. 1983.

К главе 1

- Бирюкова Н.Е., Виноградов Н.И., Ефимов М.Н. Поглощение азота непрерывно возобновляемой титановой пленкой// Журн. физ. химии. 1970. Т. 44, № 1. С. 145–149.
- Ивановский Г.Ф., Ширяев А.Т., Вилесова Б.А. Сорбция азота и окиси углерода конденсированными пленками титана// Физика и техника сверхвысокого вакуума/ Под ред. Г.Л. Саксаганского. Л.: Машиностроение, 1968. С. 5–10.
- Компаниец Т.Н., Курдюмов А.А., Лясников В.Н. Кинетика проникновения водорода сквозь металлы// Обзоры по электронной технике. Сер. I. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИЭлектроника, 1980. Вып. I (694).

Мартинсон Е.Н., Мызников К.П. Охлаждение сорбционных пленок до низких температур для улучшения характеристик сорбционно-ионных насосов// Вопросы радиоэлектроники. Сер. I. 1961. № 12. С. 83–95.

Edwards D., Lanni Jr. C. Ti getter study// J. Vacuum Sci. and Technol. 1980. Vol. 17, N 6. P. 1373–1376.

Grigorov G.I. Apparent and real values of common gas sticking coefficients on titanium films and application to getter pump devices with periodic active film renovation// Vacuum. 1984. Vol. 34, N 5. P. 513–517.

Grigorov G.I., Tzatzov K.K. Theory of getter pump evaluation. Sticking coefficients of common gases on continuously deposited getter film// Vacuum. 1983. Vol. 33, N 3. P. 139–148.

Harra D.J. Predicting and evaluating titanium sublimation pump performance// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 41–44.

Kuznetsov M.V., Nasarov A.S., Ivanovsky G.F. New developments in getter ion pumps in the USSR// J. Vacuum Sci. and Technol. 1969. Vol. 6, N 1. P. 34–38.

Malev M.D. Gas adsorption and outgassing of metals// Vacuum. 1973. Vol. 23, N 2. P. 43–47.

Nagasaka M., Yamashina T. Gettering rates of hydrogen and deuterium by titanium and zirconium at elevated temperature// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 61–64.

Prevot F., Sledziewski Z. Production d'ultra-vide par depot de titane sur surface froide// Vide. 1968. Vol. 23, N 133. P. 1–14.

К главе 2

Глазков А.А., Саксаганский Г.Л. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Гуревич Л.С., Саксаганский Г.Л. Применение зональных методов для анализа молекулярных потоков в системах с сорбирующими стенками// Электрофизическая аппаратура. М.: Атомиздат. 1974. Вып. 12. С. 113–117.

Гришин В.К., Савельев А.Д. Массообмен в вакуумной системе камера – объект – откачное устройство// Инж.-физ. журн. 1974. Т 26, № 1. С. 35–38.

Ершов Б.Д., Саксаганский Г.Л. Интегрально-кинетический метод анализа молекулярных потоков. III. Поток в структурах неограниченной геометрической сложности// Журн. техн. физ. 1979. Т. 49. С. 1814–1817.

Любитов Ю.Н. Расчет взаимодействия молекулярных потоков с ограждающими их сосудами. М.: Наука, 1964.

Павлов А.А. Проводимость сферических ловушек и коротких трубопроводов с экраном при молекулярном режиме течения газа// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. М.: ЦНИИатоминформ, 1984. Вып. 1 (26). С. 36–38.

Саксаганский Г.Л. Графоаналитический метод оценки эффективности сорбирующих геометрий конечной проводимости// Инж.-физ. журн. 1972. Т. 23, № 4, С. 743–747.

Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980.

Саксаганский Г.Л. Структурно-параметрический анализ вакуумных насосов поверхностного действия. I. Принципы, основные критерии и характеристики// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Харьков: ХФТИ, 1978. Вып. 4(4). С. 3–12.

Chubb J.N. Monte Carlo studies of free molecular gas flow through various vacuum structures. Preprint CLM-P172. U.K.A.E.A., 1968.

Giorgi T.A., Pisani G. On the concept of "pumping speed" in gettered and cryopumped systems// Vacuum. 1966. Vol. 16, N 12. P. 669–673.

Harra D.J. Predicting and evaluating titanium sublimation pump performance// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 41–44.

Hůlek Z., Drska L., Kral J. Monte Carlo calculations of getter pumps// Vacuum. 1967. Vol. 17, N 11. P. 593–597.

Pisani C. Problems of gas kinetics in systems with adsorbing walls// Vacuum. 1968. Vol. 18, N 6. P. 327–332.

Steckelmacher W. A review of the molecular flow conductance for system of tubes and components and the measurement of pumping speed// Vacuum. 1966. Vol. 16, N 11. P. 561–584.

К главе 3

Варнакова Р.Г., Гринченко В.Т., Ивановский Г.Ф. Миниатюрные геттерно-ионные насосы для ЭВИ// Электронная промышленность. 1984. Вып. 7 (135). С. 13–15.

Гродштейн А.Е., Назаров И.Д. Поглощение ионов инертных газов твердыми телами и их десорбция// Обзоры по электронной технике. Сер. Газоразрядные приборы. М.: Ин-т "Электроника", 1968. Вып. 64. С. 16–21.

Гуревич Л.С., Саксаганский Г.Л., Сорокин А.Г. Серия сверхвысоковакуумных геттерных насосов типа НИБ// Приборы и техника эксперимента. 1980. № 2. С. 230–231.

Кузьмин А.А., Жилин В.С., Меньшиков М.И. Сверхвысоковакуумный сорбционный титановый агрегат// Приборы и техника эксперимента. 1968. № 5. С. 166–168.

Halama H.J. Behavior of titanium sublimation and sputter-ion pumps in the 10^{-11} Torr range// J. Vacuum Sci. and Technol. 1977. Vol. 14, N 1. P. 524–528.

Hora H., Schwarz H. Theory of the quadrupole ion pump// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 69–72.

Kuznetsov M.V., Nasarov A.S., Ivanovsky G.F. New developments in getter ion pumps in the USSR// J. Vacuum Sci. and Technol. 1969. Vol. 6, N 1. P. 34–38.

Pramod K., Naik S.L., Verma A. New modified orbitron pump// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 73–76.

Prevot F., Sledziewski Z. The titanium evaporation pump, its application to nuclear fusion experiments and space simulation// J. Vacuum Sci. and Technol. 1972. Vol. 9, N 1. P. 49–52.

Robertson D.D. Evaluation of a high rate titanium getter pump// Vacuum. 1968. Vol. 18, N 3. P. 138–142.

Schwarz H. Geometry and properties of the plasma in a quadrupole ion pump// J. Vacuum Sci. and Technol. 1977. Vol. 14, N 2. P. 731–734.

Slowko W., Kudzia J. An evaporation rate meter for use in the control of Ti sublimation pumps// Vacuum. 1984. Vol. 34, N 7. P. 699–703.

К главе 4

Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. М.: ЦНИИатоминформ, 1984.

Аксенов И.И., Хороших В.М. Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге: Обзор. М.: ЦНИИатоминформ, 1984.

Бендер Е.Д., Кузнецов Г.Ф., Савкин В.Я. Малогабаритный геттерный насос с дуговым испарителем титана// Приборы и техника эксперимента. 1987. № 2. С. 144–146.

Вакуумные дуги/ Под ред. Дж. Лафферти: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.

Дороднов А.М., Минайчев В.Е., Блинов И.Г. и др. Вакуумные сильнооточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники. Ч. I и II// Обзоры по электронной технике. Сер. Микроэлектроника. М.: ЦНИИЭлектроника, 1974. Вып. 7 (268) и 8 (269).

Дороднов А.М., Минайчев В.Е., Мирошкин С.И. Высоковакуумный плазменный насос// Приборы и техника эксперимента. 1980. № 6. С. 126–129.

Дороднов А.М., Мирошкин С.И. Вакуумные эрозионные генераторы и ускорители плазмы на переменном токе// Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18, № 5. С. 1076–1098.

Импульсные искровые сорбционные насосы/ Л.К. Брунеллер, А.П. Горшков, Н.Г. Павловская и др.// Приборы и техника эксперимента. 1968. № 4. С. 156–159.

Карлов Д.А., Саксаганский Г.Л. Плазменные источники геттерных пленок с магнитной стабилизацией// Тезисы докл. 5-й Всесоюз. конф. "Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума". 25–26 сентября 1985 г. М.: КМС ВСНТО, 1985. Ч. 1. С. 23–24.

Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.

Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. I// Журн. техн. физ. 1977. Т. 47, вып. 7. С. 1468–1471.

Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. II// Журн. техн. физ. 1977. Т. 47, вып. 7. С. 1491–1494.

Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги// Успехи физ. наук. 1978. Т. 125. С. 665–669.

Морозов А.И., Шубин А.П. Плазменные ускорители// Итоги науки и техники. Сер. Физ. плазмы. 1984. № 5. С. 178–260.

Саксаганский Г.Л., Карлов Д.А. Вакуумные испарительные насосы с плазменными источниками геттерных пленок/ НИИ электрофизической аппаратуры. Л., 1984. Деп. в ВИНТИ 29.12.84, № 1220-84.

Электродуговой испаритель металлов с магнитным удержанием катодного пятна/ Л.П. Саблев, Ю.И. Долотов, Р.И. Ступак, В.А. Осипов// Приборы и техника эксперимента. 1976. № 4. С. 247–249.

Электродуговой сорбционный высоковакуумный агрегат ВЭД-1/ Л.П. Саблев, Ю.И. Долотов, Е.Г. Гольдинер и др.// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Харьков: ХФТИ, 1973. Вып. 1 (1). С. 21–29.

К главе 5

А.с. 203804 СССР. Циклический ускоритель/ И.Ф. Малышев, Г.Л. Саксаганский// Открытия. Изобретения. 1972. № 12.

А.с. 360900 СССР. Тракт ускорителя прямого действия/ И.Ф. Малышев, Г.Л. Саксаганский// Открытия. Изобретения. 1976. № 19.

А.с. 408610 СССР. Вакуумная система линейного индукционного ускорителя/ А.И. Анацкий, Г.Л. Саксаганский// Открытия. Изобретения. 1976. № 19.

А.с. 514545 СССР. Ускорительная трубка/ Г.Л. Саксаганский// Открытия. Изобретения. 1977. № 21.

Ахманов Ш.А., Галимарданов М.Ш., Островка С.Д. Комбинированные электро-разрядные геттерно-ионные насосы: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1979.

Борисов В.П., Кеменов В.Н., Маклаков А.А. Вакуумная техника в электронной промышленности// Электронная промышленность. 1984. Вып. 7 (135). С. 2–6.

Васильев Г.А. Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970.

Пакулин В.Н., Потехин С.Л., Месеняшин В.И. Тлеющий разряд в магнитном поле и магниторазрядные устройства вакуумного технологического оборудования: Обзор. М.: ЦНИИЭлектроника, 1984. Вып. 10 (1035).

Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Борисенко А.И. Ионный насос с холодными электродами и его характеристики// Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1, № 2. С. 263–266.

Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Курбанова Л.Р. К вопросу об аргонной неустойчивости в разряде ионного насоса// Журн. техн. физ. 1973. Т. 43, вып. 2. С. 341–344.

Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ти. Зависимость тока от параметров в разряде с осциллирующими электронами в магнитном поле// Журн. техн. физ. 1969. Т. 39, вып. 6. С. 1052–1056.

Рудницкий Е.М. Распределение мощности между электродами в разряде Пеннинга// Журн. техн. физ. 1968. Т. 38, вып. 5. С. 830–833.

Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ти. О подобии и оптимальных отношениях в пеннинговском разряде// Журн. техн. физ. 1970. Т. 40, вып. 5. С. 1005–1007.

Смирницкая Г.В., Носырева Н.А. О колебаниях в разряде с осциллирующими электронами// Журн. техн. физ. 1970. Т. 40, вып. 11. С. 2436–2439.

Смирницкая Г.В., Рейхрудель Э.М. Электрический разряд с холодными катодами при низких давлениях в магнитном поле// Журн. техн. физ. 1959. Т. 29, вып. 2. С. 153–157.

Смирницкая Г.В., Рейхрудель Э.М., Егизарян Г.А. Диаграммы состояний разряда с осциллирующими электронами// Журн. техн. физ. 1973. т. 43, вып. 1. С. 130–133.

Andrew D. The evolution of sputter ion pumps// Vacuum. 1968. Vol. 18, N 3. P. 135–138.

Bächler W. Ionen-zerstäuberpumpen mit hohem argon-saugvermögen// Vakuum-Technik. 1968. Bd 17, N 3. S. 59–62.

Brothers C.F. Ion pumping of large amounts of helium// J. Vacuum Sci. and Technol. 1968. Vol. 5, N 6. P. 208–209.

Denison D.R. Comparison of diode and triode sputter-ion pumps// J. Vacuum Sci. and Technol. 1977. Vol. 14, N 1. P. 633–637.

Espe W., Hix P. Zur praxis der verwendung von titan-ionenzerstäuberpumpen bei der fertigung von senderöhren// Feinwerktechnik. 1968. Bd 72, N 9. S. 453–457.

Hall D. Pompes ioniques a getters// Vide. 1968. Vol. 23, N 136. P. 8–16.

Henning H. Der erinnerungeffekt fur argon bei trioden-ionenzerstäuberpumpen// Vakuum-Technik. 1975. Bd 24, N 2. S. 37–42.

Jepsen R.L. Important characteristics of a new type getter-ion pump// Vide. 1959. Vol. 14, N 80. P. 80–86.

Jepsen R.L. On the physics of sputter-ion pumps// Vacuum. 1968. Vol. 18, N 3. P. 137–142.

Malev M.D., Trachtenberg E.M. Built in getter-ion pumps// Vacuum. 1973. Vol. 23, N 11. P. 403–408.

Ryabov V.V., Saksagan'sky G.L. Influence of asymmetry of magnetic and electrical fields on the parameters of sputter-ion pumps// Vacuum. 1972. Vol. 22, N 5. P. 191–193.

Wutz M. Getter-ion pumps of the magnetron type and an attempted interpretation of the discharge mechanism// Vacuum. 1969. Vol. 19, N 1. P. 1–12.

Yokoo K. High speed ion pump with multipactor cathode// Vacuum. 1982. Vol. 32, N 5. P. 472–475.

К главе 6

К § 6.1, 6.2

Базлиев А.К., Пустовойт Ю.М., Столяров В.Л. Работа нераспыляемых геттеров в присутствии водяного пара. Препринт ИАЭ. М., 1982.

Баловнев Ю.А. Диффузия водорода в палладии при низких давлениях// Журн. физ. химии. 1969. Т. 43, № 10. С. 2461–2464.

Попов В.Ф. Нераспыляемые газопоглотители. Л.: Энергия, 1975.

Пустовойт Ю.М., Столяров В.Л. Нераспыляемые геттеры для термоядерных установок// Докл. 2-й Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Л., 23–25 июня 1981) Л.: НИИЭФА, 1982. Т. IV. С. 53–60.

Саксаганский Г.Л. Высоковакуумные средства откачки на основе нераспыляемых пленочных геттеров: Экспресс-информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХим-нефтемаш, 1986.

Саксаганский Г.Л., Серебренников Д.В., Бычкова А.Д. Параметры высоковакуумных насосов при откачке тяжелых изотопов водорода// Докл. 2-й Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Л., 23–25 июня 1981 г.) Л.: НИИЭФА, 1982. Т. IV. С. 3–10.

A non-evaporable low temperature activatable getter material// C. Boffito, B. Ferrario, P. della Porto, L. Rosai// J. Vacuum Sci. and Technol. 1981. Vol. 18, N 3, P. 1117–1120.

A zirconium-cobalt compound as the material for a reversible tritium getter/ T. Nagasaki, S. Konishi, H. Katsuta, Y. Naruse// Fusion Technol. 1986. Vol. 9, N 3, P. 506–509.

Barosi C., Giorgi T.A. A non-evaporable getter for low temperatures// Vacuum. 1973. Vol. 23, N 1. P. 15–19.

Barosi C., Rabusin E. Zirconium-aluminium alloy as a getter for high intensity discharge lamps// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 49–52.

Benvenuti C., Decroux J.-C. A linear pump for conductance limited vacuum systems// Proc. 7th Intern. Vacuum Congr. (Vienna, 1977.) Vienna, 1977. Vol. 1. P. 85–88.

Boffito C., Ferrario B., Martelli D. Equilibrium pressures of H₂ and D₂ for different getter materials and the effect of CO impurities// J. Vacuum Sci. and Technol. 1983. Vol. A 1, N 2. Pt. II. P. 1279–1282.

Borghi M., Ferrario B. Use of non-evaporable getter pumps in experimental fusion reactors// J. Vacuum Sci. and Technol. 1977. Vol. 14, N 1. P. 570–576.

Cecchi J.L., Knize R.J. Gettering in fusion devices// J. Vacuum Sci. and Technol. 1984. Vol. A2, N 2. Pt II. P. 1214–1221.

Dissociative pumping of the alkanes using nonevaporable getters/ L.C. Emerson, R.J. Knize, J.L. Cecchi, O. Auciello// J. Vac. Sci. and Technol. 1986. Vol. A4, N 3, Pt I. P. 297–299.

Emerson L.C., Mioduszewski P.K., Simpkins J.E. Performance of Zr–Al getter pumps under transient load conditions// J. Vacuum Sci. and Technol. 1984. Vol. A2, N 4. P. 1583–1588.

Ferrario B., Doni F., Rosai L. Use of volume getter pumps in particle accelerators// Rep. on mini-symp. on UHV systems in connection with particle accelerators. Stockholm: AFI, 1984. P. 12.

Ferrario B., Figini A., Borghi M. A new generation of porous non-evaporable getters// Vacuum. 1985. Vol. 35, N 1. P. 13–17.

Ferrario B., Rosai L. New types of volume gettering panels for vacuum problems in plasma machines// Proc. 7th Intern. Vacuum Congr. (Vienna, 1977.) Vienna, 1977. Vol. 1. P. 359–362.

Ferrario B., Rosai L., della Porta P. Distributed pumping by non-evaporable getters in particle accelerators// IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1981. Vol. NS-28, N 3. P. 3333–3335.

Giorgi T.A. Getters and gettering// Proc. 6th Intern. Vacuum Congr. (Kyoto, 1974.) Tokyo, 1974. P. 53–60.

Hseuh H.C., Lanni C. Evaluation of Zr–V–Fe getter pump for UHV system// J. Vacuum Sci. and Technol. 1983. Vol. A 1, N 2. P. 1283–1287.

Ichimura K., Inoue N., Watanabe K., Takeuchi T. Absorption and desorption of hydrogen, deuterium and tritium for Zr–V–Fe getter// J. Vacuum Sci. and Technol. 1984. Vol. A 2, N 3. P. 1341–1347.

Knize R.J., Cecchi J.L., Dylla H.F. Measurement of H₂, D₂ solubilities in Zr–Al// J. Vacuum Sci. and Technol. 1982. Vol. 20, N 4. P. 1135–1137.

Lange W.L. Experimental studies of zirconium, aluminium getter pumps// J. Vac. Sci. and Technol. 1977, Vol. 14, N 1. P. 582–585.

Malinowski M.E. Decreases in deuterium pumping by ST707 getter alloy caused by carbon dioxide proceposure// J. Vac. Sci. and Technol. 1985. Vol. A3, N 3, Pt. 1. P. 483–486.

Reinhard H.P. The vacuum systems of LEP// Proc. 1X1C – YICSS. Madrid, 1983. P. 273–282.

Technique for in vacuo passivation of Zr–Al alloy bulk getter/ J.L. Cecchi, P.H. Lamaçhe, H.F. Dylla, R.J. Knize// J. Vac. Sci. and Technol. 1985. Vol. A3, N 3, Pt. 1. P. 487–490.

К § 6.3, 6.4

Вакуумные системы экспериментальных термоядерных установок и реакторов с магнитным удержанием: Обзор ОА-66/ Л.А. Кузнецова, Г.Л. Саксаганский, Д.В. Серебренников, З.В. Ершова. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984.

Воронков О.Г., Зубарев В.Ф. Внедрение ионов водорода в жидкий литий// Докл. 2-й Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. (Л., 23–25 июня 1981.) Л.: НИИЭФА, 1982. Т. IV. С. 217–222.

Глазунов Г.П., Косик Н.А., Юферов В.Б. Об откачке водорода палладием// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Харьков: ХФТИ, 1978. Вып. 4 (4). С. 46–51.

Жидкие металлы в термоядерных реакторах с магнитным удержанием. Препринт ЛАФИ-104/ Б.Г. Карасев, О.А. Лиелаусис, Е.В. Муравьев, А.В. Тананасев. Саласпилс, 1987.

Лившиц А.И. Сверхпроницаемость в системе атомарный водород–никель// Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 3, вып. 12. С. 576–580.

Лившиц А.И., Ноткин М.Е., Пустовойт Ю.М. Поглощение изотопов водорода металлами в неравновесных условиях// Докл. 2-й Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. (Ленинград, 23–25 июня 1981.) Л.: НИИЭФА, 1982. Т. IV. С. 169–175.

Лившиц А.И., Ноткин М.Е., Яковлев С.В., Пустовойт Ю.М. Сверхпроницаемость ниобиевой мембраны по атомам и ионам водорода с энергиями от 2 до 4000 эВ// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1982. Вып. 2 (10). С. 77–79.

Лившиц А.И., Пустовойт Ю.М., Свищев В.С. Сверхгазопроницаемость твердотельных мембран и задачи УТС// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1981. Вып. 2 (8). С. 45–49.

Лившиц А.И., Самарцев А.А. Достижение предельных значений коэффициента прилипания и вероятности проникновения в системе водород–палладиевая перегородка// Журн. техн. физ. 1979. Т. 49. С. 2433–2436.

Муравьев Е.В. Контактные устройства диверторных и лимитерных систем реакторов-токамаков. I. Устройства с жидкометаллической рабочей поверхностью// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1980. Вып. 2 (6). С. 57–64.

Муравьев Е.В. Жидкометаллические устройства для систем контроля примесей и защиты первой стенки в термоядерных реакторах-токамаках// Докл. 3-й Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. (Л., 20-22 июня 1984.) Л.: НИИЭФА, 1984. Т. 4. С. 49-56.

Berkheimer G.D., Buxbaum R.E. Hydrogen pumping with palladium membranes// J. Vacuum Sci. and Technol. 1985. Vol. 3, N 2. P. 412-416.

Carter G., Armour D.G., Funuki U.Z. The solid state diffusion Pump// Vacuum. 1975. Vol. 25, N 7. P. 315-317.

Livshitz A.I., Notkin M.E., Pustovoit Yu.M.e.a. Supermeability of solid membranes and gas evacuation. Pt 1,2// Vacuum. 1979. Vol. 29, N 3. P. 113-116.

Murakami Y. Hydrogen pumping by a new catalytic pump// J. Vacuum. Sci. and Technol. 1973. Vol. 10, N 2. P. 359-364.

Murakami Y., Ohtsuka H. Possibility of palladium alloy membrane pumps for thermonuclear fusion devices// Vacuum. 1978. Vol. 28, N 5. P. 235-238.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Принятые обозначения	6
Используемые сокращения	7
Глава 1. Основные характеристики электрофизических насосов	8
1.1. Принцип действия и классификация электрофизических насосов	8
1.2. Сравнительные характеристики электрофизических насосов различных типов.	12
1.3. Кинетика сорбции газов невозобновляемыми геттерными пленками	20
1.4. Сорбционные характеристики титана и возобновляемых титановых пленок	27
Глава 2. Основы расчета и структурно-геометрической оптимизации электрофизических насосов	35
2.1. Общие принципы расчета и оптимизации насосов поверхностного действия	35
2.2. Математическая модель и система обобщенных критериев структурно-геометрической оптимизации электрофизических насосов	40
2.3. Интегральные характеристики электрофизических средств откачки	48
2.4. Дифференциальные и структурно-геометрические характеристики электрофизических насосов различных модификаций	57
2.5. Алгоритм расчета и оптимизации характеристик электрофизических насосов	78
Глава 3. Испарительные геттерные и ионно-геттерные насосы с термическим напылением геттерных пленок	86
3.1. Конструктивные и эксплуатационные характеристики испарителей	86
3.2. Инженерный расчет испарительных насосов	93
3.3. Испарительные геттерные насосы	107
3.4. Испарительные ионно-геттерные насосы	119
Глава 4. Электрофизические насосы с плазменными источниками геттерных пленок	129
4.1. Физические особенности плазменных источников геттерных пленок	129
4.2. Магнитное управление дуговым разрядом	138
4.3. Конструктивные и эксплуатационные характеристики плазменных источников геттерных пленок	144
4.4. Геттерные и ионно-геттерные насосы с плазменными испарителями	159
Глава 5. Магнитные электроразрядные и комбинированные насосы	174
5.1. Физические процессы в разрядных насосах	174
5.2. Особенности откачки различных газов	182
5.3. Расчет и конструирование разрядных насосов	191
5.4. Промышленные разрядные и комбинированные насосы	201
5.5. Интегрированные вакуумные системы на основе разрядных насосов	222
Глава 6. Альтернативные типы электрофизических насосов	230
6.1. Нераспыляемые ленточные геттеры	230
6.2. Средства откачки на основе нераспыляемых ленточных геттеров	239
6.3. Имплантационные насосы	251
6.4. Мембранные и каталитические насосы	260
Список литературы	269

Научное издание

Саксаганский Георгий Леонидович

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Редактор *Е. В. Сатарова*

Художественные редакторы *А. Т. Кирьянов, Ю. В. Созанская*

Художник переплета *Б. Н. Тумин*

Технический редактор *О. И. Хабарова*

Корректор *С. В. Малышева*

ИБ № 540

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 25.02.88.
Т-09503. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл.
печл. 17,15. Усл.кр.-отт. 17,15. Уч.-изд.л. 18,25. Тираж 2100 экз. Заказ 6357.
Цена 4 р.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография имени А.А. Жданова" Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР. 113054, Москва, М-54, Валовая, 28.