

15446822

Москва: ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Алексеев Дмитрий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И РЕСУРСА
РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ
НИЗКИХ УСКОРЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

05.07.10 - Бортовые энергоу-
становки и электрические двига-
тели

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор М. К. Марахтанов

Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. И.К.Марахтанов

Официальные оппоненты: профессор, д.т.н. В.В. Савичев
с.н.с., к.т.н. Ю.А. Хохлов

Ведущее предприятие НПО "Энергия"

Защита диссертации состоится "6" апреля 1999 г.
на заседании специализированного Совета Д 05.15.10 при
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственном
техническом университете им.
Москва, 2-я Бауманская, д.

Ваш отзыв на автореферат
высылать по указанному адресу

С диссертацией можно
Телефон для справок:

Автореферат разослан

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., доцент

1544682

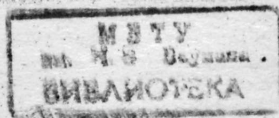
Актуальность работы. Ускорители плазмы с азимутальным дрейфом электронов (УАД) относятся к перспективным системам для получения ионных пучков с низкой энергией. Ускорители этого класса обладают рядом преимуществ: простотой конструкции и технологичностью, высокой надежностью и эффективностью, широким диапазоном рабочих характеристик и большим ресурсом работы. Это открывает возможность для широкого применения их в качестве двигателей для ориентации, стабилизации и коррекции орбит автоматических летательных аппаратов.

Существующие УАД делят на два типа: ускоритель с замкнутым дрейфом и протяженной зоной ускорения (УЗДП) и ускоритель с анодным слоем (УАС), отличающиеся длиной ускорительного канала и наличием диэлектрических стенок в нем.

В настоящее время, разработанный на основе УЗДП электрический двигатель является штатным в системе коррекции летательных аппаратов "Метеор - Природа", "Горизонт", "Экран". Однако, изготовление канала УЗДП, особенно при больших диаметрах, представляет определенные технологические трудности, ввиду использования в них изолятора. Кроме того, УЗДП имеет эксплуатационные недостатки, например, трудности обеспечения высокого ресурса. Простота конструкции, технологичность, надежность в эксплуатации, широкие пределы регулирования тяги при постоянном удельном импульсе, высокий ресурс - преимущества УАС, позволяющие рассматривать его в качестве перспективного электрического ракетного двигателя.

Актуальность работы также связана с тем, что низковольтные УАС находят широкое применение в ионно-плазменной технологии и физических исследованиях, что помимо получения высоких энергетических характеристик ускорителя, также требует увеличения его ресурса работы и получения ионного пучка с возможно меньшим содержанием продуктов износа стенок ускорительного канала.

Цель работы. Исследовать влияние распределения индукции магнитного поля в канале УАС и пристеночной разности потенциалов на параметры ускорителя и его ресурса работы.



Объект исследования. Низковольтный одноступенчатый УАС, работающий на ксеноне.

Методы исследования. Эксперименты проводились в вакуумной камере установки УН71-ЭП. Величины электрических токов и разностей потенциалов измерялись с помощью универсальных цифровых вольтметров Л7-21А. Давление в вакуумной камере определялось вакууметром ВИТ-2. Расход рабочего газа определялся с помощью специально изготовленного и протарированного расходомера. Определение локальных параметров плазмы в канале УАС, а также функции распределения электронов по энергиям проводилось с помощью одиночных электрических зондов, по методике, разработанной в МИРЭА и опробованной на УЗШП. Для регистрации спектра ионного пучка УАС использовался дифракционный спектрограф ДФС-452 с фотографической регистрацией спектра. В теоретической части работы применялся численный счет на персональном компьютере IBM PC XT.

Научная новизна.

1. Изучено влияние распределения магнитного поля в ускорительном канале на параметры ускорителя с анодным слоем, проведена оптимизация УАС по минимальному параметру обмена и максимальному коэффициенту использования массы. Получены оптимальные параметры магнитного поля в канале и оптимальное значение плотности расхода плазмообразующего газа.

2. Дано теоретическое описание пристеночных процессов в УАС, получено условие существования самостоятельного разряда.

3. Изучено влияние распределения магнитного поля в канале и разности потенциалов в пристеночном слое ускорителя на параметры ионного пучка УАС.

4. Исследован износ полюсов магнитной системы УАС в зависимости от распределения магнитной индукции в канале и разности потенциалов в пристеночном слое.

5. Получено распределение локальных параметров плазмы в канале УАС для различных значений электрического смещения на полюсах магнитной системы.

6. Показано, что причиной появления быстрых электронов в канале является ускорения электронов с поверхности магнитных полюсов и их ускорение пристеночной разностью потенциалов.

Практическая ценность. Разработан низковольтный УАС с магнитной системой, позволяющей регулировать величину и профиль магнитного поля в канале независимо друг от друга. Режим устойчивой работы на ксеноне снижен до 60 В, а оптимальное разрядное напряжение до 100 В.

Экспериментально исследовано распыление материала магнитных полюсов УАС как элемента определяющего ресурс работы УАС в целом. Показано, что скоростью износа полюсов можно управлять как путем изменения параметров В-поля, так и путем изменения потенциала полюсов. Найдены режимы, при которых распыление полюсов практически отсутствует.

Апробация и публикация работы. Результаты исследований были доложены, обсуждены и одобрены на научных семинарах кафедры Э-8 МГТУ им. Н.Э.Баумана. Основные положения работы докладывались на VIII Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (21 - 23 сентября 1991 г., Минск, ИТМО АН БССР), конференции посвященной 100-летию А.В. Квасникова (2 - 4 июля 1992 г., Москва, МАИР). По теме диссертации имеется 3 работы.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, основные результаты и выводы, список литературы из 86 наименований. Объем диссертации составляет 137 страниц, включая 48 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель, научная новизна и практическая полезность работы.

В первой главе приведен обзор теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса ускорителей с замкнутым дрейфом электронов.

Как следует из литературного обзора, работа одноступенчатого УАС в низковольтном режиме изучена недостаточно полно. Так, например, отсутствует ясность о влиянии распределения магнитного поля в канале на параметры ускорителя. Нет ни теоретического, ни экспериментального исследования пристеночных процессов в канале. Не исследовано распыление магнитных полюсов УАС в зависимости от профиля магнитного поля в канале.

В соответствии с поставленной целью и проведенным анализом работ в диссертации сформулированы следующие основные задачи:

1. Исследовать влияние величины и распределения магнитного поля в канале УАС на параметры ускорителя. Разработать УАС, в котором величина и профиль B -поля регулируются не зависимо друг от друга.

2. Дать теоретическое описание процессов на стенках ускорительного канала УАС.

3. Исследовать влияние присоединенных слоев в плазме на баланс токов и параметры ионного пучка в ускорителе.

4. Экспериментально исследовать скорость распыления полюсов магнитной системы, определяющую ресурс УАС.

5. Исследовать спектр ионного пучка с целью определения его зарядового состава.

Во второй главе дано теоретическое описание катодного слоя на полюсах магнитной системы. Предполагалось, что линии постоянного потенциала в катодном слое перпендикулярны линиям магнитной индукции (см. рис. 1), а в самом ускорительном канале линии магнитной индукции являются эквипотенциалами. Рассматривался малый участок Δz , на котором изменением прикатодного падения потенциала ΔU_K можно пренебречь.

Ионный ток на магнитные полюса УАС обусловлен не только ионами, рожденными в катодном слое J_{iK} , но и ионами, поступающими в слой из ускорительного канала $J_{iуск}$. Баланс токов в слое представлен на рис. 2 и описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{iуск} = \text{const} \\ \frac{dJ_{iK}}{dx} = -\alpha [\varepsilon(x)] J_e \\ \frac{dJ_e}{dx} = \alpha [\varepsilon(x)] J_e \\ J_{iK} + J_e = J \end{array} \right.$$

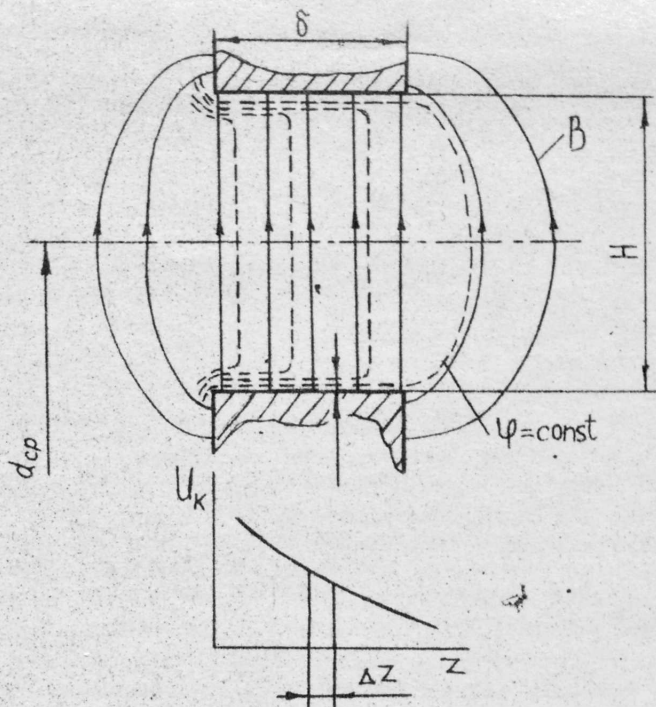


Рис.1 Распределение линий равного потенциала и магнитной индукции в канале УАС.

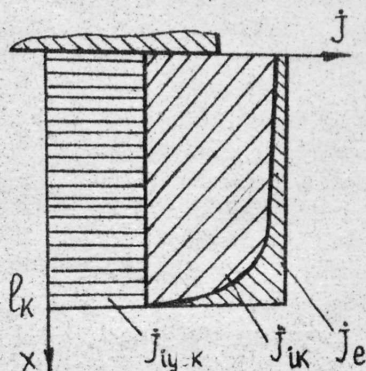


Рис.2 Баланс токов в пристеночном слое.

Граничные условия: 1. $x = 0$, $j_e = \gamma (j_{ik} + j_{iуск})$, 2. $x = l_k$, $j_{ik} = 0$.

Решение данной системы уравнений дает условие самоподдержания разряда:

$$j_k \int_0^1 \alpha [e(x)] dx = \ln(1 + 1/k\gamma)$$

Здесь: $k = 1 + [j_{iуск}(0)/j_{ik}(0)]$; $\alpha = N_0 \sigma_1 v/v_{нд}$; σ_1 — сечение ионизации; N_0 — концентрация нейтронов; v — фактическая скорость электронов; $v_{нд}$ — скорость направленного движения электронов по направлению к аноду.

В отсутствии ионного тока из ускорительного канала ($j_{iуск} = 0$) условие самоподдержания разряда полностью совпадает с условием самоподдержания для тлеющего разряда.

Из условия самоподдержания разряда было получено выражение для определения толщины слоя на полюсах магнитной системы ускорителя:

$$l_k = \frac{\ln(1 + 1/k\gamma)}{p b \sigma_1 (\epsilon_{ср}) n_{ср}}$$

Здесь: $b = 2,47 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ Па}^{-1}$; p — давление нейтронов;

$$\epsilon_{ср} = \frac{j_k \int_0^1 \left[\int_0^1 (u(x) - u_k) dx / (x - l_k) \right] n(x) dx}{\int_0^1 n(x) dx};$$

$$n_{ср} = \frac{\int_0^1 \left[\sqrt{2e(U_k - u(x))/m} / (k(U_k - u(x)) + 1) \right] n(x) dx}{\int_0^1 n(x) dx};$$

$n(x)$ — количество электронов, рождающихся на один электрон, выбитый с поверхности катода (магнитных полюсов); $u(x)$ —

разность потенциалов между текущим положением x и потенциалом катода; H — ширина ускорительного канала.

На основе анализа расчетов толщины катодного слоя на полисах магнитной системы УАС, выполненных на персональном компьютере IBM PC XT, получено условие существования самостоятельного разряда (возможность работы без катода-нейтрализатора):

$$21_K \leq 1,$$

Показано, что причиной возникновения быстрых электронов в канале является вторичная эмиссия электронов с поверхности магнитных полюсов и их ускорение пристеночной разностью потенциалов.

Третья глава посвящена описанию экспериментального оборудования и методов измерений. Расчитаны погрешности измерений.

В работе исследовался низковольтный одноступенчатый УАС, электрическая схема которого представлена на рис. 3. Основным отличием экспериментального УАС от "традиционных" является наличие дополнительной магнитной системы, позволяющей изменять профиль магнитного поля в ускорительном канале. Другим отличием экспериментального УАС является наличие источника питания, с помощью которого можно изменять потенциал полюсов основной магнитной системы, которые выполняют роль стенок ускорительного канала.

Эксперименты проводились в вакуумной камере установки УВН71-ЗП. Величины электрических токов и разностей потенциалов измерялись с помощью универсальных цифровых вольтметров В7-21А. Давление в вакуумной камере определялось вакууметром ВИТ-2. Расход рабочего газа определялся с помощью специально изготовленного и протарированного расходомера. Определение локальных параметров плазмы в канале УАС, а также функции распределения электронов по энергиям проводилось с помощью одиночных электрических зондов. Относительная погрешность определения концентрации электронов в канале не превышала $\pm 15\%$, а электронной температуры $\pm 7\%$. Для регистрации спектра ионного пучка использовался дифракционный спектрограф ДФС-451 с фотографической регистрацией спектра. Полученные спектры фотометрировались на

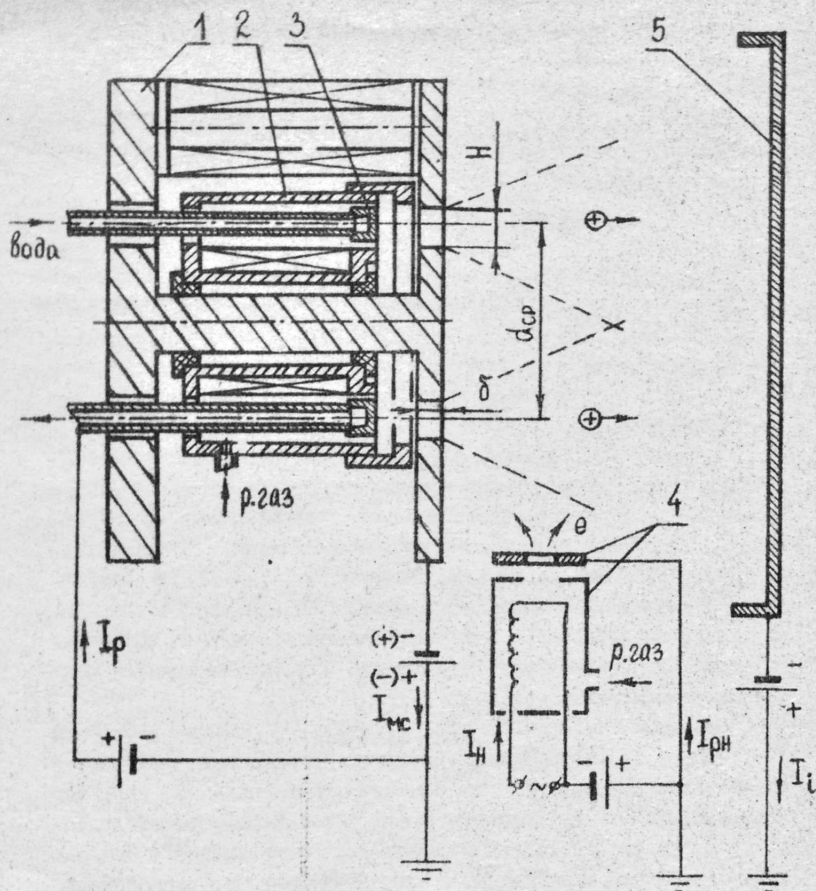


Рис.3 Схема экспериментального УАС. 1 - основная магнитная система, 2 - дополнительная магнитная система, 3 - анод, 4 - катод-нейтрализатор, 5 - коллектор.

микрофотометре ИФО-452. Погрешность определения отношения концентраций ионов различной кратности ионизации в пучке не превышала 60%.

В четвертой главе представлены результаты исследования экспериментального УАС.

Исследовано влияние величины и распределения магнитного поля в канале УАС на параметры ускорителя и параметры ионного пучка при работе УАС в оптимальном двигательном режиме. Оптимизация проводилась по минимальному разрядному напряжению $\langle U_p \rangle$, минимальному параметру объема $\langle \xi_m = I_p / I_m \rangle$, максимальному коэффициенту использования масс $\langle \eta_m = I_i / I_m \rangle$.

В отсутствие градиента магнитной индукции в канале наилучшие параметры достигаются при $B = 0,018 \dots 0,020$ Тл и значении плотности расхода плазмообразующего газа $j_m = 800 \dots 900$ А м⁻². Исследовано влияние удаленности анода от полюсов магнитной системы при постоянном B_r . Так, при $B_r = 0,02$ Тл и $j_m = 850$ А м⁻², приближение анода ближе 8 мм к полюсам приводит к резкому ухудшению параметров УАС, при удалении же анода больше 8 мм параметры ускорителя практически не изменяются. Следовательно, граница зоны ионизации и ускорения устанавливается в области $l \leq 8$ мм.

Для исследования влияния градиента магнитной индукции в канале сравнивались режимы с одинаковыми максимальными значениями магнитной индукции в канале B_r и одинаковыми значениями магнитной индукции в области анода B_a , но с различными $\nabla_z B_r$. Увеличение градиента магнитной индукции в канале приводит к улучшению параметров УАС (рис. 4). Кроме того, снижаются тепловые потери в анод и прианодное падение потенциала. Параметры ионного пучка определялись путем пересчета тормозных характеристик ионного пучка, снятых трехэлектродным зондом. Средняя энергия ионов в пучке с ростом $\nabla_z B_r$ увеличивается, а также улучшается монохроматичность ионного пучка.

Аналогичные результаты получены для различных значений магнитной индукции в области анода B_a (см. рис. 5). Видно,

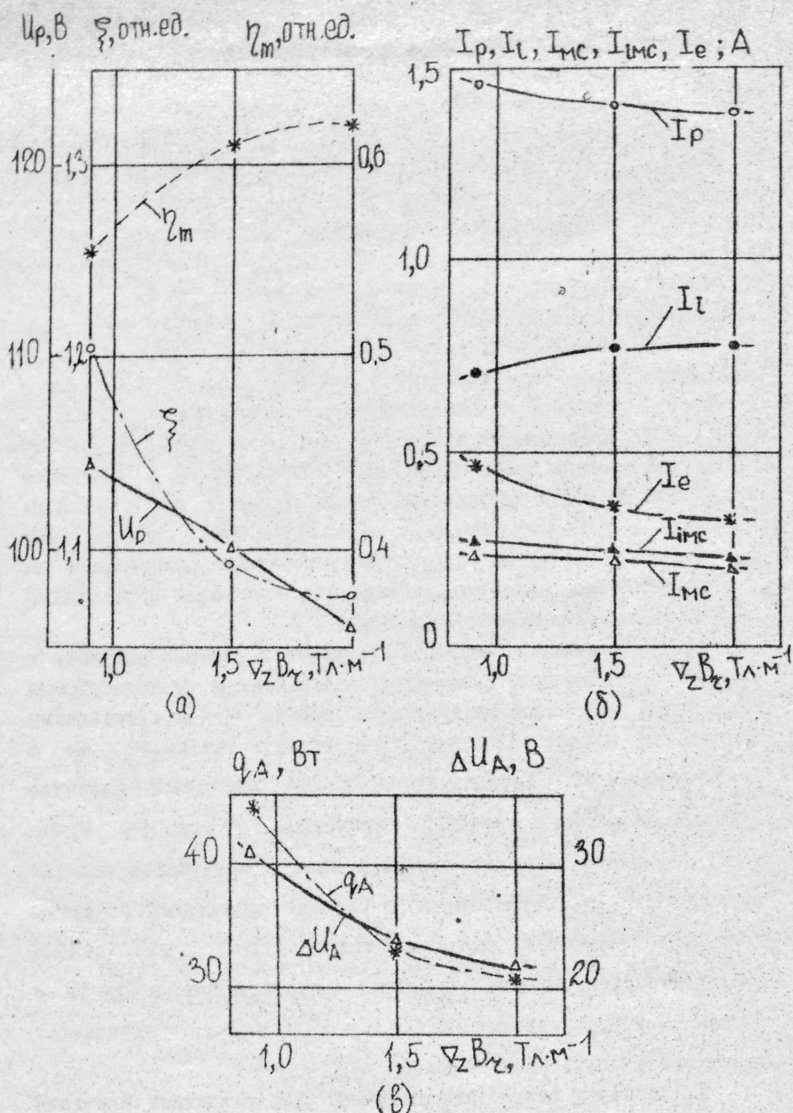


Рис.4 Влияние градиента магнитной индукции в канале на параметры УАС (а), баланс токов (б), тепловые потери в анод (в).

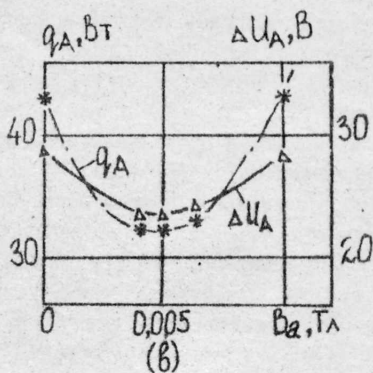
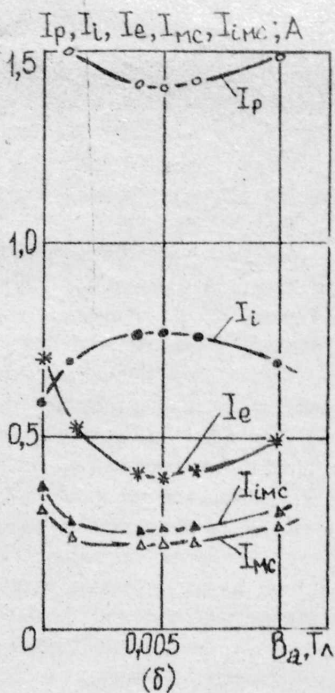
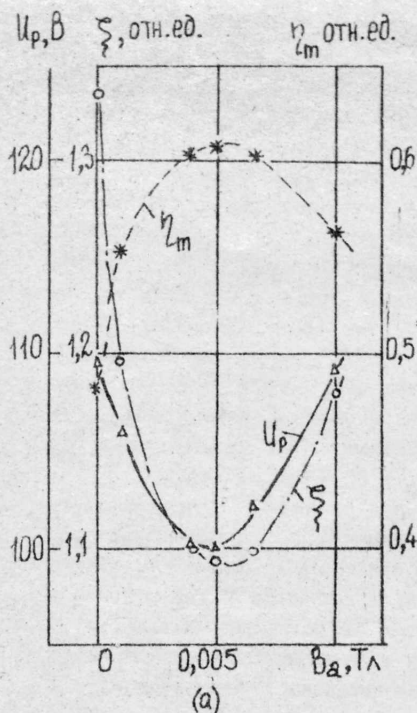


Рис.5 Влияние значения магнитного поля в области анода на параметры УАС (а), баланс токов (б), тепловые потери в анод (в).

что оптимальным является значение $V_a = 0,004 \dots 0,005$ Тл.

Таким образом, получены параметры магнитного поля, обеспечивающие оптимальный режим работы УАС при работе на ксеноне в области низких разрядных напряжений: $V_r = 0,018 \dots 0,020$ Тл; $V_a = 0,004 \dots 0,005$ Тл $\nabla_z V_r = \max$.

Часть экспериментальных исследований посвящена изучению влияния электрического смещения на полюсах магнитной системы УАС (φ_{MC}). На рис. 6 представлен баланс токов в канале ускорителя при различных значениях φ_{MC} . При подаче отрицательного смещения разрядный ток I_r и ионный ток на коллектор I_i не зависят от φ_{MC} , ток же на магнитные полюса несколько возрастает, а при $\varphi_{MC} = -25$ В наступает насыщение.

При подаче положительного электрического смещения резко увеличивается электронный ток на полюса, а при $\varphi_{MC} = \varphi_{\text{плав}} = 6$ В ионный ток полностью компенсируется электронным. При дальнейшем увеличении $\varphi_{MC} = \varphi_{\text{ср}} = 36$ В разряд гаснет.

Ионный ток на коллектор при увеличении положительного смещения на магнитные полюса также несколько увеличивается. Это объясняется "отражением" части ионов от полюсов магнитной системы из-за снижения разности потенциалов между плазмой и поверхностью полюсов. Ионный ток на магнитные полюса I_{iMC} при этом снижается, снижается и энергия ионов, достигающих поверхности полюсов, а следовательно, снижается износ магнитных полюсов.

Для определения влияния электрического смещения на параметры ионного пучка УАС были сняты тормозные характеристики пучка. Параметры пучка при $\varphi_{MC} < 0$ не меняются, а при $\varphi_{MC} > 0$ пучок становится менее монохроматичным и снижается средняя энергия ионов в пучке.

В работе определялась скорость износа полюсов магнитной системы. Зависимость скорости износа полюсов от $\nabla_z V_r$ и V_a повторяет зависимости I_{iMC} от этих величин. Исследование влияния φ_{MC} на износ показало, что при подаче положительного смещения износ полюсов существенно снижается, а в некоторых режимах износ отсутствует. При подаче же отрицательного смещения износ полюсов резко возрастает. Это позволяет использовать УАС в качестве распилильной системы.

Локальные параметры плазмы в канале определялись с

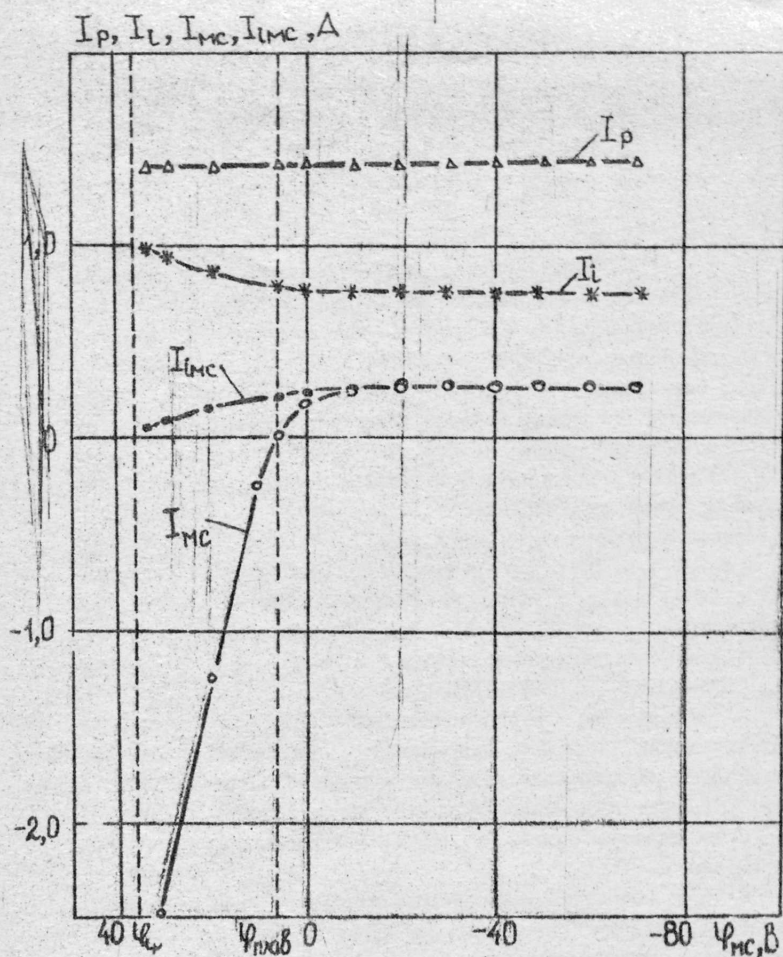


Рис.6 Баланс токов в УАС в зависимости от напряжений смещения на полюсах магнитной системы.

помощью зондовых измерений. Схема расположения зондов и распределение параметров плазмы по длине канала для различных φ_{mc} показаны на рис. 7. Пунктиром обозначен профиль γ - ионизации зондов. Область канала, где происходит максимальное выгорание зондов, соответствует зоне формирования азимутального дрейфа, в этой области происходит основное падение потенциала. Как видно, параметры плазмы в канале при $\varphi_{mc} = 0$ и $\varphi_{mc} = -30$ В совпадают, а при $\varphi_{mc} = 30$ В зона дрейфа более размыта.

Анализ изменения функции распределения быстрых электронов по длине канала УАС показал, что быстрая компонента возникает в области магнитных полюсов, а максимум ее распределения следует за пристеночным падением потенциала. Это подтверждает вывод о том, что причиной возникновения быстрых электронов в канале УАС является γ -эмиссия электронов с поверхности магнитных полюсов и их ускорение пристеночной разностью потенциалов.

Для определения доли ионов различной кратности ионизации в ионном пучке был исследован спектр пучка за срезом УАС. Исследовался режим с $j_m = 850 \text{ А м}^{-2}$, $B_r = 0,02 \text{ Тл}$, $B_z = 0,05 \text{ Тл}$, $\nabla_z B_r = 1,5 \text{ Тл м}^{-1}$, $U_p = 100 \text{ В}$. Обнаружено, что доля двухзарядных ионов в пучке не превышает 2%, а электронная температура $T_e = 1,9 \text{ эВ}$, что хорошо согласуется с результатами зондовых измерений.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан экспериментальный УАС, работающий в области низких разрядных напряжений, с магнитной системой, позволяющей регулировать величину и распределение магнитного поля в канале независимо друг от друга. Режим устойчивой работы на ксеноне снижен до 60 В, а оптимальное разрядное напряжение до 100 В.

2. Дано теоретическое описание катодного слоя на полюсах магнитной системы ускорителя с анодным слоем. Выведена зависимость, позволяющая определить толщину слоя с учетом потока ионов в слой из плазмы ускорительного канала. Получено условие существования самостоятельного разряда УАС.

3. При работе ускорителя на ксеноне в области низких разрядных напряжений определена оптимальная плотность расхода плазмообразующего газа $j_m = 800 \dots 900 \text{ А м}^{-2}$ и оптимальные

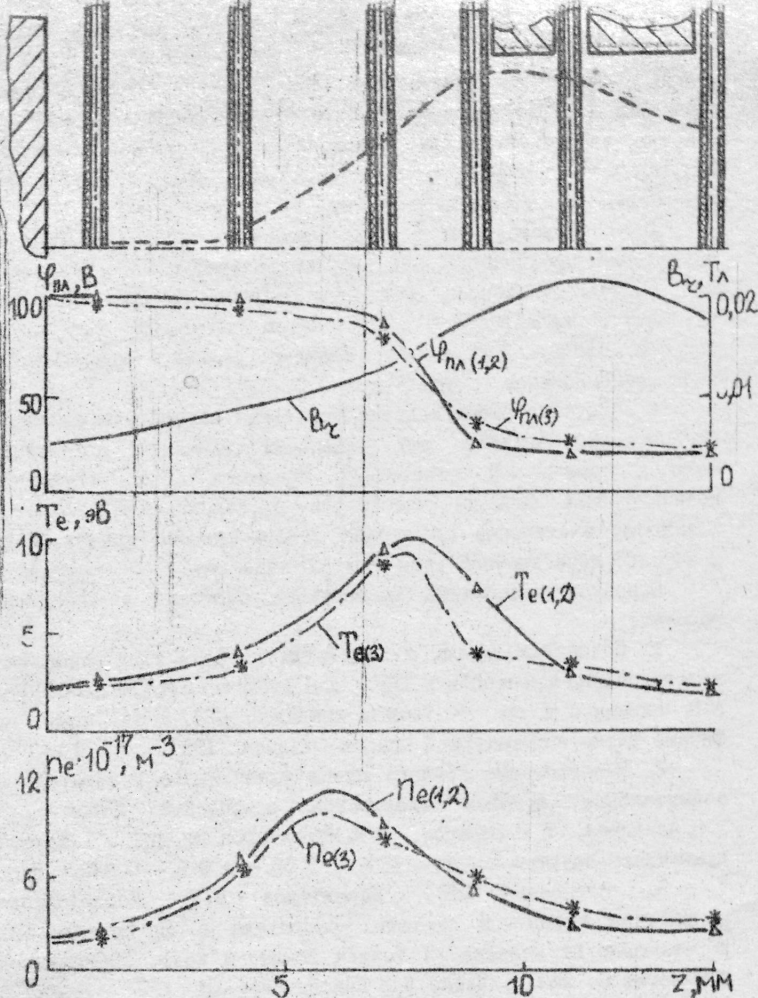


Рис. 7 Распределение локальных параметров плазмы в канале УЛС при различных φ_{mc} . 1 - $\varphi_{mc} = -30$ В, 2 - $\varphi_{mc} = 0$, 3 - $\varphi_{mc} = 30$ В.

параметры магнитного поля в канале $B_r = 0,018 \dots 0,020$ Тл,
 $B_a = 0,004 \dots 0,005$ Тл, $\nabla_z B_r = \max$.

4. Исследовано влияние электрического смешивания на полюсах магнитной системы УАС. При изменении отрицательного смещения на полюсах магнитной системы изменения параметров УАС не наблюдается. При подаче положительного смещения параметры ускорителя улучшаются, но ухудшается монохроматичность ионов в пучке.

5. Исследовано распыление материала магнитных полюсов ускорителя как элемента, определяющего ресурс УАС. Показано, что скоростью износа можно управлять путем изменения параметров магнитного поля и путем изменения потенциала полюсов магнитной системы. Найден режим, при котором распыление полюсов отсутствует.

6. Получено распределение локальных параметров плазмы в ускорительном канале для различных значений потенциала полюсов магнитной системы. Показано, что причиной возникновения быстрых электронов в канале УАС является γ -эмиссия электронов со стенок ускорительного канала и их ускорение пристеночной разностью потенциалов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Источники плазмы с замкнутым дрейфом электронов для моделирования процессов в ТЯР / Д.Н. Алексеев, М.К. Марахтанов, А.Б. Пильников и др. // Тезисы докладов VIII Всес. конф. по физике низкотемпературной плазмы. - Минск, 1991. - С. 178 - 179.

2. Исследование ионного пучка плазменного ускорителя с азимутальным дрейфом электронов оптическим методом / Д.Н. Алексеев, А.Б. Вагапов, М.К. Марахтанов и др. // Журнал прикладной спектроскопии. - 1992. - Т. 56, вып. 5-6. - С. 843 - 846.

3. Алексеев Д.Н., Марахтанов М.К. Исследование распыления магнитной системы ускорителя с амальгамным слоем, предотвращающего наводнение // Тезисы докладов конф. посвященной 100-летию со дня рождения А.В. Квасникова. - М., 1992. - С. 25.

Подписано к печати 05.01.94

Объем 1 п.л. Заказ № 31 Типография МГТУ