



ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 7

ТЕХНОЛОГИЯ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА
И ОБОРУДОВАНИЕ

Выпуск 10 (1035)

В. Н. Пакулин, С. Л. Потехин, В. И. Месеняшин

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
И МАГНИТОРАЗРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА
ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1984

УДК 621.52.32.11 : 531.788.732

Проанализирована отечественная и зарубежная научно-техническая и патентная литература за 1956—1983 гг., посвященная вопросам разработки магниторазрядных устройств для получения и поддержания вакуума, а также для измерения параметров разреженных газов в установках и системах технологического оборудования. Приведены теоретические и экспериментальные данные по физическим процессам газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Описываются конструктивные схемы приборов.

Ключевые слова: *анод, геттер, испаритель, катод, магнетрон, манометр, насос, преобразователь, разряд, селективность, ячейка.*

Отв. редактор В. Л. АЛЕКСЕЕВ

Министерство электронной промышленности СССР
ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

С е р и я 7 "Технология, организация производства
и оборудование"

Выпуск 10(1035)

В.Н.Пакулин, С.Л.Потехин, В.И.Месенягин

ПЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
И МАГНИТОРАЗРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА
ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

(по материалам отечественной и зарубежной печати
за 1956 - 1983 гг.)

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Введение	2
1.	Параметры разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях	2
	1.1. Основные физические представления и аппроксимации...	3
	1.2. Решение уравнений разряда	7
	1.3. Оптимизация параметров магниторазрядных приборов....	18
	Выводы	23
2.	Насосы на основе разряда в магнитном поле	23
	2.1. Магниторазрядные насосы	24
	2.2. Комбинированные насосы	33
	Выводы	43
3.	Магниторазрядные преобразователи полного давления	44
	3.1. Манометры открытого типа	46
	3.2. Самоочищающиеся манометры	48
	Выводы	54
	Заключение	54
	Литература	56

В В Е Д Е Н И Е

Насосы и манометры, работающие в скрещенных электрическом и магнитном полях [1,2], усложненно применяются в современной вакуумной технике. Их основные особенности - широкий диапазон рабочих давлений (от 0,1 до 10^{-11} Па), простота изготовления и высокая надежность.

Существенными преимуществами насосов являются обеспечение безмасляного вакуума, откачка широкого ряда газов, низкие предельные остаточные давления и малые энергозатраты на единицу скорости откачки. В качестве важного дополнительного достоинства манометров следует выделить непосредственную возможность определения парциальных давлений.

Наряду с этим магниторазрядные приборы недостаточно исследованы как в теоретическом аспекте основных физико-технических вопросов плазмы тлеющего разряда в магнитном поле, так и в конструктивном плане. Например, до сих пор является спорным вопрос о функциональных зависимостях между напряженностью электрического и магнитного полей, геометрией, материалом электродов и распределением объемного заряда в плазме тлеющего разряда - факторами, влияющими на разрядный ток, основной параметр эффективности насосов и манометров.

При эксплуатации магниторазрядных приборов выявляются недостаточная эффективность работы в средах с повышенным содержанием паров углеводородов, малая производительность насосов по инертным газам, эффект "аргоновой нестабильности", высокая удельная масса насосов на единицу производительности, высокие стартовые давления насосов и манометров, недостаточная точность манометров, влияние магнитных полей приборов на работу установки, в которой они используются, и наоборот - влияние магнитных полей оборудования на работу магниторазрядных приборов.

1. ПАРАМЕТРЫ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

В качестве основного положения принимаем, что оценка плотности зарядов в слое, напряженности электрического поля и плотности тока разряда может быть проведена при решении уравнений Пуассона и уравнений непрерывности для случая сильного магнитного поля при учете только азимутальной скорости дрейфа зарядов и аппроксимации эффективных сечений столкновений простыми соотношениями.

I.I. Основные физические представления и аппроксимации

Основные физические представления и теоретические оценки тока разряда в магниторазрядной ячейке изложены в [3]. Возникающие в результате ионизации газа или за счет вторичных процессов на поверхностях электроны под действием электрического и магнитного полей движутся в угловом направлении по трохлоидальным орбитам, одновременно совершая колебания вдоль оси. При столкновениях с молекулами остаточного газа происходит частичная ионизация. Электроны, потерявшие часть своей энергии на ионизацию, начинают двигаться по новым орбитам, пока не попадут на анод. Ток в электрической цепи разряда пропорционален плотности газа. При низком давлении заряд имеет отрицательный знак, столкновения редки и разрядный ток мал. С увеличением давления электронный разряд переходит в обычный тлеющий с характерными для него преэлектродными частями и малым сопротивлением разрядного промежутка.

В самом общем случае для разряда используется цилиндрическая магниторазрядная ячейка, которая представляет собой два соосных цилиндра, укрепленных в осевом магнитном поле между двумя плоскими катодами. Если положительный потенциал подается на наружный цилиндр, а внутренний соединен с катодами, то такая ячейка называется магнетроном. Конструкция, где внутренний цилиндр является анодом, а наружный соединен с катодами, называется инверсным магнетроном, в случае отсутствия внутреннего цилиндра - ячейкой Пеннинга. Конструкция, в которой оба цилиндра электрически соединены между собой и служат анодами, названа миниматронной ячейкой.

Для каждой магниторазрядной ячейки (рис. I) с целью устойчивого поддержания разряда в разрядной области магнитное поле должно быть направлено вдоль одного из ортов прямоугольной системы координат, электрическое поле - вдоль другого орта, а вдоль третьего орта происходит замкнутый дрейф илазмы разряда.

Рассчитаем теперь теоретически при определенных допущениях плотность разряда, напряженность электрического поля и плотность тока в цилиндрической магниторазрядной ячейке.

Плотность заряда электронов в ячейке найдем из уравнений Пуассона и уравнений непрерывности, выражающих условия распределения и сохранения заряда, в предположении, что генерация новых частиц осуществляется лишь за счет неупругих столкновений электронов с молекулами остаточного газа:

$$\operatorname{div} \vec{E} = - \frac{e(n - n_p)}{\epsilon_0} \approx - \frac{en}{\epsilon_0}, \quad (I)$$

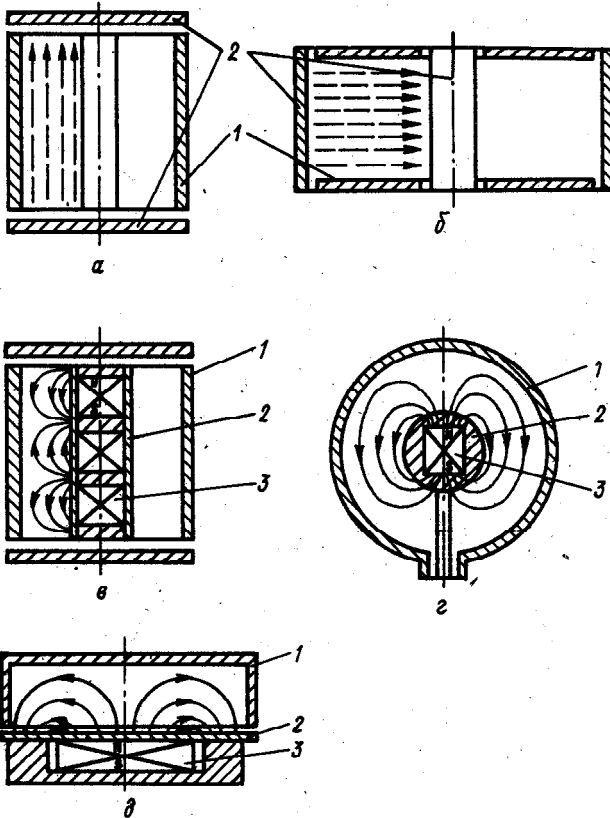


Рис. I. Геометрии магнеторазрядных ячеек

а - цилиндрическая с осевым магнитным полем; б - цилиндрическая с радиальным магнитным полем; в - цилиндрическая с неоднородным магнитным полем; г - сферическая; д - цилиндрическая с плоскими электродами; 1 - анод; 2 - катод; 3 - постоянный магнит

$$\operatorname{div} \vec{j} = \operatorname{div}(en\vec{v}_r) = \operatorname{div}\left(en \frac{m\gamma_{eg}}{eB^2} \vec{E}\right) = \gamma_{eg} en, \quad (2)$$

где E - напряженность электрического поля внутри слоя заряженной плазмы;

n - концентрация электронов в слое;
 e_0 - электрическая постоянная;
 e, m - заряд и масса электрона;
 B - магнитная индукция;
 ν_{i1}, ν_{i2} - частоты столкновений электрона с нейтральными молекулами газа при последующей ионизации и при полной потере направленного импульса соответственно.

Движение электронов, начинающих свой путь в лавине, складывается из двух составляющих: колебаний в радиальном направлении вокруг равновесного радиуса и вращения вокруг оси ячейки. Электрон может столкнуться с молекулой остаточного газа в обоих случаях, причем с разной вероятностью, зависящей от скорости. Однако, если высота трохонды мала по сравнению с ее радиусом, то без большой потери общности можно считать, что все столкновения происходят на равновесном радиусе. Сущность приближенного рассмотрения состоит в том, что мы представляем электроны только вращающимися вокруг оси ячейки и пренебрегаем изменением средней угловой скорости E/B на дуге трохонды. Другими словами, объемный заряд между цилиндрами представляется в виде цилиндрического слоя электронной массы, вращающейся вокруг оси ячейки и отдаленной от катода и анода на ларморовский радиус, т.е. на половину трохонды. Можно также сказать, что мы рассматриваем модель разряда в приближении сильного магнитного поля, когда изменение магнитного поля на расстоянии ларморовского радиуса значительно меньше среднего значения магнитной индукции или ларморовский радиус (амплитуда колебаний электронов по радиусу) значительно меньше радиуса орбиты (равновесного радиуса):

$$r_1 = \frac{mE}{eB} \ll r_1,$$

где r_1 - радиус внутреннего электрода.

Перемещение зарядов по радиусу осуществляется благодаря их столкновениям. В промежутке между столкновениями слой объемного заряда находится в равновесии под действием электрических и магнитных сил, но по отношению к столкновениям устойчивость теряется. На установившиеся частицы магнитная сила не действует, и электроны под влиянием только электрических сил сдвигаются в сторону анода на расстоянии ларморовского радиуса. Далее рассмотрим устойчивый полый ци-

цилиндрический пучок электронов, в котором уход зарядов за счет столкновений компенсируется рождением новых зарядов при этих столкновениях.

Частоты столкновений при ионизации и при полной потере направленного импульса зависят от вида соответствующих эффективных сечений σ_i и σ_{eq} :

$$\nu_{i,eq} = \sigma_{i,eq} n_a \frac{E}{B}, \quad (3)$$

где n_a - плотность нейтральных молекул в газе.

Для получения аналитических решений уравнений (1) и (2) необходимо простыми соотношениями аппроксимировать в (3) зависимость эффективных сечений от скорости частиц. В табл. I приведены выражения для напряженности электрического поля E , плотности заряда ρ и плотности тока j в слое объемного заряда при различных сочетаниях сечений столкновений в однородном магнитном поле ($v = \frac{E}{B}$ - скорость электрона) [3].

Таблица I
Взаимосвязь параметров разряда в однородном магнитном поле

σ_{eq}	σ_i	E	ρ	j
$\sigma_{eq}^0 \frac{V_0^2}{V^2}$	$\sigma_i^0 \frac{V_0^2}{V^2}$	$\frac{\sigma_i^0}{\sigma_{eq}^0} \frac{eB^2}{m} r$	$2\varepsilon_0 \frac{\sigma_i^0}{\sigma_{eq}^0} \frac{eB^2}{m}$	$2\varepsilon_0 \sigma_i^0 v_0^2 n_a B$
$\sigma_{eq}^0 \frac{V_0}{V}$	$\sigma_i^0 \frac{V_0^2}{V^2}$	$\sqrt{\frac{(\sigma_i^0)^2 V_0 e B^2 r}{\sigma_{eq}^0 m}}$	$\frac{3}{2} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{(\sigma_i^0)^2 v_0 e B^2}{\sigma_{eq}^0 m r}}$	$\frac{3}{2} \varepsilon_0 (\sigma_i^0)^2 v_0 n_a B r^{1/2}$
$\sigma_{eq}^0 \frac{V_0}{V}$	$\sigma_i^0 \frac{V_0}{V}$	$\frac{eB^2}{2m} \frac{\nu_i}{\nu_{eq}} r$	$\varepsilon_0 \frac{eB^2}{m} \frac{\nu_i}{\nu_{eq}}$	$\varepsilon_0 \sigma_{eq}^0 \left(\frac{\nu_i}{\nu_{eq}}\right)^2 v_0 n_a \frac{eB^2}{m} r$
$\sigma_{eq}^0 \frac{V_0}{V}$	$\sigma_i^0 \left(\frac{V^2}{V_0^2} - 1\right)$	BV_0	$\varepsilon_0 \frac{BV_0}{r}$	$\varepsilon_0 \sigma_{eq}^0 \frac{m}{e} v_0^3 n_a \frac{1}{r}$
$\sigma_{eq}^0 \frac{V^3}{V_0^3}$	$\sigma_i^0 \frac{V^2}{V_0^2}$	$\sqrt{\frac{eB^3 V_0 \sigma_i^0}{3m \sigma_{eq}^0}} r$	$\frac{3\varepsilon_0}{2e} \sqrt{\frac{eB^3 V_0 \sigma_i^0}{3m \sigma_{eq}^0}} r$	$\varepsilon_0 \frac{(\sigma_i^0)^3 e^2}{m (\sigma_{eq}^0)^2} n_a B^3 r^3$

Анализируя эти данные, можно при разработке практических магниторазрядных приборов выбрать оптимальные значения магнитной индукции, размеров ячейки и анодного напряжения.

Ниже для иллюстрации возможностей применения данного метода проводится расчет параметров ячейки при одной аппроксимации эффективных сечений. В реальных процессах зависимость эффективных сечений (E, B) от скорости частиц является более сложной и должна учитываться при изменении условий разряда. В широкой области скоростей полное

эффективное сечение столкновений при потере направленного импульса имеет обратно пропорциональную зависимость от скорости: $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{eff}}^0 / V_0$, где V_0 - скорость электрона, при которой $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{eff}}^0$. Сечение ионизации можно описать ступенчатой функцией, т.е. принять постоянным после достижения электроном скорости, соответствующей потенциалу ионизации газа.

Можно допустить, что средняя скорость электрона, при которой происходит большинство актов ионизации, равна скорости V_0 , соответствующей максимуму эффективного сечения σ_i . Поэтому в формуле (3) положим $\sigma_i = \sigma_i^0$.

В общем случае магнитное поле неоднородно и значение индукции можно представить как $B = B_0 \left(\frac{x}{x_0}\right)^k$.

Перейдем теперь уравнение (2) в виде

$$\operatorname{div} \frac{n\vec{E}}{B^2} = \frac{\sigma_i^0 e}{\sigma_{\text{eff}}^0 V_0 m} \cdot \frac{nE}{B} \quad (4)$$

и будем решать его далее в декартовых, цилиндрических и сферических координатах с начальными условиями $n(x_0) = n_0$, $E(x_0) = E_0$ в пренебрежении краевыми эффектами.

1.2. Решение уравнений разряда

В декартовых координатах уравнения (1) и (4) запишутся в виде

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{en}{\epsilon_0}; \quad \frac{d\left(\frac{nE}{x^{2k}}\right)}{dx} = \frac{\sigma_i^0 e B_0}{\sigma_{\text{eff}}^0 V_0 m x_0^k} \cdot \frac{nE}{x^{2k} \cdot x^k}$$

Интегрирование второго уравнения дает выражение

$$\frac{nE}{x^{2k}} = \left(\frac{n_0 E_0}{x_0^{2k}}\right) e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0}\right)^{k+1} - 1\right]}, \quad k \neq -1,$$

где для краткости обозначено

$$\alpha = \frac{e B_0 \sigma_i^0 x_0}{m V_0 \sigma_{\text{eff}}^0 (k+1)}$$

Заметим, что α пропорционально отношению ширины прикладной области к ларморовскому радиусу электрона.

Выражая отсюда n и подставляя в уравнение Пуассона, получим

$$E \frac{dE}{dx} = \frac{e}{\varepsilon_0} \left(\frac{n_0 E_0}{x_0^{2k}} \right) x^{2k} e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0} \right)^{k+1} - 1 \right]}.$$

Интегрируя, получим

$$E^2 - E_0^2 = - \frac{2e}{\varepsilon_0} \left(\frac{n_0 E_0}{x_0^{2k}} \right) \frac{x_0^{2k+1} e^{-\alpha}}{\alpha^{\frac{2k+1}{k+1}} (k+1)} \int_0^{\frac{x}{x_0}} y^{\frac{k}{k+1}} e^y dy,$$

где

$$\alpha \left(\frac{x}{x_0} \right)^{k+1} = y.$$

Для $k=0$ (однородное поле) это дает

$$\frac{E}{E_0} = \left\{ 1 - \frac{2en_0 x_0}{\varepsilon_0 \alpha E_0} \left[e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0} \right) - 1 \right]} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad E_0 < 0. \quad (5)$$

Относительная плотность электронов

$$\frac{n}{n_0} = \frac{e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0} \right) - 1 \right]}}{\left\{ 1 - \frac{2en_0 x_0}{\varepsilon_0 \alpha E_0} \left[e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0} \right) - 1 \right]} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Плотность тока на аноде, обусловленного классической поперечной диффузией, запишем в виде

$$j = en \frac{m_0 \gamma_{eq}}{eB^2} E = \frac{n_0 E_0 \gamma_{eq} m_0}{B^2} e^{-\alpha \left[\left(\frac{x}{x_0} \right) - 1 \right]}. \quad (7)$$

Из рис.2 следует, что весь разрядный промежуток состоит из трех зон: прикатодной зоны с малой напряженностью электрического поля ($0 \dots x_0$), зоны объемного заряда с экспоненциальным возрастанием напряженности поля E , плотности заряда n и плотности тока электронов к аноду $j(x_0 \dots x)$ и прианодной зоны, где плотность n мала, а напряженность поля E и плотность тока j сохраняют те же значе-

ния, которые они имеют на прикатодной границе зоны объемного заряда. Вид кривых $E(x)$, $n(x)$, $j(x)$ определяется значением магнитной индукции, а границы зон - значением анодного напряжения.

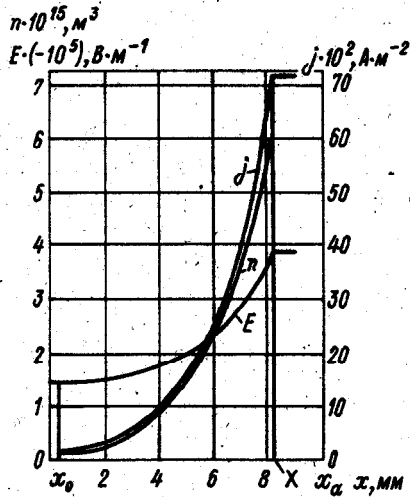


Рис.2. Расчетные значения E , n и j в магниторазрядной ячейке с радиальным магнитным полем

Из анализа формул и рисунка ясно, что большие значения тока на анод можно обеспечить при условии $(eB_0/mv_0)^2 \ll x_0 \ll x$, т.е. малости ларморовского радиуса по сравнению с шириной прикатодной зоны и малости прикатодной зоны по сравнению с шириной зоны объемного заряда.

В цилиндрических координатах, с учетом неоднородности магнитного поля, $B = B_0 \frac{r^k}{r_0^k}$, и вышеуказанных приближений, уравнение (2) пишется в виде

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{rnE}{r^{2k}} \right) = + \left(\frac{e\sigma_i^\circ B_0}{mv_0 r_0^k \sigma_{eg}^\circ} \right) \frac{rnE}{r^{2k}} r^k;$$

где r_0 - радиус катодной границы плазменного слоя. В правой части знак (+) берется для расчета магнетрона, а (-) - для инверсного магнетрона.

Последнее уравнение интегрируется с начальными условиями

$$n(r_0) = n_0, \quad E(r_0) = E_0$$

$$\frac{nE}{r^{2k-1}} = \left(\frac{n_0 E_0}{r_0^{2k-1}} \right) e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})},$$

где для сокращения обозначено

$$a = \pm \frac{e B_0 \beta_i^0}{m v_0 r_0^k \beta_{eg}^0},$$

а $k \neq 1$.

Выражая отсюда n и подставляя в уравнение Пуассона (I), получим

$$\frac{d}{dr} (rE)^2 = - \frac{2e}{\epsilon_0} \left(\frac{n_0 E_0}{r_0^{2k-1}} \right) r^{2k+1} e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})}.$$

Отсюда находим интегрированием

$$(rE)^2 - (r_0 E_0)^2 = - \frac{2e (n_0 E_0)}{\epsilon_0} \frac{r_0^{k+1}}{a^2} \left[\left(\frac{a}{k+1} r^{k+1} - 1 \right) e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})} - \left(\frac{a}{k+1} r_0^{k+1} - 1 \right) \right].$$

Окончательно получаем следующие выражения для напряженности электрического поля и плотности зарядов в слое отрицательного объемного заряда:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{2e (k+1) n_0}{\epsilon_0 a^2 r_0^{2k+1} E_0} \left[\left(\frac{a}{k+1} r^{k+1} - 1 \right) e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})} - \left(\frac{a}{k+1} r_0^{k+1} - 1 \right) \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{r^{2k}}{r_0^{2k}} \frac{e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})}}{\left\{ 1 - \frac{2e (k+1) n_0}{\epsilon_0 a^2 r_0^{2k+1} E_0} \left[\left(\frac{a}{k+1} r^{k+1} - 1 \right) e^{\frac{a}{k+1} (r^{k+1} - r_0^{k+1})} - \left(\frac{a}{k+1} r_0^{k+1} - 1 \right) \right] \right\}^{1/2}}.$$

Здесь E_0 и n_0 - значения параметров на катодной границе слоя.

Для $K = -1$ интегрирование уравнений Пуассона и непрерывности дает следующие выражения для относительных напряженности электрического поля и плотности объемного заряда (условие $a \neq -2$):

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{en_0}{\varepsilon_0(a-2)r_0 E_0} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-2} - 1 \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-2}}{\left\{ 1 - \frac{en_0}{\varepsilon_0(a-2)r_0 E_0} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-2} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

Плотность радиального тока j , обусловленного классической поперечной диффузией, запишем в виде ($K \neq -1$):

$$j = en \frac{m \nu_{eg}}{e B_0^2} E = \frac{m \nu_0 n_0 E_0 \sigma_{eg}^0}{B_0^2} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{K+1} n_0 e^{\frac{a r_0^{K+1} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{K+1} - 1 \right]}{K+1}} \quad (8)$$

Для $K = -1$

$$j = \frac{m \nu_0 n_0 E_0 \sigma_{eg}^0 n_0 a}{B_0^2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-1}$$

В качестве примера применения этих формул разберем три случая.

I. Однородное магнитное поле: $K = 0$.

В этом случае формулы (5), (6), (7) примут вид:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{2en_0}{\varepsilon_0 a^2 r_0 E_0} \left[(ar-1)e^{a(r-r_0)} - (ar_0-1) \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{e^{a(r-r_0)}}{\left\{ 1 - \frac{2en_0}{\varepsilon_0 a^2 r_0 E_0} \left[(ar-1)e^{a(r-r_0)} - (ar_0-1) \right] \right\}^{1/2}};$$

$$j = \frac{m n_0 E_0 \nu_{eg}}{B_0^2} \frac{r_0}{r} e^{a r_0 \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right)}$$

На основании этих формул можно сделать следующие выводы. Все величины при достаточно большом значении произведения a ($r - r_0$) зависят от него экспоненциально. Зависимость плотности тока от магнитной индукции имеет экспериментальный минимум. Поэтому большие токи разряда можно получить и при больших, и при малых магнитных полях. Заметим, что плотность заряда n/n_0 растет по радиусу от катода значительно быстрее, чем напряженность поля E/E_0 . Плотность электронов и электронный ток связаны между собой неоднозначно в зависимости, например, от магнитного поля. Поэтому большой электронный ток разряда — самый оптимальный режим для магниторазрядных насосов.

2. Неоднородное магнитное поле: $K = -3$.

В этом случае формулы (5), (6), (7) примут вид:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{4en_0 r_0^5}{\epsilon_0 a^2 E_0} \left[\left(\frac{a}{2r^2} + 1 \right) e^{\frac{a}{2r_0^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right)} - \left(\frac{a}{2r_0^2} + 1 \right) \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \frac{e^{\frac{a}{2r_0^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right)}}{\left\{ 1 - \frac{4en_0 r_0^5}{\epsilon_0 a^2 E_0} \left[\left(\frac{a}{2r^2} + 1 \right) e^{\frac{a}{2r_0^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right)} - \left(\frac{a}{2r_0^2} + 1 \right) \right] \right\}^{1/2}};$$

$$j = \frac{mv_0 n_0 E_0 \sigma_{29}}{B_0^2} \left(\frac{r_0}{r} \right) e^{\frac{a}{2r_0^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right)} \quad (9)$$

3. Неоднородное поле: $K = 3$.

В этом случае формулы (5), (6), (7) выглядят следующим образом:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{8en_0}{\epsilon_0 a^2 r_0^4 E_0} \left[\left(\frac{a}{4} r^4 - 1 \right) e^{\frac{a}{4} \left(r^4 - r_0^4 \right)} - \left(\frac{a}{4} r_0^4 - 1 \right) \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \left(\frac{r}{r_0} \right)^6 \frac{e^{\frac{a}{4} \left(r^4 - r_0^4 \right)}}{\left\{ 1 - \frac{8en_0}{\epsilon_0 a^2 r_0^4 E_0} \left[\left(\frac{a}{4} r^4 - 1 \right) e^{\frac{a}{4} \left(r^4 - r_0^4 \right)} - \left(\frac{a}{4} r_0^4 - 1 \right) \right] \right\}^{1/2}};$$

$$j = \frac{m v_0 n_0 E_0 \sigma_{ef}^0}{B_0^2} \cdot \frac{r_0}{r} n_a e^{\frac{a}{4}(r^4 - r_0^4)} \quad (10)$$

Однородное магнитное поле редко реализуется в чистом виде в практических приборах с применением постоянных магнитов. Чаще всего его можно осуществлять, располагая ячейки в центре достаточно длинного соленоида или между широкими пластинами постоянных магнитов. Случай

$K = -3$ соответствует размещению цилиндрического постоянного магнита во внутреннем цилиндре (магнитный дыноль). Случай $K = 3$ близок к случаю размещения ячейки внутри постоянного цилиндрического магнита большого диаметра и небольшой высоты.

Рассмотрим теперь случай малого расстояния между цилиндрами. Если $r \approx r_0 + \Delta r$ ($\Delta r \ll r_0$), то

$$r^{k+1} \approx r_0^{k+1} + (k+1)r_0^k \Delta r,$$

и формулы (5), (6), (7) переищутся в виде:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0}{r} \left\{ 1 - \frac{2e(k+1)n_0 \left(\frac{a r_0^{k+1}}{k+1} - 1 \right)}{\epsilon_0 r_0 E_0 (a r_0^k)^2} \left[\left(1 + \frac{a r_0^{k+1} \Delta r}{k+1} - 1 \right) e^{a r_0^k \Delta r} - 1 \right] \right\}^{1/2};$$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\left(\frac{r}{r_0} \right)^{2k} e^{a r_0^k \Delta r}}{\left\{ 1 - \frac{2e(k+1)n_0 \left(\frac{a r_0^{k+1}}{k+1} - 1 \right)}{\epsilon_0 r_0 E_0 (a r_0^k)^2} \left[\left(1 + \frac{a r_0^k \Delta r}{a r_0^{k+1}} - 1 \right) e^{a r_0^k \Delta r} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

$$j = \frac{m v_0 n_0 E_0 \sigma_{ef}^0 r_0}{B_0^2 r} n_a e^{a r_0^k \Delta r} \quad (11)$$

Таким образом, при малых зазорах между цилиндрами (по сравнению с диаметрами самих цилиндров) плотность тока разряда зависит от степени однородности магнитного поля, обратно пропорциональна радиусу анода и прямо пропорциональна концентрации нейтральных частиц.

При визуальном наблюдении разряда с осциллирующими электронами, так же, как в тлеющем разряде, можно выделить анодное, катодное и анодное темное пространства, светящийся катодный слой и отрицательное свечение (анодный слой). В отличие от тлеющего, разряд с осциллирующими электронами не имеет положительного столба и жестко связан с электродами. В режиме 1, когда $\frac{m}{2} \left(\frac{E_K}{B} \right)^2 \geq eU_0$, анодное темное пространство и светящийся катодный слой отсутствуют. В режиме 2 напряженность электрического поля у катода E_K настолько мала, что не обеспечивает возбуждения и ионизации молекул нейтрального газа вблизи катода. В светящемся катодном слое энергии электронов соответствует максимуму функции возбуждения. В катодном темном пространстве средняя энергия электронов больше энергии максимума функции возбуждения, но ниже энергии ионизации eU_i . По достижении этой энергии начинается анодный слой, сильно искажающий распределение потенциала в ячейке (рис.3).

Из рис.3 следует, что малые магнитные поля (диаграмма B_1), большие напряжения (диаграмма U_0^4) и большие давлении газа дают сходные потенциальные распределения в ячейке. Для получения максимальных токов разряда необходимо оптимальное сочетание магнитной индукции и анодного напряжения (диаграммы B_2 и U_0^2).

Рассмотрим сферическую ячейку, представляющую собой сферический катод и окружающий его сетчатый сферический анод. Внутри катода размещен цилиндрический постоянный магнет. Разряд в такой ячейке поддерживается вблизи средней плоскости магнита, где соблюдается важная перпендикулярность электрического и магнитного полей.

В сферической ячейке поведение разряда также описывается уравнениями Пуассона и непрерывности в сферических координатах:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 E) = - \frac{en}{\epsilon_0}; \quad \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 n \frac{m}{eB^2} E \right) = n i_i.$$

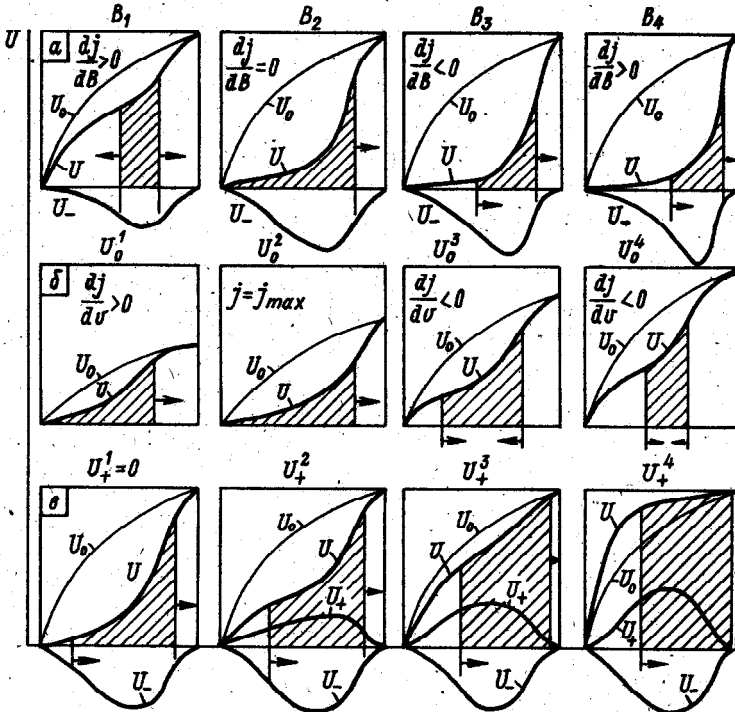


Рис.3. Диаграммы зависимости потенциала в магнетронной ячейке при возрастании магнитного поля (а), анодного напряжения (б) и давления газа (в)

Магнитное поле в сферической ячейке, как и поле всякого диполя, обратно пропорционально кубу радиуса $B = B_0 \frac{r_0^3}{r^3}$.

Как и раньше, аппроксимируем сечение ионизации ступенчатой функцией, а сечение столкновений при полной потере направленного импульса примем обратно пропорциональным значению скорости электрона. Частоты столкновений будут зависеть от параметров разряда следующим образом:

$$\nu_i = \sigma_i^0 n_a E/B ; \quad \nu_{eg} = \sigma_{eg}^0 n_a v_0 .$$

Представляя эти значения в уравнение непрерывности, перепишем его в виде

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 n \frac{m E r^6}{e B^2 r_0^6} n_a \sigma_{eq}^0 v_0 \right) = n n_a \sigma_i^0 \frac{E r^3}{B r_0^3}$$

или, вводя для сокращения обозначение $2b = \frac{\sigma_i^0 e r_0^3 B_0}{\sigma_{eq}^0 m v_0}$,

$$\frac{d}{dr} (r^3 n E) = 2b (r^3 n E) \frac{1}{r^3}.$$

Непосредственное интегрирование дает выражение

$$r^3 n E = (r^3 n E)_0 e^{\frac{b}{r_0^2} (1 - \frac{r^2}{r_0^2})},$$

которое решаем теперь совместно с уравнением Пуассона:

$$\frac{e_0}{r^2} \frac{d}{dr} \left[\frac{(r^3 n E)}{r^6 n} e^{\frac{b}{r_0^2}} e^{-\frac{b}{r^2}} \right] = e n \frac{r^4 e^{-\frac{b}{r^2}}}{r^4 e^{-\frac{b}{r_0^2}}};$$

$$\frac{e_0 (r^3 n E)_0}{2e} e^{\frac{b}{r_0^2}} \frac{d}{dr} \left(\frac{e^{-\frac{b}{r^2}}}{r^6 n} \right) = \frac{1}{r^4} e^{-\frac{b}{r^2}}.$$

Для интегрирования этого уравнения введем замену переменных

$$\frac{b}{r^2} = x^2; \quad \frac{1}{r^4} = \frac{x^4}{b^2}; \quad r = \frac{\sqrt{b}}{x}; \quad dr = -\sqrt{b} \frac{dx}{x^2}.$$

Окончательно имеем уравнения для интегрирования:

$$\frac{e_0}{2e} (r^3 n E)_0 e^{\frac{b}{r_0^2}} d \left(\frac{1}{r^6 n} e^{-\frac{b}{r^2}} \right) = \frac{x^2}{b^2} e^{-x^2} \sqrt{b} dx;$$

$$\frac{e_0}{2e} (r^3 n E)_0 e^{\frac{b}{r_0^2}} \left[\left(\frac{e^{-\frac{b}{r^2}}}{r^6 n} \right) - \left(\frac{e^{-\frac{b}{r_0^2}}}{r_0^6 n} \right) \right] \approx b^{-\frac{3}{2}} \int_0^x x^2 e^{-x^2} dx \approx$$

$$\approx b^{-\frac{3}{2}} x_0 \int_0^x x e^{-x^2} dx \approx -\frac{b^{-\frac{3}{2}} x_0}{2} (e^{-x^2} - e^{-x_0^2}) \approx -\frac{1}{2b r_0} (e^{-\frac{b}{r^2}} - e^{-\frac{b}{r_0^2}}).$$

Относительная плотность электронного заряда и относительная напряженность электрического поля будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{E}{E_0} = \sqrt{1 - \frac{en_0 r_0^3}{6\epsilon_0 E_0} \left[e^{\frac{3}{r_0} (1 - \frac{r_0^2}{r^2})} - 1 \right]}$$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{r_0^6}{r^6} \frac{e^{\frac{3}{r_0} (1 - \frac{r_0^2}{r^2})}}{\left\{ 1 - \frac{en_0 r_0^3}{\epsilon_0 6 E_0} \left[e^{\frac{3}{r_0} (1 - \frac{r_0^2}{r^2})} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

На рис.4 приведены расчетные значения относительной плотности заряда и напряженности электрического поля для следующих параметров ячейки: $r_0 = 10^{-2}$ м, $B_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ Т, $n_0 = 3,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $E_0 = 1,15 \times 10^5$ В/м, $\sigma_i / \epsilon_0 n_0 = 0,3$. Значение $E_0 = \left(\frac{2e U_i B_0^2}{m \omega} \right)^{1/2}$ соответствует началу ионизации нейтральных молекул при потенциале ионизации $U_i = 15$ В, начальная плотность частиц n_0 выбрана из условия $n_0 = \frac{\epsilon_0 \omega^2 B_0^2}{m \omega_p^2}$ и соответствует постоянной плотности заряда в ячейке с однородным магнитным полем.

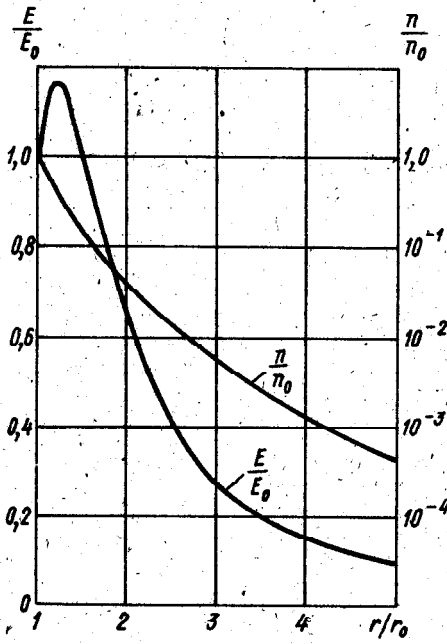


Рис.4. Зависимости расчетных значений относительной плотности заряда и напряженности электрического поля в зоне объемного заряда сферической ячейки

Плотность радиального тока в сферической ячейке

$$j = en \frac{m \gamma_{eg}}{eB^2} E = \frac{m n_0 \gamma_{eg} r_0^2 E_0}{B^2 r^2} e^{1/2(1 - 1/r^2)} \quad (12)$$

1.3. Оптимизация параметров магнитоэлектронных приборов

Важнейшими показателями эффективности насосов являются быстрота откачки и удельная быстрота откачки на единицу массы и габаритов. Быстрота откачки пропорциональна току разряда, а удельная быстрота откачки в самом общем случае пропорциональна плотности тока. Те же самые выводы о доминирующей роли плотности тока справедливы и для манометров, так как увеличение тока позволит расширить их рабочий диапазон и повысить точность измерений.

Из формул (7)-(12) следует, что основными параметрами, определяющими поведение функции разрядного тока, являются геометрия разрядных электродов, индукция магнитного поля и напряжение, поданное на электроды. Анализ формул показывает, что ток электронов на анод (а следовательно, и лишь немного уступающий ему ток ионов на катод) зависит экспоненциально от произведения магнитной индукции на ширину слоя и обратно пропорционален квадрату магнитной индукции. В зависимости от магнитного поля ток разряда имеет минимум, что и заставляет выбирать либо малую, либо большую магнитную индукцию.

Зависимость тока от степени неоднородности магнитного поля (K) также отчетливо видна из формул (7)-(12). Общий вывод однозначен: разрядный ток повышается с увеличением магнитной индукции по направлению к аноду. Этот резерв повышения производительности насосов оставался до сих пор вне поля зрения разработчиков.

Плотность тока в разряде сильно зависит от конфигурации ячейки. В частности, в сферической ячейке ток убывает обратно пропорционально r^2 . Поэтому в случае сферической формы магнитных силовых линий рационально размещать анод внутри ячейки.

Плотность тока разряда прямо пропорциональна n_a - концентрации нейтралей и n_0 - начальной плотности электронов на катодной границе. Начальная плотность n_0 зависит от коэффициента ионно-электронной эмиссии γ , магнитной индукции B и давления газа. Механизм процессов поясняется (рис. 5) на схемах движения электронов в магнетроне и у поверхности катода. Количество вторичных электронов, вылетающих с поверхности катода под действием ионной бомбардировки, пропорционально количеству падающих ионов. Однако не все образовавшиеся электроны уходят к аноду. Часть их, не испытав столкновения на дуге ларморовской окружности, возвращается обратно на катод. Доля возвращающихся на катод электронов возрастает с уменьшением давления газа и увели-

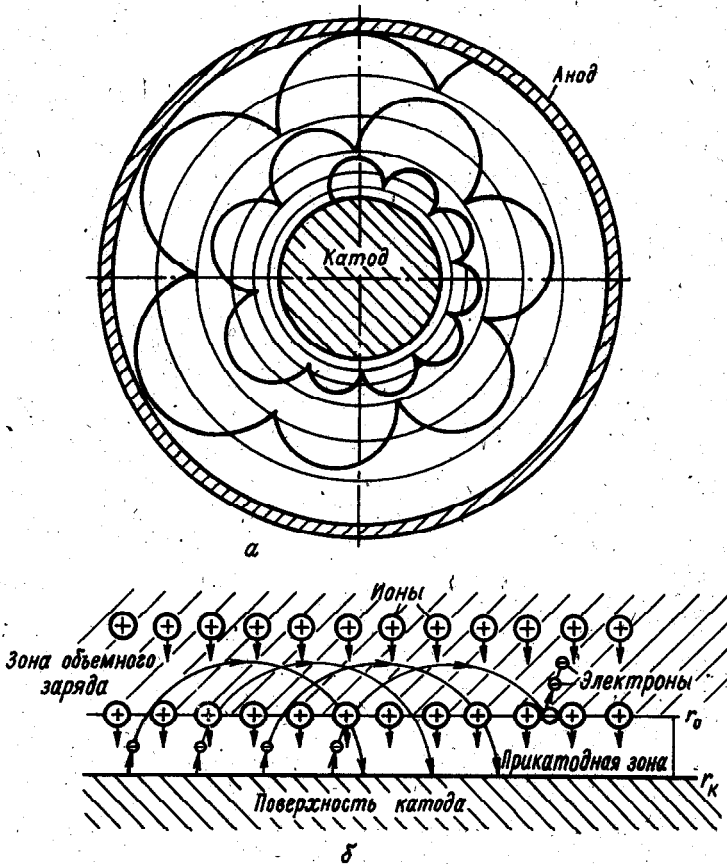


Рис. 5. Схема движения электронов в магнетроне (а) и схема образования слоя объемного заряда (б) у поверхности катода

чением магнитной индукции. Эффективный коэффициент будет определяться отношением среднего расстояния, проходимого электроном от выхода из катода до возвращения на него $2\pi r_0^2 = \frac{2\pi m E}{e B_0^2}$, к длине свободного пробега $\lambda = \frac{E}{B \nu_{eq}}$:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - e^{-\frac{2\pi m \nu_{eq}}{e B}} \right).$$

Из этой формулы видно, что начальная плотность электронов на

катодной границе слоя объемного заряда (или пропорциональная ей плотность тока на катодную границу со стороны катода) уменьшается с ростом магнитного поля и падением давления. Отсюда следует, что плотность тока в цилиндрической ячейке должна быть произведением трех сомножителей, зависящих от магнитной индукции B_0 , и двух сомножителей, зависящих от давления:

$$j = \frac{m v_0 E_0 \gamma_0}{B_0^2} \left(\frac{r_0}{r}\right) \gamma_0 g \left(1 - e^{-\frac{2 \lambda m v_0 g}{e B_0}}\right) n_a e^{\frac{\alpha r_0^{k+1}}{k+1}} \left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^{k+1} - 1\right],$$

где γ_0 - истинный коэффициент вторичной эмиссии электронов, определяемый как отношение числа выбитых из поверхности электронов к числу падающих на поверхность бомбардирующих частиц. Этот коэффициент пропорционален корню квадратному из значения энергии и имеет тенденцию к замедлению роста при более высоких энергиях. В области энергий ниже 1 кэВ коэффициент γ_0 практически не зависит от энергии или понижается с ее уменьшением. Поэтому при малых анодных напряжениях этот коэффициент можно считать постоянным, а при больших - прямо пропорциональным анодному напряжению и магнитной индукции.

Таким образом, ν_0 возрастает с увеличением давления и уменьшением магнитного поля. Этим объясняется вид характеристики тока I в функции давления P :

$$I = c P^u,$$

где для большинства газов $1,10 \leq u \leq 1,15$ в диапазоне давлений $10^{-2} \dots 10^{-7}$ Па и $u = 1,26$ для давлений $10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-11}$ Па.

Проблемы, связанные с прохождением тока в магниторазрядных ячейках, аналогичны задачам в термоэлектронных диодах. Для повышения эффективности ячеек необходимо удалить от поверхности катода максимальное число зародившихся там электронов и обеспечить достаточное число столкновений с последующей ионизацией на их пути к аноду.

Рассмотрим более подробно прикатодную зону, обеспечивающую начальную плотность частиц ν_0 на катодной границе активного слоя разряда. С момента зажигания напряженность электрического поля у катода уменьшается, что приводит к уменьшению ларморовского радиуса вышедших с катода электронов, средняя энергия которых составляет 3...5 эВ. По аналогии с термоэлектронными диодами в магниторазрядных ячейках можно выделить две стадии высоковакуумного разряда в зависимости от значения магнитной индукции. При малых магнитных полях значительная часть выбитых из катода электронов уходит в межэлектродное пространство и достигает, лавинообразно размножаясь, анода. Это режим тока насыщения, в котором мало влияние анодного напряжения, но имеется сильная зависимость от магнитной индукции. При этом главным физическим фактором подъема температуры диода с ростом магнитной индукции

является увеличение числа и энергии падающих на катод ионов. Следует заметить, что режим тока насыщения занимает небольшой интервал изменения индукции.

С ростом магнитного поля все большая часть вышедших из катода электронов возвращается обратно на катод. Объемный заряд электронов вблизи катода создает сравнительно сильное поле, вплоть до образования виртуального катода, потенциал которого становится ниже потенциала катода. В этом случае поле у катода для вылетающих частиц становится тормозящим и потому задерживает электроны, начальная энергия которых недостаточна для преодоления потенциального барьера. На анод собираются лишь электроны, прошедшие через минимум потенциала и, соответственно, размножившиеся в разрядном слое. Это режим ограничения тока объемным зарядом. Ток на анод становится меньше тока насыщения, он зависит от того, насколько потенциал приложенного извне поля больше потенциала поля частиц, т.е. приложенного напряжения. Как и в термоэлектронном диоде, режим ограничения тока объемным зарядом можно обратить в режим тока насыщения увеличением анодного напряжения.

Другой механизм образования объемного заряда у катода в магнетроне с тонким катодом связан с ионизацией остаточного газа "промакивающими" мимо катода положительными ионами при достаточно сильном магнитном поле. В этом случае ионы собираются на торцах ячейки, а первичные электроны осциллируют в виде трубчатого пучка вдоль стержневого катода. Нормальный магнетрон становится полностью аналогичным ячейке Пеннинга по механизму поддержания разряда, за исключением того, что по оси магнетрона проходит дополнительный электрод - коллектор электронов, приходящих из виртуального катода [4]. В инверсном магнетроне многократные осцилляции образовавшихся ионов затруднительны при обычно создаваемых магнитных полях и напряжениях. Поэтому зависимости тока от магнитного поля для инверсного магнетрона отличаются от соответствующих характеристик нормального магнетрона и ячейки Пеннинга и весьма сходны с накальными характеристиками термоэлектронного диода.

С увеличением поля электронного объемного заряда напряженность электрического поля у катода уменьшается и размеры прикатодной области увеличивается. Электроны от катода дрейфуют через серию столкновений без ионизации до тех пор, пока средняя энергия электронов не станет равной энергии ионизации газа eU_i :

$$\frac{m}{2} \left(\frac{E}{B} \right)^2 = eU_i.$$

Основная задача при проектировании сильноточных магнетронных разрядных трубок - это добиться максимального значения произведения

$$f(B) = \frac{1}{B^2} e^a \left[\left(\frac{m}{m_0} \right)^{k+1} - 1 \right],$$

где α - величина, пропорциональная отношению радиуса катода к лагранжевскому радиусу;

$$\alpha = \pm \frac{eB_0 r_0 \sigma_1^0}{mV_0 (k+1) \sigma_{e1}^0} = \pm \frac{r_0}{r_{\lambda}} \frac{\sigma_1^0}{\sigma_{e1}^0 (k+1)}$$

На рис.6 представлена зависимость $f(B) = \frac{1}{B^2} e^{cB}$ для ряда значений параметров. Магнитная индукция B выражена в сотнях долей Теслы, при этом $c = 0,1$ соответствует ширине зоны объемного заряда, равной 1,176 мм, а $c = 1,3$ соответствует 15,288 мм. При поддержании достаточно большой зоны объемного заряда можно избежать минимума тока в зависимости от значения магнитной индукции.

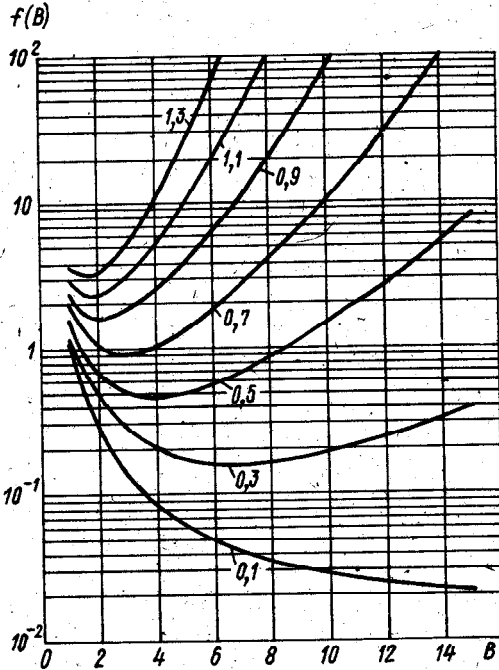


Рис.6. Графики функции

$$f(B) = \frac{1}{B^2} e^{cB}$$

Значения коэффициента c даны под каждой кривой

Общее падение потенциала в промежутке между цилиндрическим катодом и анодом складывается из падения напряжения в прикатодной области, в слое и в прианодной области:

$$U_a = - \int_{r_0}^R E(r) dr - \int_{r_0}^R \frac{r_0 E_0}{r} \left\{ 1 - \frac{2e(k+1)n_0}{\epsilon_0 a^2 r_0^{2k+1} E_0} \left[\left(\frac{ar^{k+1}}{k+1} - 1 \right) e^{\frac{ar^{k+1}}{k+1}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{k+1} - 1 \right] - \left(\frac{a}{k+1} r_0^{k+1} - 1 \right) \right] \right\}^{1/2} dr - \int_R^r_a E(r) dr.$$

Напряженность электрического поля в прикатодной и дринадной зонах можно считать постоянными величинами с погрешностью не более 10%. Напряженность поля в прикатодной зоне может быть как меньше, так и больше E_0 .

Каждая из областей рассматривается как независимый цилиндрический конденсатор, а сходимость решений в каждой области основана на том факте, что радиальная напряженность электрического поля непрерывна во всем промежутке между катодом и анодом.

Увеличения отношения R/r_0 , где R - радиус анодной, а r_0 - радиус катодной границы слоя объемного заряда, можно добиться за счет повышения анодного напряжения.

Изложенная выше картина существования двух режимов разряда подтверждается прямым измерением потока электронов на катод в магнетроне и ячейке Пеннинга [5].

В ы в о д ы

При разработке сильноточных магниторазрядных ячеек необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Большие токи можно получить при большем расстоянии между катодом и анодом в магнетронной ячейке.

Значения магнитной индукции необходимо выбирать в диапазоне 0,03...0,04 Т либо больше 0,1 Т. Увеличения тока можно добиться за счет неоднородного магнитного поля, возрастающего по направлению к аноду. Магнитные силовые линии при этом должны быть параллельны аноду, т.е. форма анода должна повторять форму силовых линий.

Для получения больших токов необходимо выбрать максимально возможные напряжения.

2. НАСОСЫ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Основной принцип оптимального проектирования магниторазрядных насосов заключается в максимизации разрядных токов, пропорциональных скорости откачки при фиксированном давлении, и обеспечении возможно полного использования в разряде магнитного потока системы магнитов, которая определяет массо-габаритные параметры насоса, а также в получении возможно большей открытости разрядной системы, что обеспечивает газодинамическую проводимость и, в конечном итоге, быстроту откачки насоса.

Для максимизации разрядных токов необходимо обеспечить параллельность аноду силовых линий магнитного поля, замыкание их на катоде, а также свободный дрейф зарядов в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям.

Повышение использования в разряде магнитного потока, определяющего параметры слоя объемного заряда разрядной плазмы, полностью за-

высот от компоновочной схемы магниторазрядных ячеек и собственно магнитов.

Наибольшая газодинамическая проводимость насоса обеспечивается, главным образом, свободным доступом газа в область объемного заряда (область, ответственную за ионизацию и откачку).

Реализацию изложенных положений не может обеспечить традиционная схема насоса, базирующаяся на ячейке Пеннинга, используемая практически во всех промышленных магниторазрядных насосах.

2.1. Магниторазрядные насосы

Магниторазрядные насосы, впервые предложенные Э.М. Рейхруделем [2], нашли широкое применение при получении высокого и сверхвысокого вакуума. Работа подобных насосов основана на ионизации остаточных газов в тлеющем разряде в магнитном поле, уходе ионов на катод, внедрении в него, распылении катода и связывании молекул остаточных газов на аноде материалом распыленного катода посредством химической и физической сорбции. Наибольшее распространение в мире получила конструкция, созданная Холлом в 1958 г. [6, 7] на базе ячейки Пеннинга. Она представляет собой многоэлектродный анод с прямыми направляющими, размещенный между плоскими параллельными катодами в однородном магнитном поле.

Наряду с большим числом достоинств магниторазрядных насосов, таких как диапазон рабочих давлений от 0,1 до 10^{-11} Па, обеспечение безмасляного вакуума, откачка практически всех газов, низкие энергозатраты на единицу скорости откачки, простота и технологичность конструкции, безинертционность и т.д., насосы имеют ряд существенных недостатков. К недостаткам можно отнести малую производительность насосов по углеводородам и инертным газам, большую удельную массу на единицу производительности, взаимное влияние собственных магнитных полей насосов и приборов и внешних полей оборудования, в которых они применяются.

Большая удельная масса насосов на единицу производительности $\sim 0,5 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{л}}$ против 0,04...0,09 $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{л}}$ у испарительных ионно-сорбционных насосов и 0,02...0,09 $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{л}}$ у диффузионных насосов объясняется низкой эффективностью использования магнитного поля, так как именно магнитная система определяет массо-габаритные характеристики насоса. Для облегчения насосов необходимо получить разряд в скрещенных полях во всем объеме, где создано магнитное поле, а не только в небольшой части этого объема (10...30%), занимаемой анодными ячейками, как в насосах на основе конструкций Холла [8-11] и в насосах, серийно выпускаемых отечественной промышленностью, типа НМД, НМДО (НОРД).

Для решения задачи снижения удельной массы на единицу производительности насоса было предложено конструктивное решение в виде сис-

теми коаксиально расположенных электродов с неоднородным магнитным полем [12] (магниты включены встречно, расположены внутри цилиндра катода, катод расположен внутри цилиндра анода). Предложенная конструкция предполагает практически полное использование магнитного потока и горение разряда во всем объеме насоса.

Основным недостатком предложенной конструкции является низкая газовая проводимость разрядной системы откачного устройства вследствие значительной протяженности электродов, что особенно существенно в насосах большой производительности. Этот недостаток устраняется путем выполнения анодного цилиндра перфорированным, например сетчатым [13]. Подобная открытость разрядной системы обеспечивает максимальную производительность насоса для определенной геометрии электродов и магнитного поля.

Параллельность магнитных силовых линий аноду является необходимым условием поддержания разряда, а параллельность магнитных силовых линий катоду на его значительном протяжении обеспечивает интенсивное распыление материала катода (getterа) [14], что повышает сорбцию газов. В ряде конструкций осесимметричных магниторазрядных откачных устройств поверхности электродов искривлены в приближении к форме поверхностей, образованных магнитными силовыми линиями [15], что существенно повышает производительность насоса, расширяет его рабочий диапазон на сторону низких давлений путем повышения стабильности разряда. Однако увеличение зоны катодного распыления практически на всю катодную поверхность существенно повышает производительность насоса по активным газам за счет интенсификации, главным образом, хемосорбции [16], но снижает эффективность откачки инертных газов и водорода, которые в значительной мере откачиваются путем внедрения их ионов в катод, появляется эффект выделения газов из катода, что особенно заметно при откачке аргона - так называемая "аргоновая нестабильность".

Для избавления от аргоновой нестабильности требуется выделение на катоде не распыляемых разрядом зон, в которых и будет происходить стабильная откачка инертных газов. Конструктивная схема такого насоса [13] показана на рис.7,а. Анод 1 насоса выполнен сетчатым, внутри титанового катода 2 сделана полость, в которую помещены магниты 3, обращенные одноименными полюсами друг к другу и разделенные шайбами 4 из магнитомягкого материала. На катоде в плоскости шайб установлены кольца 5 из магнитомягкого материала, частично перекрывающие пространство между катодом и анодом. Катод 2 закреплен через металлокерамический изолятор 6 на уплотнительном фланце 7.

Магнитомягкие кольца 5 в насосе выполняют тройную функцию. Они являются, во-первых, нераспыляемыми катодными зонами для внедрения ионов инертных газов и водорода, во-вторых, магнитопроводами, повышающими степень параллельности магнитных силовых линий катоду, что

расширяет зону катодного распыления, и, в-третьих, дополнительными поверхностями осаждения геттеризующего материала из распыляемой катодной зоны.

Как показывает экспериментальное изучение распределения тока между электродами в насосе, ток на магнитомягкие кольца вследствие нормального расположения магнитных силовых линий относительно колец практически равен нулю, сами кольца не расширяются. При визуальном изучении насоса после определенной наработки катодная зона между магнитомягкими кольцами - блестящая, со следами катодного распыления, а сами кольца покрыты слоем напыленного геттера с катода, так же как и анод.

Опытный образец насоса имел следующие размеры: диаметр анода 40 мм, катода 17 мм, высота магнитомягкого кольца 3 мм; использовались магниты из самарий-кобальтового сплава высотой 9 мм, диаметром 15 мм, поверхность анода перфорирована на 50%. При анодном напряжении 3 кВ и магнитном поле на катодной распыляемой поверхности 0,08 Т быстрота откачки по воздуху двух ячеек составила 3 л/с.

Как показано в расчетах (7) - (12), интенсивность разряда (отношение тока разряда к давлению в ячейке), прямо пропорциональная скорости откачки, может быть увеличена, если магнитное поле не убывает, а возрастает по направлению от катода к аноду, и не однородно, т.е. если силовые линии магнитного поля сгущаются к аноду. Физически это связано с тем, что плотность заряда в разрядной области экспоненциально зависит от значения магнитной индукции, а большая плотность заряда вблизи анода обеспечивает больший ток разряда на анод, ионный ток на катод и большую скорость распыления катода под действием ионной бомбардировки, т.е. большую быстроту откачки остаточного газа.

Целесообразно изменить конструкцию насоса [13] путем размещения магнитомягких колец с частичным перекрытием межэлектродного зазора на внешнем цилиндре (катоде), а магнита - во внутреннем цилиндре (аноде), т.е. переделать конструкцию из магнетронной в инверсно-магнетронную (рис.7,б).

Принцип работы откачного устройства не отличается от традиционных магниторазрядных устройств. Условия замыкания магнитных силовых линий на катоде выполняются практически во всем разрядном объеме, так как кольца одновременно являются магнитопроводами, в силу этих же условий достигается относительно хорошая параллельность силовых магнитных линий аноду и распыляемой зоне катода. Таким образом, конструкцию насоса на рис. 7,б можно считать более прогрессивной по сравнению с конструкцией на рис.7,а. Еще одно преимущество насоса на рис.7,б состоит в том, что при перфорации катодного цилиндра образовавшиеся ионы могут вылетать в отверстия на катоде и внедряться или оседать на расположенных за ним электродах или на стенках патрубка,

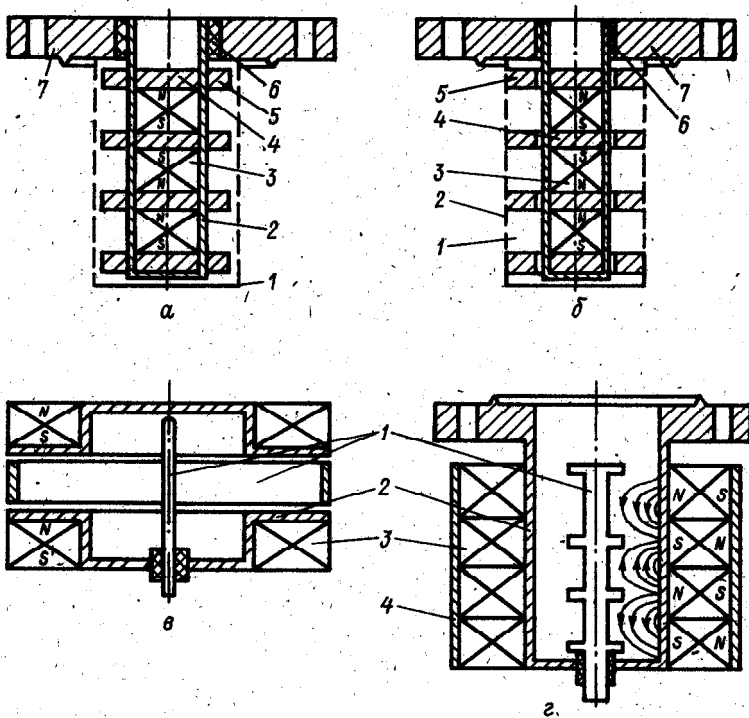


Рис.7. Усовершенствованные осесимметричные магнетронные насосы
а - магнетронный; б, в, г - инверсно-магнетронные

в который помещен насос. Внедрение в материал вылетающих из разряда ионов особенно эффективно использовать для откачки инертных газов.

Макетный образец насоса по схеме рис.7,б имел следующие размеры: диаметр анода 40 мм, катода 17 мм, высота магнитного кольца 3 мм; использовались магниты из самарий-кобальтового сплава высотой 9 мм, диаметром 15 мм, поверхность катода перфорирована на 50%. При анодном напряжении 3 кВ, магнитном поле на поверхности цилиндрического анода 0,08 Т частота откачки двух ячеек по воздуху составила 5 л/с, что почти в 1,7 раза превышает частоту откачки насоса на рис.7,а.

Эксперимент полностью подтвердил правильность теоретического представления и преимущество инверсно-магнетронных откачных систем над магнетронными по производительности.

На рис.7,в,г приведены конструктивные схемы откачных устройств на основе инверсного магнетрона [17], обеспечивающие откачку газов более эффективно, чем существующие промышленные насосы.

Откачное устройство на рис.7,в имеет развитую катодную поверхность и предназначено главным образом для откачки инертных газов. Наиболее полно по сравнению с конструкциями на рис.7,а,б используется магнитное поле: работу насоса обеспечивает магнитный поток, проходящий от одного полюса индивидуального магнита к другому, и магнитный поток между разноименными полюсами системы магнитов.

Откачное устройство на рис.7,г имеет развитую анодную поверхность, что позволяет увеличить поверхность осаждения распыленного с катода геттеризирующего материала и тем самым увеличить быстроту откачки насоса [18], главным образом по активным газам. В насосе применены магниты с радиальной намагниченностью, анодные диски находятся в средних сечениях магнитов, в зоне с минимумом составляющей индукции магнитного поля, параллельной катоду, т.е. вне зоны разряда.

Важной задачей при разработке и эксплуатации магнеторазрядных насосов является исключение или снижение взаимного влияния магнитных полей насоса и электрофизической установки. Решение этой задачи возможно двумя способами: либо насос работает в магнитном поле установки, либо насос защищается магнитными экранами.

Экранировка от внешних магнитных полей, например в насосе, изображенном на рис.7,г, достигается тем, что наружный цилиндр, охватывающий магниты, выполнен магнитомягким, что предотвращает рассеяние магнитного потока. Одновременно этим достигаются повышение эффективности использования магнитного поля и снижение массы насоса.

Решение задачи повышения производительности насоса может быть также достигнуто за счет использования закономерностей движения положительных ионов, идущих из разряда на катод [19]. При достаточно сильном магнитном поле за счет уменьшения ларморовского радиуса ионы начинают "промахиваться" мимо катода, многократно осциллируя внутри окружности зарождения. Образующийся вблизи катода большой положительный заряд ведет к повышению напряженности электрического поля у катода и соответствующему увеличению тока разряда. При этом ионы попадают на торцевые электроды и вызывают их распыление. Магнетрон становится аналогичным ячейке Пеннинга с цилиндрическим электродом на оси. Вторичные электроды выходят с торцов в виде кольцевого потока, и потенциал этого потока может стать ниже потенциала катода [20]. Ток разряда возрастает за счет этого эффекта в 30 - 60 раз. Длина пробега вновь зародившихся электронов, равная расстоянию между торцами, больше, чем в магнетроне, и слабо зависит от магнитной индукции.

Наиболее полное использование магнитного потока, значительное снижение удельных массо-габаритных характеристик, интересное конструктивное решение, сочетающее магнетронное и инверсно-магнетронное откачные устройства [21], достигнуто в насосе, представленном на рис.8. Так же как и вышеописанные конструкции, насос выполнен на базе осесимметричных магнито-разрядных ячеек с неоднородным периодическим магнитным полем.

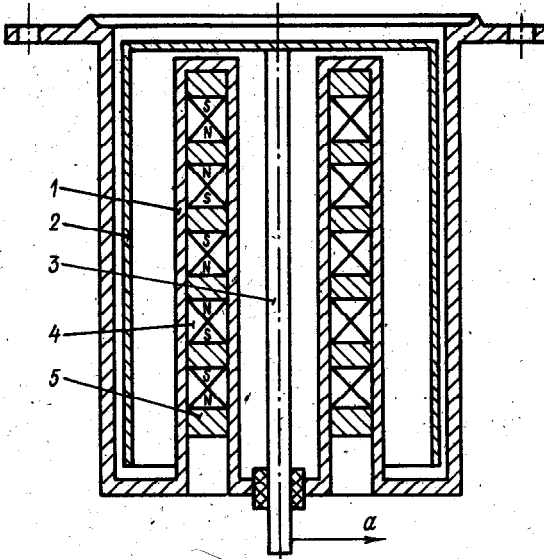


Рис.8. Конструктивная схема магнито-разрядного насоса с сильно неоднородным полем

Устройство содержит полый цилиндрический катод 1, выполненный из материала геттера; расположенный снаружи от него цилиндрический анод 2; проходящий по оси анодный стержень 3 соединен с анодом 2. В полости катода 1 установлена магнитная система в виде набора кольцевых постоянных магнитов 4, обращенных одноименными полюсами навстречу друг другу и разделенных шайбами 5 из магнитомягкого материала. Стрелкой показан подвод тока от анода к положительной клемме источника электропитания, катод заземлен. Анод разделен с катодом металлокерамическим изолятором. Система выдерживает прогрев до 600°C . Полость катода открыта со стороны атмосферы, так что при прогреве магниты могут быть удалены из насоса. Получившаяся конструкция образует две фактически независимые разрядные камеры, аналогичные предложенным магнито-разрядным манометрическим ячейкам с неоднородным периодическим магнитным полем [22, 23]. Магнитные силовые линии в обеих камерах сильно искривлены и дважды

меняют свое направление в каждом периоде поля ячейки.

Основными достоинствами конструкции - это ее открытость в вакуумный объем, небольшие магнитные поля рассеяния, оригинальное расположение магнитов в насосе, что в совокупности позволяет улучшить удельные весовые и габаритные характеристики.

Работа насоса как средства откачки газа по существу физических процессов ничем не отличается от традиционных насосов на базе ячейки Пеннинга. При подаче на анод высокого напряжения относительно катода возникает разрядная плазма в виде колец, повторяющих форму магнитного потока. Электроны оказываются запертыми в ловушке разрядной области, дрейфуют в направлении, перпендикулярном векторам напряженности электрического и магнитного полей, сталкиваются с молекулами остаточного газа. Возникающие положительные ионы уходят на катод, расширяя его материал или внедряясь в него. Распыленный материал катода, обычно активный геттер, осаждается на аноде и сорбрует остаточные газы.

Экспериментальный образец насоса имел входное отверстие диаметром 100 мм, длину 200 мм, диаметр анода 92 мм, диаметр анодного стержня 6 мм, диаметр катода из титана: внешнего 74 мм, внутреннего 28 мм, содержал 7 кольцевых магнитов из феррита бария с внешним диаметром 70 мм, внутренним 32 мм, высотой 15 мм. Индукция магнитного поля у поверхности катода составляла 0,06 Т, у поверхности внешнего анода 0,015 Т, у поверхности анодного стержня 0,04 Т. Таким образом, разрядная система насоса представляла 7 наружных и 7 внутренних по отношению к катодному цилиндру ячеек. С учетом искривленности магнитных силовых линий наружные ячейки можно классифицировать как магнетронные, а внутренние - как инверсно-магнетронные.

Экспериментально замеренная быстрота откачки насоса по воздуху при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Па составила 17 л/с. Быстрота откачки определялась при напряжениях на аноде 2; 3,3; 5; 6 кВ - соответственно кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 9. Из графика (рис. 9) следует, что 3,3 кВ является оптимальным анодным напряжением при откачке воздуха вследствие незначительного и плавного изменения быстроты откачки. Однако это напряжение не обеспечивает максимизации быстроты откачки и, в частности, является недостаточным для эффективной откачки аргона и других инертных газов [24, 25], а увеличение анодного напряжения не дает роста скорости откачки вследствие малости индукции магнитного поля, в основном, в области анода. Справедливость выводов может подтвердить вольт-амперная характеристика насоса на рис. 10, а. Кривая 1 отражает зависимость тока разряда в магнетронной части насоса, кривая 2 - в инверсно-магнетронной, кривые 3 и 4 - в индивидуальных ячейках прямого и инверсного магнетрона соответственно. Из рис. 10, а следует, что вследствие большей индукции магнитного поля в прианодной области напряжение на аноде инверсно-магнетронной системы при

максимуме тока разряда выше, максимальный ток разряда, пропорциональный скорости откачки, больше, а плотность тока разряда существенно больше, чем в магнетроне. Вследствие различных анодных напряжений, обеспечивающих максимум скорости откачки (максимум разрядных токов), эффективность насоса оказывается несколько заниженной, хотя достоинства предлагаемой конструктивной схемы очевидны: простота конструкции, высокая технологичность и существенно улучшенные удельные массо-габаритные параметры, например, удельная масса составляет $0,25 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{л}}$. С целью повышения эффективности насоса следует привести в соответствие анодное напряжение, габариты разрядных ячеек, индукцию магнитного поля [12,24].

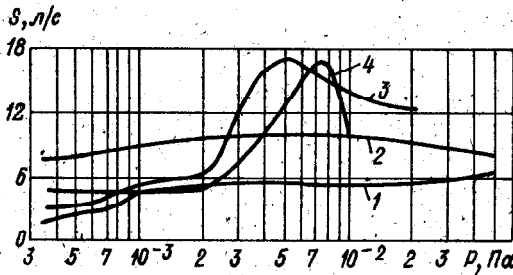


Рис.9. Зависимость скорости откачки насоса по воздуху от давления

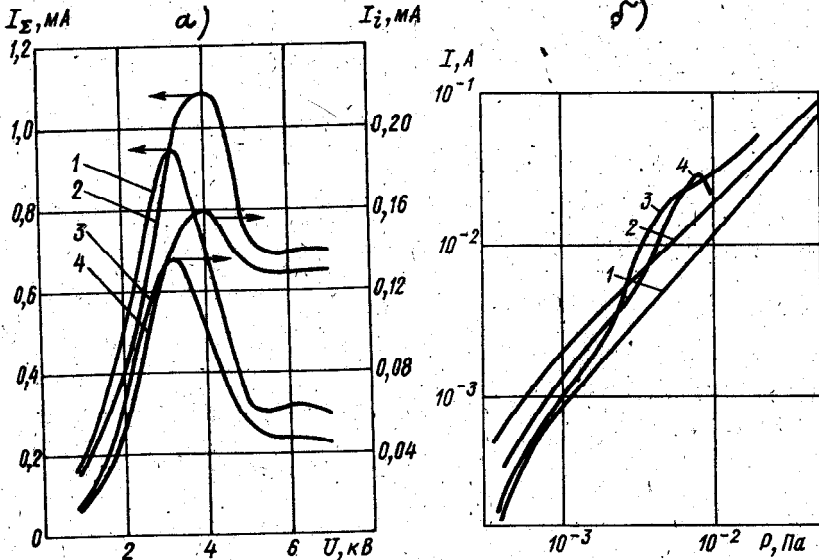


Рис.10. Зависимость разрядного тока в насосе от напряжения (а) и давления (б)

При исследовании работы насоса быстрота откачки определялась экспериментальным и расчетным путями. Экспериментально быстрота откачки находилась с помощью диафрагмы и двух манометров, а расчет проводился по формуле [25]:

$$S = 10 \left(1 - \frac{1,1 \cdot 10^4 P}{1 + 3 \cdot 10^4 P} \right) \frac{I}{P}, \quad (19)$$

где S - быстрота откачки, м³/с;
 P - давление, Па;
 I - разрядный ток, А.

Зависимость разрядного тока насоса от давления в камере приведена на рис.10,б. Определенные экспериментальным и расчетным путем значения быстроты откачки совпали с точностью до 30% (ошибка в пределах погрешности измерительных приборов). Сравнение позволяет сделать вывод о возможности распространения методики расчета [25], изложенной для насосов на основе ячеек Пеннинга, на осесимметричные насосы.

К дальнейшему совершенствованию рассмотренных насосов с целью снижения удельных весовых и габаритных характеристик может привести выполнение их конструкций в бескорпусном варианте. Например, насосы с конструктивными схемами, изображенными на рис.7,а, б, в, легко могут быть изготовлены в бескорпусном варианте и встраиваться в вакуумную камеру установки.

В настоящее время существенным требованием к магниторазрядному насосу является сквозное прохождение потока остаточных газов с целью их частичной откачки и ионизации, возбуждения атомов и молекул и разложения в разряде сложных молекул остаточных газов, не поддающихся откачке, например, диффузионным, масляным форвакуумным или электродуговым насосом.

В частности, при откачке масляными форвакуумными и диффузионными насосами остаточных газов с повышенным содержанием сложных углеводородов, агрессивных и вакуумным маслам, проходной магниторазрядный насос целесообразно устанавливать в их входном сечении, что позволяет разложить агрессивные сложные углеводороды [26] и обеспечить нормальную работу масляных насосов.

Проходные магниторазрядные насосы во входном сечении криогенных или криосорбционных насосов позволяют производить откачку газов, температура конденсации которых лежит ниже рабочей температуры насосов. Например, в гелиевых криогенных насосах таким путем откачивается гелий.

До сих пор практически все отечественные магниторазрядные насосы по производительности уступают криогенным, диффузионным и электродуговым насосам.

В отношении проходного магниторазрядного насоса необходимо выполнять три важных требования: 1) сделать входное сечение равным входному сечению насоса, с которым он комбинируется; 2) обеспечивать достаточную газодинамическую проводимость, чтобы не снизить производительность основного насоса; 3) выполнять условие прохождения потока остаточных газов через разрядную область с достаточно высокими уровнями возбуждения и ионизации молекул откачиваемого газа.

Насосы на основе ячейки Пеннинга не могут удовлетворить требованиям к проходным насосам, так как имеют достаточно низкую газовую проводимость, а реализация условия полного прохождения газового потока через значительную длину разрядной зоны в них конструктивно затруднена.

Устройство, удовлетворяющее изложенным требованиям и базирующееся на осесимметричной ячейке, может служить в качестве проходного насоса [27].

Разрядная система насоса (рис. II) собрана на базе чередующихся анодных 1 и катодных 2 цилиндров, расположенных один внутри другого и имеющих общую ось симметрии. Катодные цилиндры выполнены из материала геттера. Разрядная система помещена в периодическом магнитном поле встречно включенных соленоидов 3, разделенных магнитомягкими шайбами 4.

Для повышения скорости откачки конструкция выполнена на базе инверсного магнетрона. Разряд горит между внешним катодом и внутренним анодом, т.е. в межэлектродных промежутках, где силовые магнитные линии замыкаются на катоде, — это существенная зона откачки и ионизации, ее поперечный размер намного превосходит размер зоны, где силовые магнитные линии замыкаются на аноде и разряд малобинтенсивен. Катодные и анодные электроды расположены на различных фланцах, легко разнимаются, что удобно для чистки насоса.

В заключение следует отметить, что комбинация проходных магниторазрядных насосов с основными не требует выполнения в вакуумной камере электрофизической или технологической установки дополнительных фланцевых соединений, повышающих сложность ее изготовления, массу и стоимость.

2.2. Комбинированные насосы

Рассмотренный ряд принципов построения конструкций магниторазрядных насосов позволяет снизить аргоновую неустойчивость, уменьшить селективность откачки газов, повысить производительность, улучшить удельные массо-габаритные параметры, сделать насос дешевле и технологичнее.

Однако по сравнению с другим классом электрофизических насосов, сходным по принципу откачки, — испарительными геттерными насосами — магниторазрядные насосы имеют существенно меньшие удельные скорости

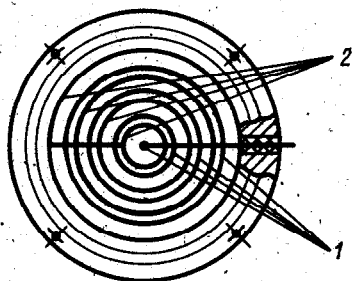
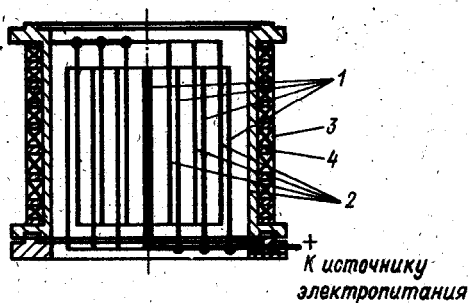


Рис. II. Принципиальная
схема комбинированного плазменного насоса

откачки, низкие давления запуска, что сужает область их применения. В свою очередь главным недостатком испарительных геттерных насосов является практически нулевая быстрота откачки инертных газов, а также затруднительность откачки остаточных газов с повышенным содержанием углеводородов.

Единая конструкция магниторазрядного и испарительного геттерного насосов позволяет в полной мере сочетать достоинства каждого, ликвидировав их недостатки, и получить качественно новый насос [28, 29].

С целью разъяснения и подтверждения преимуществ подобных комбинированных конструкций необходимо изложить практические основы работы испарительных геттерных насосов.

В испарительных геттерных насосах поглощение остаточных газов производится пленкой из материала активного геттера, непрерывно или периодически осаждаемой на развитой поверхности насоса. Механизм поглощения включает практически все виды сорбции, основными из которых являются химическая и физическая, в зависимости от откачиваемого газа [30].

В широко известных испарительных насосах напыление сорбирующей пленки производится следующими методами: испарением геттеризирующего электрода путем пропускания тока [31]; косвенным разогревом; распыле-

нием электрода электронной бомбардировкой [32] или вакуумной электрической дугой [33].

Основными недостатками испарителей прямого и косвенного накала являются их низкая надежность и инерционность. Низкая надежность обусловлена неравномерностью распыления собственно испарителя при прямонакальном нагреве и нагревателя при косвенном нагреве. При нагреве диодевым теплом в токопроводящем элементе, как правило, протяженном, практически всегда возникает места с повышенным омическим сопротивлением, которые распылятся быстрее, это ведет к обрыву испарителя или нагревателя, что уменьшает ресурс насоса. Косвенный нагрев испарителя способствует увеличению ресурса за счет применения металлов с низким коэффициентом распыления, однако это достижение стоит дополнительных затрат электроэнергии на передачу тепла от нагревателя к испарителю геттера. Инерционность насосов с нагревателями прямого и косвенного накала является их существенным недостатком и определяется тем, что после выключения испарителя необходимо некоторое время на разогрев электрода геттера до его активного распыления, а после выключения - время снижения температуры электрода геттера до полного прекращения распыления и остывания до 100...200 °C. Обычно оно составляет 0,1...0,2 ч. Это обстоятельство значительно ограничивает область применения насосов с подобными испарителями.

Насосы с геттерирующим электродом, который распыляется электронной бомбардировкой, свободны от недостатков, присущих насосам с испарителями прямого или косвенного накала. Однако при комбинации их с магнитоэлектронным откачным модулем имеются сложности совмещения магнитных полей управления электронным пучком и магнитных полей магнитоэлектронного модуля. Другим существенным недостатком насосов с электронно-лучевым испарителем является высокий процент капельной фазы в продуктах испарения, так как непосредственным источником испарения является макрокапля, полученная в результате расплава геттерирующего электрода электронной бомбардировкой. Наличие высокого процента капельной фазы существенно снижает эффективность использования геттерирующей пленки при откачке газов.

В отношении простоты изготовления, широкого диапазона скоростей и высокой равномерности испарения катода, практического отсутствия капельной фазы в продуктах испарения и высокой надежности испарителя особенно интересны насосы, базирующиеся на электродуговом испарителе. К достоинству электродугового насоса следует отнести и сам принцип его работы, основанный на одинаково стабильном горении электрического вакуумного дугового разряда в сколь угодно глубоком вакууме, поскольку разряд существует в собственных парах материала испаряемого катода.

На базе электродуговых испарителей титана создан ряд отечественных разработок геттерных плазменных насосов и агрегатов серий НДМ [33], АВЭД [34], ведутся работы по переоснащению электродугов-

ми испарителями насосов серии ЭИИИ [35]. Отличительными особенностями геттерных плазменных насосов являются высокие скорости откачки $S = 3... 50 \text{ м}^3/\text{с}$, низкие предельные остаточные давления $- 1,33 \times 10^{-6}... 1,33 \times 10^{-8} \text{ Па}$, высокие давления запуска (6,5 Па) и чрезвычайно низкие затраты электроэнергии, порядка $(1...5) \times 10^6 \text{ Дж/сутки}$.

Работа электродуговых геттерных насосов основана на поглощении остаточных газов геттерирующей пленкой, образованной распылением катода электрической вакуумной дугой. Работа таких насосов в вакуумных камерах без принудительного натекания газов наиболее рациональна в импульсном режиме. Время напыления τ собирающей пленки полностью определяется внутренней поверхностью насосов, подлежащей напылению, при условии равномерной диаграммы распыления испарителя, а также способностью испарителя нанести на стенки геттерную пленку толщиной в 5-10 монослоев атомов геттера. Время активной сорбции газов t зависит от давления газа P (Па) в камере, состава газа и суммарной сорбционной емкости напыленного геттера, т.е. фактически от площади напыляемой поверхности. По мере насыщения геттерной пленки цикл повторяется. Основные физико-технические расчетные параметры циклов работы электродуговых насосов по откачке азота и водорода при охлаждении сорбционных поверхностей проточной водой с температурой 15°C приведены в табл. 2 [36] для различной скорости откачки S ($\text{м}^3/\text{с}$), диаметра условного прохода DY (мм), высоты цилиндрической поверхности напыления h (мм). Расчет сделан при условии косинусоидальной диаграммы распыления катода, имеющего торцевую поверхность испарения, установленного в днище насоса и обращенного к входному отверстию, экранированному от влета паров геттера в вакуумную камеру, с учетом уменьшения проводимости входного отверстия на 30%.

Таблица 2
Физико-технические параметры электродуговых насосов

S_{N_2} , $\text{м}^3/\text{с}$	S_{H_2} , $\text{м}^3/\text{с}$	DY , мм	h , мм	τ , с	t , с		
					$P=1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$	$P=1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$	$P=1 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$
4	3	250	500	5	45×10^1	45×10^3	45×10^5
18	15	400	650	20	15×10^2	15×10^4	15×10^6
30	25	630	1100	30	28×10^2	28×10^4	28×10^6
75	60	1000	1600	80	72×10^2	72×10^4	72×10^6

Рабочий цикл насоса в режиме испарения состоит из трех операций: подачи напряжения холостого хода между катодом испарителя и анодом корпуса насоса; возбуждения сильноионизованной плазмы в прикатодной области, служащей для поджигания основного сильнооточного дугового

разряда; процесса горения дугового разряда с распылением геттеррирующего материала катодными пятнами дуги и с управлением их движением.

Напряжение холостого хода подается от источника электропитания с круто падающей характеристикой и составляет 70-100 В. Экспериментально установлено, что напряжение холостого хода существенно влияет на минимальный допустимый ток дуги и на стабильность разряда. В частности, минимальное напряжение холостого хода, при котором возможно возбуждение дуги, составляет 30-35 В. А при повышении напряжения холостого хода до 300-700 В минимальный допустимый ток горения дуги существенно снижается - вплоть до 20 А. Напряжение холостого хода 70-100 В, определенное в большинстве промышленных и лабораторных источников электропитания насосов, объясняется их удовлетворительными массой и габаритами, достаточной стабильностью горения дуги и тем, что такими параметрами обладают широко распространенные сварочные агрегаты электропитания, как правило, используемые в насосах.

После подачи напряжения холостого хода с целью поджига дуги в прикатодное пространство впрыскивается струю сильноионизированной плазмы. Поджигающая плазма в принципе может быть получена следующими способами: 1) воздействием на прикатодный электрод лучом лазера, 2) электронным пучком, 3) посредством высоковольтного пробоя изолятора с нанесенной электропроводящей пленкой, расположенной между катодом и поджигающим электродом, 4) путем кратковременного расконтактирования прикатодного электрода с катодом, с образованием вспомогательной дуги.

Два последних способа поджига наиболее распространены, просты и надежны в эксплуатации. Возбуждение разряда вспомогательной дугой при расконтактировании прикатодного электрода с катодом осуществляется от источника электропитания основного дугового разряда, образованная плазма гарантирует надежный поджиг. К недостатку этого способа следует отнести залипание прикатодного электрода к катоду, что существенно снижает надежность работы насоса в целом. Тем не менее такой способ поджига широко применяется в промышленных насосах серий ВЭД и агрегатах АВЭД. Эти насосы предназначены для работы практически в непрерывном режиме испарения, и частых включений для поджига не требуется.

Наиболее перспективным поджигом является внесение в прикатодную область плазмы от высоковольтного пробоя по поверхности керамики с предварительно нанесенной и самовосстанавливающейся токопроводящей пленкой. Экспериментально отработанные оптимальные параметры системы поджига составляют: электросопротивление пленки 1 Ом...50 кОм, амплитуда высоковольтного импульса 1,5...2,5 кВ, длительность - 0,1...1 мс, энергия 10...40 Дж. Благодаря широкому диапазону электросопротивлений пленки практически при любых длительностях испарения поджиг остается высоконадежным.

Испытания поджига с электронной бомбардировкой непосредственно катода-испарителя дали положительные результаты и показали высокую на-

дежность и большой ресурс поджигающего устройства. Поджиг осуществляется взрывомиссионным способом. Взрывная эмиссия происходит при подаче высокого напряжения между катодом и многостранным графитовым водокнистым электродом. Радиус острия составлял величину порядка 1×10^{-6} м, напряжение 16 кВ, количество острий порядка 1000.

После образования в прикатодной области поджигающей плазмы на испарителе образуются катодные пятна, являющиеся источником распыления материала и перемещающиеся в идеальном случае по всей испаряемой поверхности катода. Катодные пятна представляют из себя "микродуги" с температурой, близкой к критической (3000...5000 К), с характерным размером 10^{-2} ... 10^{-4} см и скоростью перемещения 1 ... 10 м/с. Направленные перемещения катодных пятен определяются двумя механизмами: перемещением под действием сил градиента собственного теплового потока [37] и перемещением под действием сил взаимодействия магнитных полей токов, протекающих по катоду, с магнитным полем тока, протекающего на анод через катодное пятно, в соответствии с принципом максимума индукции магнитного поля [38]. Первый механизм предполагает движение катодного пятна из горячей зоны в холодную, не дает пятну продолжительное время задерживаться на одном месте, создает видимость хаотичного перемещения катодных пятен и является дифференциальным для каждого пятна. Второй механизм является интегральным для катодных пятен, определяет их коллективное движение в сторону максимума тангенциальной к поверхности испарения составляющей индукции магнитного поля и образует зону преимущественного распыления катода и диаграмму распыления.

Управление движением катодных пятен и локализации зоны испарения в испарителях осуществляется двумя способами. Первый способ заключается в окружении испаряемой поверхности и других катодных электродов металлическим экраном [33] на расстоянии 0,5 - 5 мм, находящимся под плавающим потенциалом. Экранирование позволяет надежно выделить испаряемую поверхность и практически исключить выход катодных пятен на поверхность, не желательную для испарения. Второй способ предполагает наложение на испаряемую поверхность магнитного поля [39,40], подавляющего своей величиной результирующее поле взаимодействия магнитных полей токов, протекающих по катоду, с током на анод из катодного пятна, т.е. осуществляется магнитная стабилизация катодных пятен, кроме всего прочего позволяющая снизить минимальный допустимый ток горения вакуумной дуги. Оптимальные величины таких магнитных полей составляют $4 \cdot 10^{-3}$... $6 \cdot 10^{-3}$ Т. С целью надежного выделения испаряемой зоны целесообразно использование обоих способов управления катодными пятнами в совокупности.

Для титановых электродуговых насосов рабочие токи составляют 40...200 А, соответствующие им скорости испарения материала катода (титана) $2 \cdot 10^{-6}$... $1 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Практически во всем диапазоне рабо-

чек токов насосов скорость испарения является линейной функцией тока. Устойчивое горение дуги с токами выше 150 А осуществляется в испарителях без магнитной стабилизации, а с токами ниже 150 А - только при наложении на испаряемую поверхность магнитного поля. Выпускаемые промышленностью электродуговые насосы работают на токах 150-200 А (насосы серии НДМ, АВЗД), в лабораторных же условиях на аналогичных насосах достигнута устойчивая работа испарителей с магнитной стабилизацией полем соленоида или постоянных магнитов, позволяющей снизить рабочий ток до 40 А [39, 40].

Снижение рабочих токов в испарителях с магнитной стабилизацией существенно повышает технико-экономические показатели насосов в целом. Эффективнее производится полезный расход испаряемого геттера за счет снижения капельной фазы в продуктах испарения. Снижается обратный поток газов, ранее сорбированных на пленке геттера во время работы испарителя, сокращается почти в 5 раз расход электроэнергии и существенно уменьшаются габариты источника электропитания насоса.

В связи с изложенными основными принципами работы электродуговых геттерных насосов становятся очевидны достоинства их комбинации с магниторазрядными насосами. Комбинированный магниторазрядный и электродуговой геттерный насос позволяет существенно повысить эффективность каждого из откачных модулей, получить принципиально новое качество и решить конструктивную задачу по улучшению удельных массо-габаритных характеристик.

В зависимости от конструктивного исполнения и местоположения в комбинированном насосе откачных модулей достигаются:

- улучшение индивидуальной работы магниторазрядного откачного модуля;
- улучшение индивидуальной работы электродугового откачного модуля;
- новое физическое качество насоса;
- объединение магнитных систем электродугового испарителя и магниторазрядных ячеек.

С точки зрения улучшения работы магниторазрядного модуля существенным является место установки магниторазрядных откачных ячеек в насосе. Исходя из физики разряда следует выделить местоположение ячеек в зоне насоса, расположенной вне диаграммы распыления дугового испарителя и, наоборот, в месте активного напыления геттера. В первом случае, когда ячейки установлены по течению газового потока ниже зоны активного напыления геттера, активизируется откачка инертных газов, так как общий поток газов, попадающих в магниторазрядные ячейки, снижается за счет сокращения доли активных газов, поглощаемых пленкой геттера с испарителя. Во втором случае на аноды и катоды ячеек периодически в значительном количестве напыляется пленка геттера, что объективно способствует более прочному внедрению в катод ионов инертных

газов и замуровыванию на аноде активных газов. Эффект подпыления на катоде магниторазрядных ячеек положительно сказывается на устранении аргоновой нестабильности, что объясняется нанесением на катоды с внедренным аргоном свежей пленки геттера, которая в дальнейшем служит источником распыления в разряде ячеек, имеет структуру более рыхлую, чем первоначальный монолит катода, и активно проводит откачку инертных газов за счет более глубокого проникновения их ионов в катод. Кроме того, впрыскивание в разрядную область электронных пучков с электродугового испарителя вызывает значительную дополнительную ионизацию остаточного газа, что также способствует повышению эффективности откачки магниторазрядных ячеек.

Другим важным аспектом в работе комбинированных насосов является возможность ионизации и возбуждения атомов и молекул остаточных газов в высоковольтном разряде непосредственно перед сорбцией их пленкой геттера, напыленной с испарителя, при этом эффективность поглощения ионов и возбужденных молекул пленкой геттера значительно выше, чем нейтрального газа [30]. Этот принцип повышения эффективности откачки осуществлен в геттерных испарительных насосах типа ГИН путем введения специального высоковольтного конвектора [41] или ультразвукового излучателя-ионизатора [42]. Поэтому наиболее эффективной в комбинированном плазменном насосе является установка магниторазрядного модуля непосредственно во входном сечении насоса. Еще одно достоинство конструкции - экранирование от паров геттера откачиваемой вакуумной камеры.

При энергии электронов до 20 эВ и плотности плазмы $10^{10} \dots 10^{14}$ см⁻³ [14] практически весь проходящий в насос газ концентрируется или возбуждается, ионы ускоряются электрическим и магнитным полями до энергии 300-700 эВ [43], за счет столкновений выходят из магниторазрядного модуля и активно внедряются в пленку геттера, нанесенную при работе испарителя.

Для эффективной работы комбинированного насоса такого типа необходимы пропускание газа в дуговой откачной модуль через зону разряда магниторазрядного модуля и достаточная газодинамическая проводимость последнего. Этим требованиям отвечает магниторазрядное устройство [27], состоящее из чередующихся аксиальных цилиндрических электродов, расположенных в продольном магнитном поле.

Принципиальная схема комбинированного плазменного насоса, состоящего из электродугового модуля и магниторазрядного аксиального модуля, установленного во входном сечении насоса, представлена на рис.12. Насос состоит из корпуса 1, в котором размещен испаритель геттера 2. Во входном сечении насоса установлены взаимно изолированные электроды 3 и 4, которые совместно с соленоидом или постоянными магнитами 5 образуют магниторазрядные ячейки. Электроды 3 и 4 могут быть расположены в насосе в соответствии с любой общепринятой принципиальной схемой, обеспечивающей защиту откачиваемого объема от паров геттера: жалези,

шеврон, набор частично перекрывающихся колец и т.п., причем взаимное расположение этих электродов и магнитов 5 должно обеспечивать наличие скрещенных векторов напряженности электрического и магнитного полей в межэлектродном пространстве. В частности, электроды 3 и 4 выполнены в виде шевронов, а магнитное поле создается соленоидом 5. Электроды 3 изготовлены из материала геттера, например титана, и электрически связаны с заземленным корпусом насоса. Электроды 4 выполнены из любого электропроводящего материала, например магнитной нержавеющей стали, и электрически связаны с положительным полюсом высоковольтного источника питания (указатель а). К электроду испарителю подведено электропитание от отрицательного полюса сильноточного источника питания (указатель б), корпус насоса заземлен. Вследствие интенсивных испарительных процессов в насосе изоляторы всех тоководов и особенно изоляторы, разделяющие электроды 3 и 4, защищены экранами, исключающими попадание продуктов испарения.

Работа насоса осуществляется следующим образом. По достижении в камере давления $10 \dots 5$ Па откачкой форвакуумным насосом включается электродуговой откачной модуль, производится периодическое напыление пленки геттера с последующим поглощением остаточных газов. На электроды 4 подается положительный потенциал $5-10$ кВ от высоковольтного источника питания и при наличии внешнего магнитного поля с индукцией $5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Т образуется плазма тлеющего разряда. Ток разряда определяется давлением газа и снижается с уменьшением давления. Диапазон изменения токов с применением высоковольтного блока питания типа БП-0,25 составил $0,6 \dots 5 \cdot 10^{-4}$ А при напряжениях $200-7500$ В и давлениях $10 \dots 1 \cdot 10^{-6}$ Па. Следует отметить, что в диапазоне давлений $10-5$ Па разряд стабильно существовал и без внешнего магнитного поля, при этом токи разряда составляли $0,6-0,2$ А и существенно не изменялись с включением магнитного поля. При снижении давления до $3-1$ Па при выключенном магнитном поле разряд прекращался.

В комбинированном режиме распыления геттера с электродугового испарителя при включенном магниторазрядном модуле плазма электродугового разряда шунтирует плазму тлеющего разряда в магнитном поле. Наблюдаются резкое падение напряжения в магниторазрядном модуле до $200-400$ В и рост тока разряда до $0,5-0,6$ А. При прекращении работы электродугового испарителя первоначальные параметры тлеющего разряда восстанавливаются. Резкое увеличение тока и падение напряжения в магниторазрядном модуле объясняются впрыскиванием в зону его разряда вместе с нейтральными частицами геттера потока ионов, составляющих до 95% в продуктах испарения.

В комбинированном режиме работы поглощение газов пленкой геттера, нанесенной с электродугового испарителя на стенки корпуса насоса с выключенным испарителем и магниторазрядным модулем, происходит

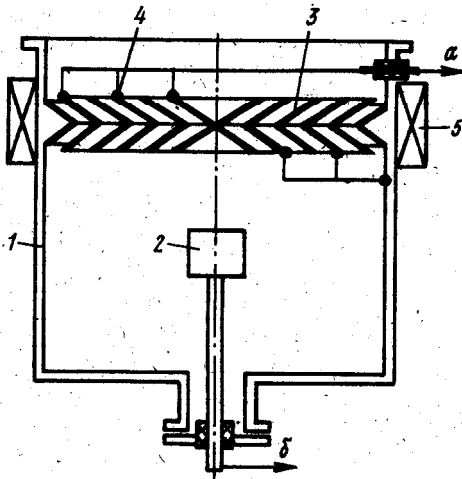


Рис. 12. Принципиальная конструктивная схема комбинированного плазменного насоса

следующим образом. Электроны, образованные в зоне между электродами 3 и 4, перемещаясь в скрещенных электрическом и магнитном полях, ионизуют газ в магниторазрядном откачном модуле. Ионы ускоряются в сторону катодов и расширяют их. Геттер, распыленный из катодов, осаждается на анодах и вместе с механизмом внедрения ионов в катод обеспечивает частичную откачку газового потока, попадающего в насос. Наряду с ионизацией в магниторазрядном модуле происходит возбуждение атомов и молекул газа. Возбужденные молекулы и ионы попадают внутрь насоса и поглощаются пленкой геттера, нанесенной на стенки корпуса I с испарителя 2. В связи с предварительной ионизацией и возбуждением газа у комбинированного насоса появляется новое качество - возможность эффективной откачки углеводородов. Ни магниторазрядный, ни испарительный геттерный насосы индивидуально не способны эффективно откачивать большинство углеводородов, особенно тяжелых. В магниторазрядном насосе при откачке ряда углеводородов на анодах возникает нагар, в результате чего анодный электрод покрывается диэлектрической пленкой и, кроме того, нагар попадает на изоляторы, разделяющие анод и катод, что выводит насос из строя. В электродуговом насосе углеводороды, сорбируемые пленкой геттера, в силу низкого коэффициента прилипания - от 0,005 до 0,0004 [44] непрочны соединяются с пленкой геттера. При выдлении электродугового испарителя, под действием теплового нагрева и эллионного удара, молекулы выделяются с геттерирующей пленки и разлагаются, что сопровождается резким увеличением давления.

В комбинированном плазменном насосе (см. рис. 12) углеводороды в плазме тлеющего разряда разлагаются на свободные атомы, ионы и ионы-

- радикалы [26], главным образом на радикалы типа $-C \equiv C-$, водорода H_2, H и паров воды. Водород и пары воды имеют высокие коэффициенты прилипания на пленке титана - 0,2 и 0,99 соответственно и хорошо сорбируются. Откачка ионов радикалов производится за счет их ускорения в магниторазрядном модуле, вылета из него с высокой энергией и глубокого внедрения в пленку геттера, напыленную с электродугового испарителя.

В качестве дополнительного положительного эффекта комбинированных плазменных насосов следует отметить единую магнитную систему электродугового и магниторазрядного откачных модулей, в которой основной магнитный поток обеспечивает работу магниторазрядных ячеек, а поток рассеяния служит для магнитной стабилизации катодных пятен вакуумной дуги испарителя, что обеспечивает компактность и простоту изготовления насоса.

В ы в о д ы

1. Осесимметричные магнетронные и инверсно-магнетронные насосы позволяют получить лучшие удельные массо-габаритные характеристики по сравнению с насосами на основе ячейки Пеннинга, являются простыми в изготовлении и позволяют устранить вредное взаимное влияние магнитных полей собственно насоса и откачиваемой им установки.

2. Для получения высокой скорости откачки перспективным является насос, состоящий из нескольких чередующихся коаксиальных анодных и катодных цилиндров, помещенных в продольное магнитное поле, расположенных один внутри другого и имеющих общую ось симметрии.

3. Проходные осесимметричные магниторазрядные устройства могут служить в качестве систем, осуществляющих разложение тяжелых углеводородов, вредных для откачных средотв, на водород H_2, H , пары воды и ионы радикалов типа $-C \equiv C-$, а также, в самом общем случае, могут являться ионизаторами газа.

4. С целью существенного повышения скорости откачки практически по всем газам, улучшения удельных массо-габаритных характеристик, повышения давления запуска необходимо комбинировать магниторазрядный откачный модуль с испарительным геттерным насосом. Для эффективной откачки газовых сред с повышенным содержанием углеводородов и для повышения эффективности испарительных геттерных насосов целесообразна установка магниторазрядного откачного модуля во входном сечении испарительного насоса.

3. МАГНИТОРАЗРЯДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОИНОГО ДАВЛЕНИЯ

Низкие и сверхнизкие давления измеряют в настоящее время ионизационными манометрами с горячим катодом и магниторазрядными манометрами. Магниторазрядные манометры по сравнению с ионизационными весьма просты по устройству, долговечны, невосприимчивы к механическим перегрузкам, безразличны к ориентации в пространстве, устойчивы к аварийному попаданию атмосферного воздуха в работающий прибор. В магниторазрядных манометрах, как и в ионизационных, для измерения давления используется зависимость тока разряда от концентрации молекул газа в разрядном промежутке.

К основным качественным характеристикам магниторазрядных преобразователей можно отнести следующие: основная относительная погрешность, диапазон рабочих давлений, чувствительность, постоянная времени, возмущающее действие на объект, устойчивость против внешних воздействий. Частично эти параметры для различных модификаций преобразователей рассмотрены в литературе [45-48].

Рассмотрим последовательно перечисленные критерии.

Погрешность измерений связана в основном с флуктуациями питающего напряжения, нестабильностью поверхностных свойств электродов, разбросом рабочих параметров постоянных магнитов, влиянием внешних факторов, отключающим действием самого манометра, малой вакуумной проводимостью соединительных патрубков и пр. Здесь же отметим большое влияние на точность спектрального состава газовой смеси в случае, если калибровка манометров производилась по другому составу. Остается проблемой точное измерение давления в атмосфере остаточных газов, содержащих пары углеводородов и других органических соединений. Нестабильность показаний ведет к полной потере работоспособности преобразователя. В этом случае наилучшим является применение самоочищающихся преобразователей, работающих на переменном токе. Для уменьшения влияния отключающего действия следует применять преобразователи открытого типа.

Рабочие давления магниторазрядных манометров перекрывает диапазон от 1 до 10^{-8} Па (табл.3), используемый в промышленном, технологическом и лабораторном оборудовании. Однако промышленность не выпускает преобразователи, рассчитанные на измерение разрежения выше 1 Па и предельно достижимого криогенного вакуума ниже 10^{-8} Па. Верхняя граница измеряемых давлений связана главным образом со слабой чувствительностью (логарифмическая зависимость значений тока от измеряемого давления) и ограниченной мощностью источника питания. Нижняя граница - определяется чисто физическими условиями поддержания стабильности протекания очень малых токов за счет поперечной диффузии.

Таблица 3

Технические характеристики распространенных
в СССР магниторазрядных вакуумметров

Параметры	Марка вакуумметра						
	ВЭМБ-1	ЭМБ-8	ЭМБ-10	ЭМБ-11	ЭМБ-12	ЭМБ-14	ЭМСБ-12
Диапазон рабочих давлений, Па	10^{-3} - 10^{-2}	10^{-7} -1	10^{-4} -1	10^{-8} - 10^{-1}	10^{-4} -1	10^{-7} -1	10^{-6} - 10^{-1}
Погрешность измерения, %	+60	-40 +30	+60 -90	-40 +110	-50 +80	-40 +80	-50 +100

Приведенные в таблице конструкции перекрываются по диапазону рабочих давлений и имеют близкие значения погрешности, что затрудняет разработку универсальной конструкции.

Чувствительность магниторазрядных манометров во много раз выше конвизиционных и составляет 20-50 А/торр. Чувствительность в значительной степени зависит от индукции магнитного поля, а это требует очень тщательного выбора положения магнита относительно электродов ячейки и его надежной юстировки. Недостатком рассматриваемых приборов является зависимость чувствительности от давления, колебаний электрических зарядов, а также скачки токов, зависимость показаний от "истории" преобразователя, например времени горения, вида ранее измеряемого газа и т.д. Чувствительность манометра растет с увеличением прикладываемого напряжения. В манометрах для измерения очень низких давлений анодное напряжение обычно превышает 4 кВ.

Постоянная времени магниторазрядных преобразователей мала и часто не превышает 0,01-0,05 с, что позволяет с успехом применять эти измерители в системах промышленной автоматики и космических исследованиях. Однако большим недостатком манометров является затрудненность зажигания при высоком вакууме, когда электрическая цепь питания разряда разомкнута, а потом снова замыкается. Время самостоятельного зажигания при давлениях 10^{-8} Па может достигать десятков минут. Для быстрого срабатывания в этом случае применяют либо внешний инициатор разряда: высоковольтный электрически импульс газа, импульс электронов от горячего катода, небольшой α -радиоактивный источник и т.д.

Возмущающее действие на объект и устойчивость к внешним воздействиям у магниторазрядных преобразователей определяются взаимосвязью собственных и внешних электромагнитных полей. В необходимых случаях применяется специальная экранировка.

Основные направления разработки и проектирования магниторазрядных преобразователей сводятся к расширению пределов измерения в сторону низких и высоких давлений, повышению чувствительности, обеспечению линейности, облегчению зажигания разряда, исключению скачков и разрывов характеристики, повышению надежности при работе в масляной атмосфере и возможности измерения не только полного, но и парциального давления.

3.1. Манометры открытого типа

Ток разряда в магниторазрядных ячейках пропорционален концентрации частиц в разрядной области. Однако при быстрых изменениях давления, а также вследствие газовыделения, отталкивающего действия самой ячейки, малой проводимости трубопроводов, соединяющих область разряда с откачиваемым объемом, давление внутри ячейки отличается от давления в вакуумном объеме. Расчеты геометрии и параметров электрического и магнитного полей проводятся на основе учета коллективных колебательных процессов в разряде [49, 50] или траекторным, более простым способом [51-55].

Решение поставленной выше задачи может быть найдено путем создания открытых конструкций с сильно неоднородным магнитным полем (рис. 13).

Максимально возможную пропускную способность обеспечит сетчатый экран, отделяющий вакуумный объем от разрядной камеры. Постоянный магнит, традиционно размещаемый снаружи манометра, можно поместить во внутренний катодный цилиндр. При таком конструктивном решении магниторазрядная ячейка обладает весьма малой газокинетической постоянной, а ее откачка или газовыделение перестает играть какую-либо заметную роль в установлении равновесия по обе стороны анодной сетки.

Базовой моделью открытых магниторазрядных ячеек с неоднородным магнитным полем является сферическая конструкция [21, 56], изображенная на рис. 13(1) и 14. Все другие варианты [48, 57, 58] являются ее модификациями. Ячейка содержит сферический катод 1, помещенный на штанге 2 в сетчатый сферический анод 3. Внутри катода укреплен постоянный магнит 4 в виде таблетки из сплава самарий-кобальт. Ясно, что при достаточно большом радиусе анода 3 магнитные силовые линии пойдут по сфере так, что выполнятся все три вышеуказанных условия (см. рис. 1). Разряд в подобной ячейке поддерживается во всем объеме анода 3, за исключением узких ($\sim 30^\circ$) конусов вблизи полюсов магнита.

Достоинством этого манометра кроме малой газокинетической постоянной является независимость его показаний от ориентации при измерении давления в потоках газа, недостатком - невозможность нагрева свыше 150°C из-за наличия магнитов в вакууме.

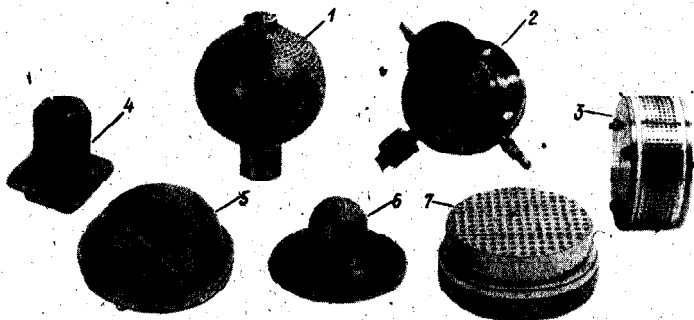


Рис.13. Внешний вид открыты магниторазрядных манометрических преобразователей

1 - сферическая ячейка; 2 - преобразователь с сильно неоднородным периодическим магнитным полем; 3 - плоский, открытого типа; 4 - цилиндрический; 5 - с полусферическим анодом; 6 - пролетного типа для измерения параметров потока; 7 - с сильно неоднородным магнитным полем с надужным магнитом

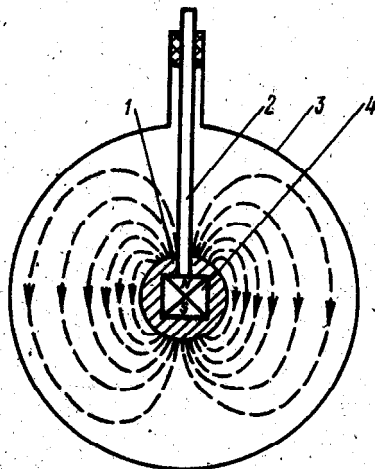


Рис.14. Схема сферической магниторазрядной ячейки с неоднородным магнитным полем

Для обеспечения высокотемпературного прогрева постоянные магниты должны удалиться из манометра без нарушения вакуума. В качестве примера опишем конструкцию такого типа. На рис. 13 (5) и 15 показан магниторазрядный манометр открытого типа в виде половины сферической ячейки. Плоский катод 1 помещен в вакууме внутри полусферического анода 2. Магнит 3 вместе с магнитопроводом 4 примыкает со стороны атмосферы к фланцу 5. Работа манометра изменится мало, если полусферический анод 2 заменить на плоский, установленный параллельно катоду 1. Свечение разряда наблюдается в виде широкого кольца в области перпендикулярности электрического и магнитного полей.

На рис. 16 приведены зависимости тока разряда от давления воздуха в открытых магниторазрядных ячейках.

Интересной конструкцией прибора для определения параметров потока сильно разреженного газа (рис. 17, а) является совмещение манометров (см. рис. 13 (2), 14). Катод представляет собой куб из магнитомягкого материала. В одной из граней куба укреплен держатель в виде полую штангу. На пяти других гранях в углублениях помещены электрически изолированные от катода постоянные магниты в виде таблеток из сплава самарий-кобальт, заключенных в фигурные экраны. Каждый экран имеет отдельный вывод через полую штангу. Весь катод окружен сферическим сетчатым анодом. Разряд между катодом и анодом существует в виде кольцевых зон, светящихся под арочным магнитным полем на поверхности фигурных экранов. При помещении прибора в поток газа ток каждого сектора зависит от ориентации датчика и позволяет определить углы атаки.

Манометр (рис. 17, б) представляет собой магнетрон с убывающим к аноду магнитным полем. Его ток довольно мал при низких давлениях. Манометр может быть рекомендован для измерения средних давлений $1 \dots 10^{-4}$ Па.

3.2. Самоочищающиеся манометры

В настоящее время давление в вакуумных системах измеряют, как правило, двумя манометрами. Один из них предназначен для работы в области предварительного разрежения до 1 Па, а другой - в области высокого и сверхвысокого вакуума. В первом случае обычно используется термометрический преобразователь типа ПМТ-2, а во втором случае применяют ионизационные манометры с горячим катодом типа ПМИ-2 либо магниторазрядные. Последние обладают существенными преимуществами по сравнению с ионизационными: они весьма просты по конструкции, долговечны, устойчивы к вибрациям, ударам и попаданию в работающий манометр атмосферы.

Одним из главных недостатков магниторазрядных манометров, ограничивающих их более широкое распространение, является нарастающая со временем нестабильность показаний и ухудшение зажигания. Чаще

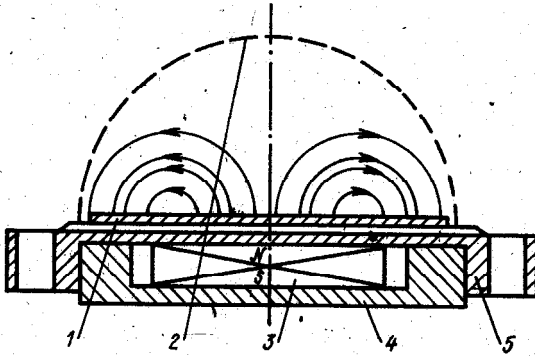


Рис.15. Схема магнеторазрядного манометра с полусферическим и плоским анодами

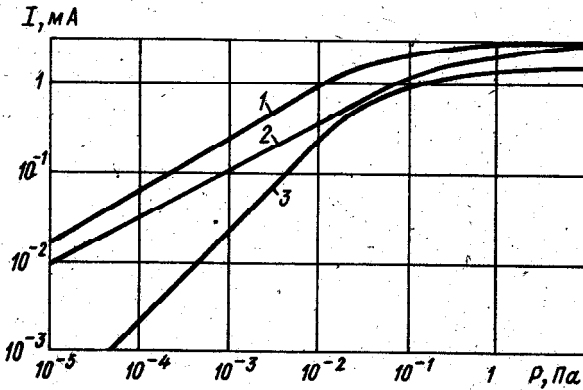


Рис.16. Зависимость тока разряда от давления воздуха в открытых магнеторазрядных ячейках
1 - сферическая; 2 - с плоским анодом;
3 - с сильно неоднородным периодическим магнитным полем $U_a = 2$ кВ

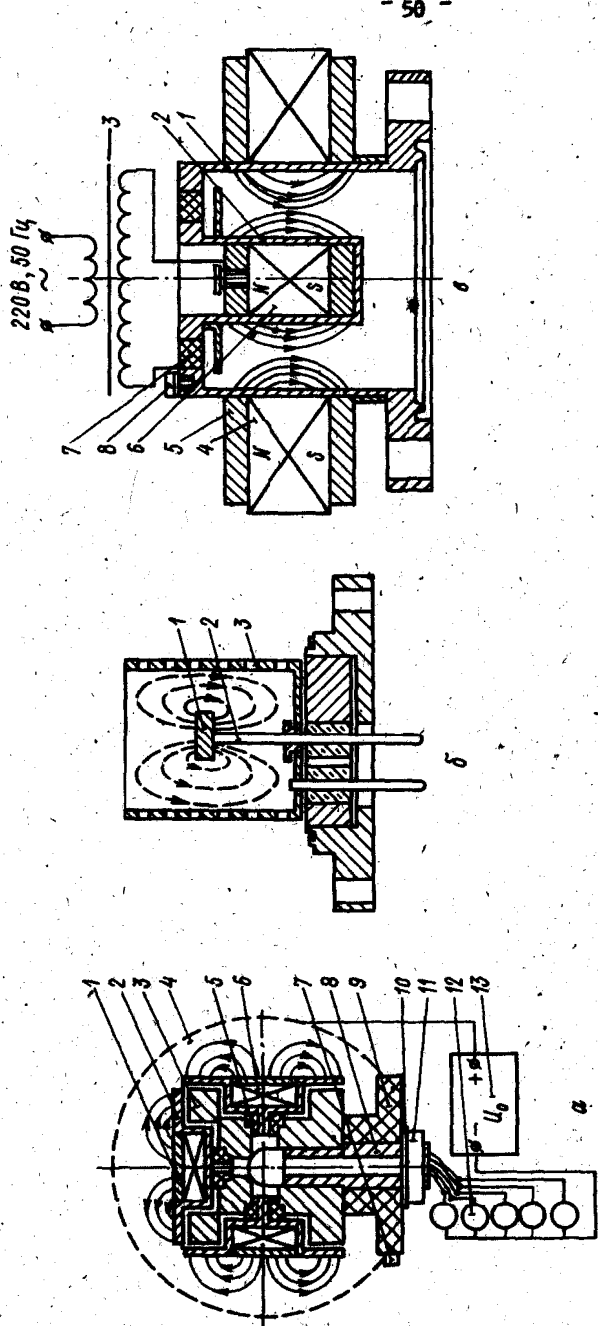


Рис. 17. Схемы магнетронных преобразователей давления (манометров) с неоднородными магнитными полями
 а - детали измеренных параметров потока слабо разреженного газа; 1 - магнетонная ванна; 2 - фигурный шайба; 3 - куб из магнетонного материала; 4 - ферритовый сегментный анод; 5 - керамическая шайба; 6 - магнит; 7 - винт; 8 - трубка; 9 - изолятор; 10 - шайба; 11 - гайка; 12 - керамическая ванна; 13 - источник высокого напряжения; б - манометр открытого типа; 1 - катод - талочный электрод; 2 - штырь; 3 - анод; 4 - манометр на переменном токе; 1 - корпус; 2 - полный электрод; 3 - высоковольтный трансформатор; 4 - магнит; 5 - шайба; 6 - внутренний магнит; 7 - изолятор; 8 - винт
 в - манометр на переменном токе; 1 - корпус; 2 - полный электрод; 3 - высоковольтный трансформатор; 4 - магнит; 5 - шайба; 6 - внутренний магнит; 7 - изолятор; 8 - винт
 г - манометр на переменном токе; 1 - корпус; 2 - полный электрод; 3 - высоковольтный трансформатор; 4 - магнит; 5 - шайба; 6 - внутренний магнит; 7 - изолятор; 8 - винт

все это связано с появлением на аноде диэлектрических пленок в результате полимеризации на поверхности металла паров масел и других органических соединений под действием электронной бомбардировки. Обычно в этом случае манометры приходится разбирать и чистить электроды вручную. На катодах магниторазрядных манометров подобные пленки не образуются, так как их поверхность постоянно распыляется под действием ионной бомбардировки. Поэтому естественны попытки использования катодного распыления и для очистки анода путем питания разряда переменным током. Однако проведенные ранее разработки не привели к созданию манометра, эффективно работающего в масляной атмосфере. В одном случае процесс самоочищения мог поддерживаться лишь в узком рабочем диапазоне, в другом - он был связан с временным отключением манометра от измерительной цепи, в третьем случае выявлены большая погрешность измерений и невозможность работы при давлениях ниже 10^{-4} Па [48, 58, 59].

Самоочищающийся манометр на переменном токе (рис. 13(3) и 17, в) непосредственно подключается к высоковольтному трансформатору [60]. Электроды 1 и 2 поочередно служат то катодом, то анодом и в течение каждого полупериода соответственно самоочищаются распылением.

Манометр (рис. 18) содержит двухкамерную магниторазрядную ячейку, питаемую переменным током. Ячейка содержит три изолированных сосуда цилиндра 1, 2, 3, помещенных между плоскими торцевыми катодами 4, 5 в осевом магнитном поле [61].

Манометр работает в двух режимах. При измерении степени предварительного разрежения (низкий вакуум, НВ) переключатель находится в положении НВ. Высокое напряжение при этом подается на внутренний цилиндр 1, а наружный цилиндр 3 соединяется с миллиамперметром 9. Разряд во внутренней камере служит источником ионов, которые через сетчатый цилиндр 2 проходят к цилиндру 3. Собираемый им ток служит мерой прозрачности газа в пространстве дрейфа для проходящего потока ионов, а следовательно, и мерой плотности газа внутри манометра. Частота столкновений ионов с молекулами остаточного газа зависит от скорости дрейфа и рода газа. В плотном газе значительны потери заряда ионами за счет перезарядки на нейтралах. Все эти факторы приводят к тому, что градуировочная характеристика в режиме НВ нелинейна.

Измерение высокого вакуума в режиме самоочищения производится переключением выключателя в другое положение (ВВ). Сетчатый цилиндр 2 и соединенные друг с другом цилиндры 1 и 3 присоединяются к концам высоковольтной обмотки трансформатора 7, средняя точка которой соединена с положительной клеммой источника постоянного напряжения 8. Отрицательная клемма этого источника заземлена через миллиамперметр 9. Амплитудное значение переменного напряжения трансформатора 7 должно быть близким к выходному напряже-

ние источника 8.

При максимальном напряжении на высоковольтной обмотке трансформатора 7 цилиндры 1 и 3 являются анодами, а сетчатый электрод 2 катодом, так как его потенциал близок к потенциалу торцевых катодов 4,5. В этот момент происходит очистка ионной бомбардировкой среднего цилиндра 2. Уменьшение амплитуды переменного напряжения до нуля приводит к выравниванию потенциалов на всех цилиндрах. Их потенциал равен потенциалу, создаваемому источником постоянного напряжения 8. Обе камеры работают в режиме минитрона, и очистка ионной бомбардировкой подвергаются только торцевые катоды 4 и 5. Дальнейшее изменение переменного напряжения приводит к тому, что высокое положительное напряжение, равное сумме напряжений, создаваемых трансформатором 7 и источником 8, подается на средний цилиндр 2, который и служит анодом для обеих камер. Разность напряжений трансформатора 7 и источника 8, равная нулю при максимальном значении переменного напряжения, подается теперь на цилиндры 1 и 3. Эти электроды теперь служат катодами и очищаются ионной бомбардировкой.

Таким образом, за полный период переменного напряжения катодным распылением поочередно очищаются все цилиндрические электроды манометра. Торцевые электроды очищаются непрерывно, так как они все время служат катодами. Разряд в манометре при этом поддерживается постоянно в отличие от всех ранее предложенных схем. Поэтому здесь не возникает трудностей с зажиганием вплоть до самых низких давлений, при которых еще проводились испытания, $\sim 10^{-5}$ Па.

Градуировочная характеристика манометра получена путем сравнения его с ионизационным преобразователем ПМИ-2 с погрешностью 5% (рис.19). На рис.20 показан внешний вид прибора.

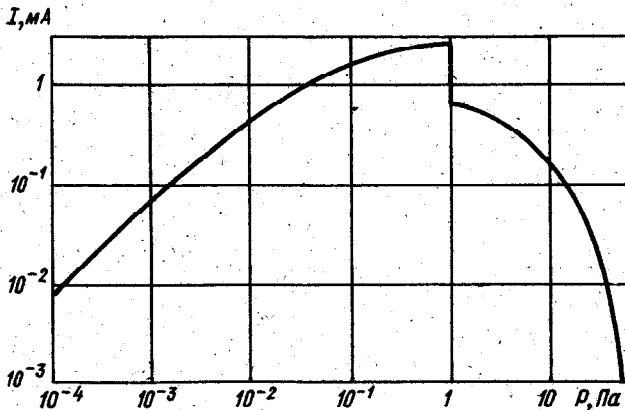


Рис.19. Градуировочная характеристика манометрического преобразователя

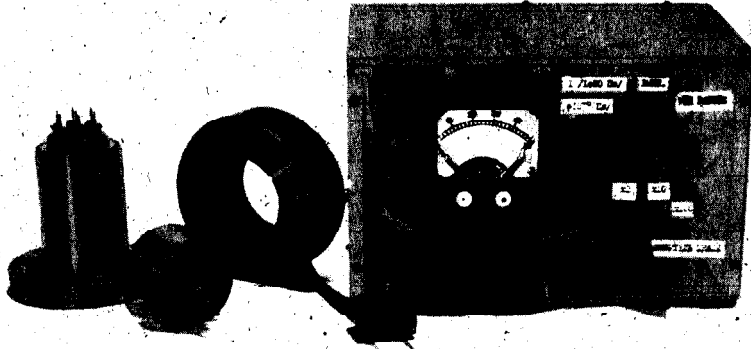


Рис.20. Магнетрический преобразователь

В ы в о д и

1. Магнеторазрядные преобразователи давления открытого типа обеспечивают повышенную точность измерений, особенно в динамических условиях.

2. Работа преобразователей в режиме самостимуляции при питании электродов переменным током позволяет измерить давление газов, содержащих пары масел и других органических соединений.

3. Магнеторазрядные ячейки, в которых предусмотрен вывод части ионного тока с измерением степени прозрачности пространства дрейфа, могут использоваться при относительно больших давлениях.

4. Установка преобразователей открытого типа во взаимно перпендикулярных направлениях создает возможность измерения динамических параметров потоков газов.

З а к л ю ч е н и е

Теоретическое рассмотрение физико-технических аспектов вопроса поведения плазмы тлеющего разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях выявило зависимость для тока разряда в различных конструкциях магнеторазрядных приборов (7)-(12), при этом установлена связь тока с индукцией магнитного поля, напряженности электрического поля, геометрии электродов. Теоретические выводы подтверждены экспериментом.

Проведенный обзор литературы позволил рассмотреть ряд принципов построения конструкций насосов, манометров, специфику их работы, выявить их достоинства и недостатки.

В частности, по насосам существенными являются возможности улучшения их удельных массо-габаритных характеристик, снижение эффекта аргоновой нестабильности, введение селективности откачки путем незначительных изменений и дополнений широко известных конструкций. Рассмотрена задача значительного повышения производительности насосов с получением эффекта интенсивной откачки всех газов, в том числе и углеводородов, повышения давления запуска путем комбинации магнито-разрядного проходного откачного модуля с испарительным геттерным насосом, в частности электродуговым. Эффект достигнут за счет активизации сорбирующих свойств пленки геттера, нанесенной испарителем, по отношению к возбужденным, ионизованным и разложенным в тлеющем разряде газам.

Отмечена тенденция к разработке самоочищающихся манометрических преобразователей с высокой вакуумной проводимостью - открытого типа. Подобные конструкции позволяют увеличить надежность измерений, в частности в средах с повышенным содержанием углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Penning F. M. Ein neues Manometer für niedrige Gasdrücke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm. - *Physica*, 1937, Bd.4, Nr.2, S. 71-75.
2. 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.253-259.
3. Пакулин В. Н. Оценка тока разряда в скрещенных Е1В полях. - В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Вып. I (15). - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981, с.29-34.
4. Пакулин В. Н. Магнеторазрядный манометр с усилением тока. - В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Вып. I (15). - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981, с.45-46.
5. Кервалливили Н.А., Кортхошня В.П. Особенности разряда низкого давления в скрещенных Е1В полях в магнетроне и ячейке Пеннинга. - *Журнал технической физики*, 1975, т.45, № 12, с.2557-2562.
6. Hall L.D. Ionic vacuum pumps. - *Science*, 1958, v.128, No.3319, p. 279-285.
7. Hall L.D. Electronic ultra-high vacuum pump. - *Review of Scientific Instruments*, 1958, v.29, No. 5, p.367-370.
8. Карпов Д. А., Контор Е. И., Таленский О. Н. Магнитные электроразрядные насосы с холодными катодами. - *Приборы и техника эксперимента*, 1964, № 2, с.5-7.
9. Hall L.D. Properties and behaviour of electronic ultra high vacuum pumps. - *Trans. of the 5th (Chicago-1958) Vacuum Symp. Amer. Vac. Soc.* - Boston: Pergamon Press, 1959, p.158-161.
10. Warrington A.E., Francis A.B. Contamination of sputter-ion pumps. - *Le Vide*, 1963, v.18, No.104, p.189-191.
- II. Вакуумные системы и их элементы: Справочник-атлас./Под ред. В.Д.Дубенца. - М.:Машиностроение, 1968.-321 с.
12. Knaueg W., Stack E.R. Alternative ion pump configuration derived from a more thorough understanding of a Penning discharge. - *Trans. 10th (Chicago-1963) Vacuum Symp. Amer.Vac.Soc.* - Boston: Pergamon Press, 1964, p.180-183.
13. А.с. 775791 (СССР). Магнеторазрядный насос /Авт.изобрет.В.Н.Пакулин. - Заявл.18.07.78.Опублик.в Б.И., 1980, № 40; МКИ НОИ; 41/12.

14. Современные магнетронные распылительные устройства: обзор/В.А. Дабужков, Н.И.Данькович, А.С.Уксусов и др. - Загубежная электронная техника. Вып.10 (256). - М: ЦНИИ "Электроника", 1982, с.3-12.
15. Пат.3216652 (США). Ionic vacuum pump. / W. Krauer. - Заявл.10.09.1962. Оpubл.09.11.1965; МКИ Н01J ; НКИ 230-69.
16. Васильев Г. А. Магниторазрядные насосы. - М: Энергия, 1970, с.44-49.
17. А.с. 593264 (СССР). Магниторазрядный насос /Авт.изобрет.В.Н.Пакулин. - Заявл.11.12.74. Оpubл. в Б.И., 1978, №6; МКИ Н01J ; 41/12.
18. А.с. 340791 (СССР). Вакуумный магнитный электроразрядный насос/ Авт.изобрет.Е.В.Глушаченков, Г.Г.Лебедев, Н.А.Мухачев. - Заявл. 28.10.1967. Оpubл. в Б.И., 1972, № 18; МКИ F 04g 4/00.
19. Schurman W. Investigation of a low pressure Penning discharge. - Physics, 1967, v.36, No.1, p.136 - 138.
20. Пакулин В. Н. Магниторазрядный манометр с усложнением тока. - В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Вып.1(15). - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981, с.45-46.
21. Пакулин В. Н. Открытые магниторазрядные ячейки. - В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер.Общая и ядерная физика. Вып. I (15). - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981, с.51-54.
22. Пакулин В. Н. Магниторазрядные ячейки с периодическим неоднородным магнитным полем. - Приборы и техника эксперимента, 1979, № 4, с.202-203.
23. А.с.637749 (СССР). Магниторазрядный манометр/Авт.изобрет. В.Н. Пакулин. -Заявл.13.06.77.Оpubл. в Б.И.,1978,№ 46;МКИ F01L 21/34.
24. Schon T.S., Mc Cafferty D. Pumping behaviour sputter ion pumps. - Journal of Vacuum Science and Technology, 1981, v.18, No.3, p.1148 - 1151.
25. Hantwing H., Kourtsidis A.S. A new approach for computing diode sputter- ion pump characteristics. - Journal of Vacuum Science and Technology, 1974, v.11, No.6, p.1155-1159.
26. Штромбергер Д. В., Аношкин А. В. К механизму откачки углеводородов магнитными электроразрядными насосами.- В сб.:Вопросы электронной техники. Вып.3. - Саратов: Саратов.ун-т, 1973, с.108-113.
27. А.с.945925 (СССР). Магниторазрядный насос /Авт.изобрет. А.С.Кузнец, А.М.Шерешевский, З.К.Менбаев. - Заявл.03.11.1980. Оpubл. в Б.И., 1982, № 27, МКИ Н01J ; 41/00.
28. Дороднов А.И., Минайчев В. Е., Мирошкин С. И. Высоковакуумный плазменный насос. - Приборы и техника эксперимента, 1980, № 6, с.126-128.

29. А.с.970510 (СССР). Комбинированный ионно-геттерный магниторазрядный насос /Авт.изобрет. А.С.Гуревич, Г.Л.Саксаганский. - Заявл. 27.04.1981. Оpubл. в Б.И., 1982, № 40; МКИ НОI } 4I/20.
30. Черепнин Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике.- М.: Советское радио, 1973, с.387.
31. Глушаченков Е. В., Островка С. Д., Мухачев Н. А. Сверхвысоковакуумный электроразрядный геттеромонный насос ЭИИИ-800/100. - В сб.:Физика и техника вакуума.- Казань: Изд -во Казанского ун-та, 1974, с.423-428.
32. Okano T., Aishima K., Tomiyaga G. A tantalum evaporation pump. - Proceedings of the 7th Intern. Vacuum Congress and the 3rd Intern. Conference on Solid Surfaces (Vienna -1977). - Vienna: Pergamon Press, 1977, v.1, p.81-85.
33. Высоковакуумные испарительные геттерные насосы с нанесением сорбирующих пленок плазменным напылением /Л.С.Гуревич, И.А. Кудинов, В.В.Назаров и др. - Proceedings of the 8th Intern.Vacuum Congress (Cannes-1980). - Paris: Pergamon Press, 1980, v.2, p.334-337.
34. Исследование работы высоковакуумного электродугового сорбционно-го агрегата АВЭД 2/ 260М/ В.В.Сивконов, П.К.Дронь, В.А.Шведов и др. - В сб.:Вопросы атомной науки и техники. Сер.Физика и техника высокого вакуума. Вып.2(6). - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1976, с.30-34.
35. А.с.741352 (СССР). Комбинированный магниторазрядный насос/Авт. изобрет. Н.П.Решетняк, Н.Н.Медошин. - Заявл.02.06.78. Оpubл. в Б.И., 1980, № 22; МКИ НОI } 4I/12.
36. Гуревич Л. С. Инженерный метод расчета основных вакуумных характеристик напылительных геттерных насосов. - Препринт НИИ ЭФА им.Д.В.Фурьева А-0389. - Л., 1978. - 12 с.
37. Немчинский М. Н. О движении катодного пятна вакуумной дуги. - Журнал технической физики, 1979, т.49, № 7, с.1379-1385.
38. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. -М.: Наука, 1968.-243 с.
39. Карпов Д. А., Потехин С. Л. Способы магнитной локализации катодных пятен вакуумной дуги и конструкции испарителей с магнитной стабилизацией. Препринт НИИЭФА, П-А-0588. - Л., 1982.-8 с.
40. Поведение катодных пятен вакуумной дуги в постоянных внешних магнитных полях / Л.С.Гуревич, Д.А.Карпов, С.Л.Потехин и др. Препринт НИИЭФА, П-А-0569. - Л., 1982. - 14 с.

41. А.с. 184389 (СССР). Геттеро-ионный насос. /Авт.изобрет. А.С.Назаров, Э.А.Мах, Г.Ф.Ивановский, М.В.Кузнецов. - Заявл.14.04.65, Оpubл. в Б.И., 1966, № 15; МКИ F04J.
42. А.с.983824(СССР).Комбинированный магнеторазрядный геттеро-ионный насос/Авт.изобрет.С.Д.Островка, В.Б.Нойсс, И.А.Ахманов, Н.М.Гумеров.-Заявл.19.03.81.Оpubл. в Б.И., 1982, № 47; МКИ H01J 41/12.
43. Д а н и л и н Б. С., С и р ч и н В. К. Магнетронные распылительные системы. - М.: Радио и связь, 1982.-36 с.
44. G u r t a А.К., Л е с к J.Н. An evaluation of the titanium sublimation pump. - Vacuum, 1975, v.25, No.8, p.362-372.
45. В о с т р о в Г. А., Р о з а н о в Л. Н. Вакуумметры. - Л.: Машиностроение, 1967.-387 с.
46. Л е с к J.Н. Ultra-high vacuum measurement. - Contemporary Physics, 1979, v.20, No.4, p.401-415.
47. Расчет движения заряженных частиц в манометрических приборах со скрещенными полями /В.П.Афанасьев, А.А.Выдрих, Л.П.Овсянникова и др. - Журнал технической физики, 1970, т.50, № 8, с.1797-1805.
48. А.с.417702 (СССР). Инверсно-магнетронный манометр /Авт.изобрет. Г.А.Ничипорович, И.Ф.Ханина. - Заявл.26.07.72. Оpubл. в Б.И., 1974, № 8; МКИ G01L 21/34.
49. Н а у м е н к о Ю. П. К вопросу о траекториях электронов в обращенном магнетроне. - Журнал технической физики, 1962, т.32, № 6, с.682-685.
50. М и у а г а w a Н. Распределение электронного заряда в ячейке Пеннинга. - Journal of the Vacuum Society of Japan, 1975, v.18, No.6, p.201-202.
51. R e d h e a d P.A. The Townsend discharge in a coaxial diode with axial magnetic field. - Canadian Journal of Physics, 1958, v.36, No.2, p.255-270.
52. H o b s o n J.P., R e d h e a d P.A. Operation of an inverted-magnetron gauge in the pressure range 10^{-3} to 10^{-2} mm Hg. - Canadian Journal of Physics, 1958, v.36, No.2, p.271-308.
53. В а с и л ь е в а М. Н., Р е й х р у д е л ь Э. М. О влиянии пространственного заряда на кинетику электронов в трубках типа Пеннинга. - Журнал технической физики, 1962, т.32, № 6, с.725-734.
54. С м и р н и ц к а я Г. В., Р е й х р у д е л ь Э. М. Электрический разряд с холодным катодом при низких давлениях в магнитном поле. - Журнал технической физики, 1959, т.29, № 2, с.153-162.
55. W e s t o n G.F. Measurement of ultra-high vacuum. Part 2, Partial pressure measurements. - Vacuum, 1980, v.30, No.2, p.49 - 67.

56. А.с. 932320 (СССР). Магниторазрядный датчик давления /Авт. изобрет. В.Н.Пакулин, Ю.М.Крот, С.Е.Беловсов, С.С. Кириченко.— Заявл. 28.12.1977. Оpubл. в Б.И., 1982, № 20; МКИ G01L 21/34.
57. Пакулин В. Н. Магниторазрядный манометр с двумя соосными анодами. — Приборы и техника эксперимента, 1978, № I, с.154-156.
58. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1979. — 383с.
59. А.с. 527619 (СССР). Магниторазрядный манометр /Авт.изобрет. В.Т.Гринченко, Б.П.Тихонов. — Заявл.16.06.1975. Оpubл. в Б.И., 1976, № 33; МКИ G01L 21/34.
60. А.с. 1013781 (СССР). Магниторазрядный манометр / Авт. изобрет. В.Н.Пакулин, Ю.М. Крот, Ю.А. Цирлин. — Заявл. 06.01.82. Оpubл. в Б.И., 1983, № 15; МКИ G01 21/34.
61. Пакулин В.Н. Широкодпазонный самоочищающийся магниторазрядный манометр. — Измерительная техника, 1984, № I, с. 36 — 37.