

**ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ
ПРИ МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

В. П. Агеев, И. Н. Сафронов, С. О. Твердохлебов

(Калининград Моск. обл.)

Характеристики ускорителя с анодным слоем (УАС) свидетельствуют о высокой эффективности формирования и ускорения ионов. Вместе с тем в УАС существует, по крайней мере, два характерных режима: ускорительный с оптимальными характеристиками, наблюдаемый при больших напряжениях, и аномальный, где КПД ускорителя заметно падает, а пучок сильно расфокусируется [1].

При этом имеются и другие модификации режимов с заметно различающимися характеристиками. Наличие аномального режима и его модификаций при малых напряжениях значительно ограничивает возможности УАС. Переход из одного режима в другой происходит при изменении параметров ускорителя (ускоряющего напряжения, магнитного поля и т. д.) и зависит от геометрических размеров канала ускорителя и магнитной системы [2]. Один из элементов УАС — источник ионов, процессы ионообразования и формирования потока в котором существенно влияют на характеристики ускорителя [3—5]. Предварительные исследования работы УАС в области малых ускоряющих напряжений показали, что они имеют ряд особенностей [4], это представляет значительный интерес.

В настоящей работе изложены экспериментальные результаты изучения режимов работы УАС, оптимизации процессов формирования потока и характеристик УАС при малых напряжениях и магнитных полях.

1. Описание схемы электропитания, измерений и условий эксперимента. Эксперименты проводились на модели двухступенчатого УАС, конструкция которого аналогична описанной в [1, 4] и отличается главным образом геометрическими размерами и протяженностью зоны, занятой сильным магнитным полем (средний диаметр кольцевого зазора $d = 200$ мм, межполюсное расстояние $h = 30$ мм, толщина полюсов $\delta = 3$ мм).

В процессе экспериментов измерялись токи и напряжения в первой (разрядной) и второй (ускоряющей) ступени I_p, I_y, V_p, V_y , ток на приемник $I_{пр}$, на полюса I_n , ток намагничивания соленоида, ток с нейтрализатора $I_{нр}$. Точность измерения указанных величин $\approx 1,5\%$. Использовались различные модификации схемы электропитания и измерений (рис. 1, где I — традиционная схема с двумя источниками электропитания, II — с одним источником электропитания, $b, в, г$ — индекс схемы соответствует положению ключа). Анод-парораспределитель 1 вместе с электродами 2 в соответствии со схемой I образуют первую ступень ускорителя, а электроды 2 и 3 — вторую. При подсоединении электродов 2 к аноду путем переключения ключа в положение b принципиальная схема II является схемой одноступенчатого УАС [6].

В положении ключа $в$ электроды 2 при работе ускорителя находятся под плавающим потенциалом, а в положении $г$ потенциал электродов 2 фиксируется с помощью емкостного делителя напряжения [7]. Анод и электроды размещены в межполюсном зазоре магнитной системы 4 . Нейтрализатор 5 и токоприемник находятся под потенциалом отрицательного полюса источника электропитания ускорителя. Ускоритель размещен в вакуумной камере на специальном весовом устройстве, позволяющем с точностью до 3% определить силу реакции пучка F . Вакуум в камере обеспечивали диффузионные насосы в диапазоне давления $5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ Па.

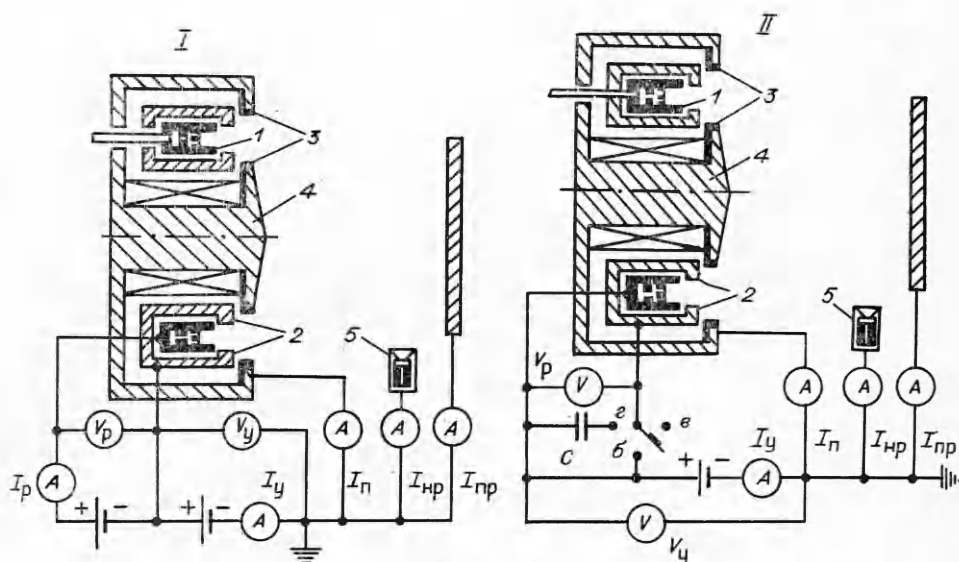
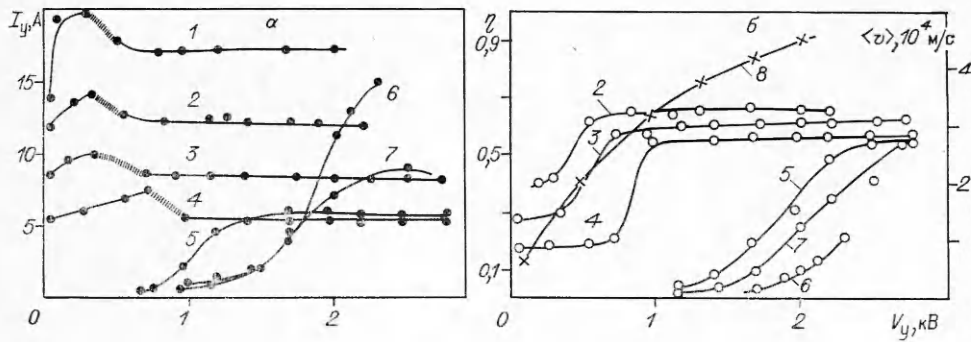


Рис. 1

Для компенсации объемного заряда ионов использовался автономный плазменный нейтрализатор — источник электронов типа полого катода [8], который размещался в пролетном пространстве на расстоянии 10—13 см от среза ускорителя в 2—3 см от пучка. Такой источник представляет собой молибденовую трубку диаметром 8 мм с вмонтированной вставкой из гексаборида лантана и торцевыми дисками с отверстиями. Через эти отверстия осуществляется проток рабочего вещества, например ксенона, висмута. Для висмута катод предварительно разогревался до температуры $\approx 1000^\circ\text{C}$ дополнительным нагревателем, а в дальнейшем он работал в режиме самоподогрева. Положительным электродом такого источника был сам пучок ионов, формируемый в ускорителе. Как показали исследования [8], энергетическая цена электрона в таком источнике составила 10—15 эВ/электрон, что близко к потенциалу ионизации атома. Коэффициент газовой эффективности $k \approx 200$ электрон/атом, что близко к предельному значению $k^* = \sqrt{M_{\text{и}}/m_e}$, где $M_{\text{и}}$, m_e — масса атома рабочего вещества в источнике и электрона.

Взвешивание бака с рабочим веществом до и после эксперимента позволяло с точностью $\approx 5\%$ определить усредненный расход висмута \dot{m} . По измерениям силы реакции пучка и расхода рабочего вещества определялись средняя скорость ионов $\langle v \rangle = F/\dot{m}$ и КПД ускорителя $\eta = F/2\dot{m}W$ ($W = I_p V_p + I_y V_y$ — потребляемая мощность).

2. Экспериментальные результаты. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ускорителя и зависимость КПД от ускоряющего напряжения при различных расходах рабочего вещества (расход выражен в токовых единицах $I_m = e\dot{m}/M$, e , M — заряд и масса иона) представлены на рис. 2, а, б для работы УАС с нейтрализатором (кривые 1—4) и без него (кривые 5—7), при этом линии соответствуют режимам: 4, 5 — $I_m = 4,7$ А, $V_p = 250$ В; 3, 7 — $I_m = 6,7$ А, $V_p = 180$ В; 2, 6 — $I_m = 8,7$ А, $V_p = 120$ В; 1, 8 — $I_m = 11,1$ А, $V_p = 80$ В при магнитном поле $H = 1$ кЭ и давлении в камере $p = (0,6-1) \cdot 10^{-3}$ Па (кривая 8 — зависимость средней скорости ионов $\langle v \rangle$ от ускоряющего напряжения). Видно, что наилучшими параметрами двухступенчатый УАС обладает на участке ВАХ с $I_y = \text{const}$, где КПД оптимален ($\eta \geq 0,6$). Вместе с тем характерно для обоих случаев существование минимального ускоряющего напряжения V_y^* , ниже которого наблюдаются срыв зависимости $I_y = \text{const}$, резкое падение КПД ускорителя ($\eta < 0,5$) и расфокусировка ионного пучка. На-



Р и с. 2

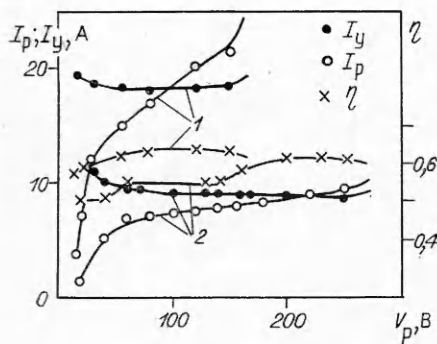
напряжение V_y^* соответствует критическому напряжению перехода в аномальный режим [1, 2].

При работе без нейтрализатора срыв в аномальный режим в исследуемой геометрии УАС происходит при $V_y^* \geq 2$ кВ (линии 5—7), причем критическое напряжение возрастает с увеличением расхода и уменьшением напряженности поля в канале ускорителя. Этот факт хорошо согласуется с данными [2]. Использование нейтрализатора позволяет сместить границу аномального режима в область значительно меньших ускоряющих напряжений вплоть до $V_y^* \sim 0,5$ кВ (линии 1—3) при сохранении высоких КПД и при малых напряжениях.

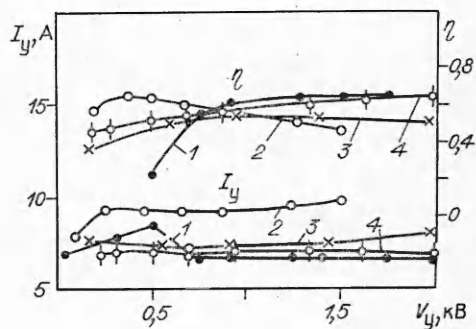
Характер изменения V_y^* с ростом расхода и уменьшением магнитного поля оказывается прямо противоположным результатам экспериментов без нейтрализатора. Так, сравнение кривых 4 и 2 показывает, что двукратное увеличение плотности тока при фиксированном магнитном поле приводит к снижению V_y^* от $\sim 0,9$ кВ до $\sim 0,5$ кВ. Влияние магнитного поля на изменение V_y^* при фиксированном расходе выражено слабее, чем влияние расхода.

Во всех экспериментах ток в ускоряющей ступени на участке ВАХ $I_y = \text{const}$ значительно превосходит эквивалентный расход рабочего вещества ($I_y > I_m$). Тем не менее в исследованном диапазоне магнитных полей КПД ускорителя достигает высоких значений ($\eta \approx 0,6-0,7$) и ионный пучок хорошо сфокусирован в отличие от [1], где эффективность двухступенчатого УАС резко падала при уменьшении магнитного поля ниже ~ 1 кЭ и $V_y \leq 2$ кВ. При этом средняя скорость растет пропорционально квадратному корню из ускоряющего напряжения, что свидетельствует об ускорении электрическим полем и в области малых ускоряющих и магнитных полей. Поэтому, как и в [1, 2], режим работы на участке ВАХ $I_y = \text{const} > I_m$ следует считать ускорительным. Аналогичные результаты получены на другой модели, отличающейся в основном геометрическими размерами ($d = 160$ мм) [4].

На рис. 3 показаны зависимости токов I_y , I_p и КПД от величины разрядного напряжения V_p при различных расходах (линии 1, 2 для $I_m = 11,3; 7,4$ А при $V_y = 1,3$ кВ, $H = 0,95$ кЭ, $p = (0,6-0,8) \cdot 10^{-3}$ Па). Обращает на себя внимание немонотонная зависимость токов и КПД от разрядного напряжения, имеющих практически несколько поддиапазонов с заметно отличающимся характером изменения токов и КПД. Видно, что КПД ускорителя оптимален в определенном диапазоне V_p [1, 2], зависящем, как отмечалось ранее, от расхода рабочего вещества. Так, при малой плотности расхода ($j_m \sim 0,1$ А/см²) максимальный КПД наблюдается в диапазоне $180 \text{ В} \leq V_p \leq 240 \text{ В}$. Увеличение V_p выше граничного значения, как правило, приводит к пульсациям и росту токов I_y , I_p , снижению КПД. При уменьшении напряжения ($V_p < V_{pm}$) ток в разрядной ступени падает, а в ускоряющей растет. Плавное уменьшение V_p до нуля сопровождается при больших магнитных полях ($H \geq 1$ кЭ) снижением КПД до $\sim 0,4$.



Р и с. 3



Р и с. 4

Минимальное значение V_{pm} уменьшается при увеличении расхода рабочего вещества. Так, если при плотности $j_m \approx 0,1 \text{ A/cm}^2$ оно $\approx 180 \text{ В}$, то при увеличении расхода вдвое снизилось до $\approx 80 \text{ В}$. При этом для фиксированного ускоряющего напряжения диапазон оптимальных значений V_p уменьшается. Взаимосвязь же минимального разрядного напряжения с критическим ускоряющим напряжением противоположна зависимости $V_{pm}(V_y^*)$, представленной в [2], где с уменьшением V_p наблюдалось увеличение V_y^* . Различие в исследуемой модели по сравнению с [2], по-видимому, обусловлено как наличием внешнего источника электронов, так и уменьшением протяженности области с магнитным полем. Эти возможности в отличие от [2] приводят к тому, что уменьшение V_p не сопровождается срывом в ярко выраженный аномальный режим, когда $I_y \gg I_m$, а ускоритель работает достаточно эффективно и при разрядных напряжениях, близких к нулю [4]. При малых магнитных полях ($H \leq 0,5 \text{ кЭ}$) этот режим аналогичен режиму работы УАС с одним источником питания (см. рис. 1, схема II, б), а ускоритель, по существу, представляет собой одноступенчатый УАС с его характерными особенностями [6].

ВАХ и зависимость КПД от ускоряющего напряжения в одно- и двухступенчатом режимах работы УАС приведены на рис. 4 (1 — схема I рис. 1 — двухступенчатый УАС, $H = 0,95 \text{ кЭ}$, $V_p = 200 \text{ В}$; 2 — положение б — одноступенчатый УАС, $H = 0,27 \text{ кЭ}$, $V_p = 0$; 3 — положение в — УАС с плавающим электродом, $H = 0,95 \text{ кЭ}$; 4 — положение г — схема УАС с емкостным делителем, $H = 0,95 \text{ кЭ}$). Видно, что в одноступенчатом режиме (кривая 2) КПД УАС достигает значений $\eta \approx 0,6-0,7$ в диапазоне $0,2 \text{ кВ} \leq V_y \leq 0,7 \text{ кВ}$ при $H \leq 0,3 \text{ кЭ}$, $j_m \geq 0,1 \text{ A/cm}^2$ и падает до $\eta \leq 0,5$ при $V_y \geq 0,9 \text{ кВ}$. При работе по двухступенчатой схеме и больших магнитных полях при $V_y \leq 1-0,5 \text{ кВ}$ КПД, как отмечалось выше, резко падает. При больших ускоряющих напряжениях ($V_y \geq 1 \text{ кВ}$) КПД двухступенчатого УАС на 10–20% выше, чем одноступенчатого. Различие определяется растущей вольт-амперной характеристикой УАС при больших напряжениях ($\geq 1 \text{ кВ}$). Для меньших магнитных полей ($H \leq 0,5 \text{ кЭ}$) диапазон ускоряющих напряжений для двухступенчатого УАС при высокой эффективности ускорения простирается, как и для одноступенчатого УАС, до $\sim 0,3 \text{ кВ}$.

Такое изменение характеристик свидетельствует, по-видимому, о существенном влиянии процессов ионообразования на последующее формирование и ускорение ионного потока в анодном слое. Для выявления этой особенности в специальных экспериментах проводилось изучение характеристик УАС при использовании в одних и тех же условиях различных схем электропитания (см. рис. 1), приводящих к перераспределению потенциала в канале ускорителя.

Сравнение ВАХ и КПД для рассмотренных схем электропитания двухступенчатого УАС дано на рис. 4. Видно, что в области высоких ускоряющих напряжений ВАХ с одним источником электропитания

(кривые 3, 4) по своему характеру мало отличается от ВАХ, полученных в обычной двухступенчатой схеме, что согласуется с данными [7]. Однако в области низких ускоряющих напряжений ВАХ заметно различаются. В схеме с емкостным делителем и плавающим электродом не происходит в отличие от двухступенчатого УАС явного скачкообразного перехода в «аномальный» режим, так что зависимость $I_y(V)$ быстро выходит на насыщение и сохраняется практически во всем диапазоне ускоряющих напряжений ($V_y \geq 0,3$ кВ). При этом величины токов для схем с емкостным делителем и двухступенчатым УАС близки, тогда как для одноступенчатого УАС ток выше, чем для двухступенчатого.

При малых расходах ($i_m \leq 0,1$ А/см²) КПД в диапазоне $0,2$ кВ $\leq V_y \leq 0,9$ кВ при работе с одним источником питания и емкостным делителем существенно выше (на $\geq 25\%$), чем для обычной двухступенчатой схемы электропитания. При увеличении расхода КПД растет, причем оптимального значения он достигает при ускоряющих напряжениях ($V_y \geq 0,3$ кВ). При уменьшении напряжения ниже $\sim 0,3$ кВ происходит плавное снижение КПД. Для схемы с плавающим электродом КПД УАС оказывается ниже, чем в предыдущем случае ($\eta \sim 0,5$).

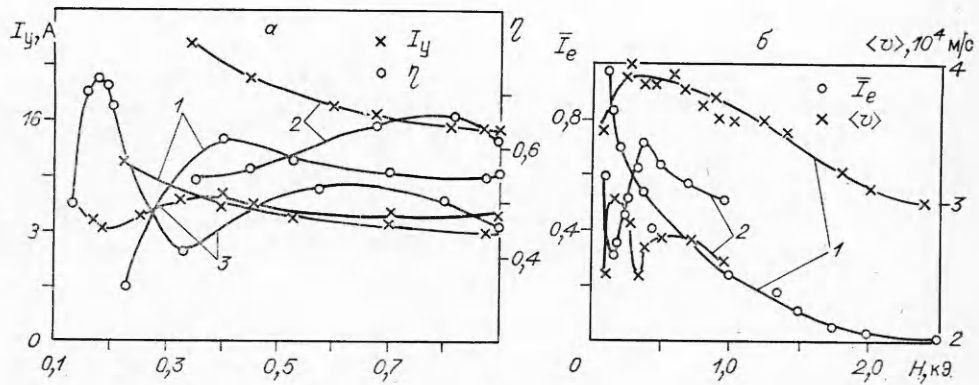
При больших ускоряющих напряжениях разность потенциалов между анодом и катодом первой ступени в схеме с одним источником питания и делителем автоматически устанавливается на значении, близком к оптимальному разрядному напряжению V_p в двухступенчатом УАС. В области малых напряжений значение разности потенциалов изменяется пропорционально V_y . При этом общим для всех исследованных схем является то, что разряд горит и в полости, образованной анодом и электродами 2 (см. рис. 1). Проведенные эксперименты показали, что с точки зрения оптимального распределения электрических полей в канале УАС для широкого диапазона напряжений наиболее гибкой показала себя схема двухступенчатого УАС с емкостным делителем.

Таким образом, в конструкции двухступенчатого ускорителя реализованы режимы с одним источником электропитания, когда одна часть приложенной разности потенциалов, необходимой для ионизации рабочего вещества, устанавливается на электродах первой ступени, а другая — на электродах второй ступени.

Влияние магнитного поля на ток и КПД при фиксированном ускоряющем напряжении и различных расходах, схемах электропитания показано на рис. 5, а (1, 2 — $I_m = 6,5; 9,8$ А, $V_y = 1, 2; 0,75-1,3$ кВ, $V_p = 160; 120$ В для двухступенчатого УАС; 3 — $I_m = 6,2$ А, $V_y = 1$ кВ, $V_p = 0$ для одноступенчатого). Видно, что уменьшение H сопровождается ростом I_y и относительным увеличением КПД в определенном диапазоне параметров. Ускоритель работает эффективно при оптимальном значении H^* , растущем с увеличением расхода.

При $H < H^*$ наблюдаются более существенный рост тока и падение КПД, тогда как в исследованном диапазоне $H > H^*$ они изменяются более слабо. Зависимость тока от магнитного поля хорошо прослеживается на рис. 5, б (1 — двухступенчатый УАС, $V_y = 1,3$ кВ, $V_p = 160$ В; 2 — одноступенчатый УАС, $V_y = 1$ кВ, $V_p = 0$), где приведенный ток $\bar{I}_e = (I_y - I_m)/I_m$ характеризует, по существу, изменение электронной составляющей тока при фиксированном расходе. Здесь же представлены данные, полученные на других моделях двухступенчатого УАС [1, 4], отличающихся его геометрическими размерами. Все экспериментальные результаты удовлетворительно группируются вблизи одной кривой 1, близкой гиперболической зависимости $\bar{I}_e \sim \text{const}/H$. При этом приведенный электронный ток достигает больших значений (~ 1) при малых магнитных полях ($H \sim 0,2$ кЭ).

На рис. 5, б показана аналогичная зависимость (линия 2) для УАС с одним источником электропитания (см. рис. 1, схема II, б). Обращает на себя внимание «резонансное» изменение \bar{I}_e от H в области малых магнитных полей ($0,15-0,3$ кЭ), где происходит при определенных (оптималь-



Р и с. 5

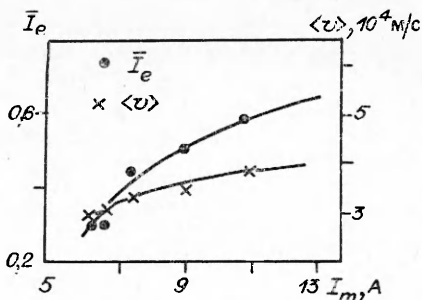
ных) значениях H^* резкое уменьшение электронного тока (до $\bar{I}_e \sim 0,3$) и рост КПД ($\approx 0,7$). При этом визуально наблюдается улучшение фокусировки пучка, который имеет более резкую границу, чем при других значениях H . Разряд же в полости, образованной анодом 1 и электродами 2 (см. рис. 1), при этом более яркой светимости.

Аналогичное изменение токов от H происходило при работе на цезии как в одноступенчатом [6], так и в двухступенчатом УАС с иными геометрическими размерами ($d = 60$ мм, $h = 15$ мм, $\delta = 3$ мм), что свидетельствует об общности процессов, слабо зависящих от геометрических размеров ускорителя и рабочего вещества.

На рис. 5, б дана типичная зависимость средней скорости направленного движения ионов от магнитного поля при фиксированном напряжении и расходе в обоих режимах работы УАС. Видно, что средняя скорость имеет оптимальное значение при $H^* \approx 0,2-0,3$ кЭ. За оптимальным значением H^* скорость падает, причем темп ее изменения при $H > H^*$ ниже, чем при $H < H^*$. При этом изменение магнитного поля от 2,5 до 0,3 кЭ приводит к увеличению $\langle v \rangle$ на $\sim 30\%$, а H^* растет с повышением расхода рабочего вещества и зависит от ускоряющего напряжения.

Экспериментально обнаружено, что рост расхода при фиксированном магнитном поле приводит к увеличению приведенного электронного тока (рис. 6, $V_y = 1,3$ кВ, $H = 1$ кЭ, $V_p = 80-250$ В, схема 1 рис. 1). Так, при достаточно малых расходах ($j_m \leq 0,1$ А/см²) превышение тока над расходом составляет $\approx 30\%$, тогда как при большем расходе ($j_m \sim 0,2$ А/см²) I_y может превышать эквивалентный расход висмута на $\sim 60\%$. При этом средняя скорость также растет с увеличением расхода, так что его двукратное увеличение в исследованном диапазоне приводит к росту средней скорости на $\sim 30\%$.

Указанное изменение токов $I_y(I_m, H)$ при фиксированном ускоряющем напряжении сопровождается увеличением мощности, поэтому следовало бы ожидать снижения КПД ускорителя. Однако рост скорости обеспечивает оптимальное значение КПД ($\eta \geq 0,6$) в диапазоне магнитных полей ($H > H^*$) при всех ускоряющих напряжениях, где темп роста I_y с изменением H меньше или сравним с приращением средней скорости ионов. В противном случае при $H < H^*$ эффективность ускорения падает. Заметное влияние на электронный ток оказывает давление остаточного газа в объеме камеры. При повышении давления в 3-4 раза в исследованном диапазоне I_y слабо растет (на $\approx 20\%$), а КПД падает (на $\approx 10\%$). При этом критическое давление (выше которого токи быстро растут, а КПД падает) увели-



Р и с. 6

чивается с ростом магнитного поля и уменьшением расхода. Диапазон давлений с оптимальным КПД в изучаемом ускорителе значительно ниже, чем в ускорителе с протяженной зоной, занятой сильным магнитным полем [2], а критическое давление составляет $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ Па.

Таким образом, проведенные исследования показали, что оптимизация режимов работы, конструкции и схемы электропитания УАС обеспечивает высокую эффективность формирования и ускорения потока ионов в широком диапазоне напряжений ($V_y \geq 0,2$ кВ) и магнитных полей ($H \geq 0,2$ кЭ). Это дает возможность широко использовать УАС в различных областях техники и технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин С. Д., Ерофеев В. С. и др. Характеристики двухступенчатого ускорителя с анодным слоем // ПМТФ.— 1978.— № 2.
2. Ерофеев В. С., Наумкин В. П., Сафронов И. Н. Смена режимов в ускорителе с анодным слоем и его оптимизация // ПМТФ.— 1981.— № 1.
3. Ерофеев В. С., Сафронов И. Н. Особенности работы двухступенчатого ускорителя с анодным слоем на цезии // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам.— М.: Наука, 1978.
4. Грицаенко В. П., Сафронов И. Н. и др. Характеристики ускорителя с анодным слоем при малых напряжениях // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам.— М.: Наука, 1982.
5. Ерофеев В. С., Ляпин Е. А. Модификация разряда в источнике ионов холловского ускорителя с анодным слоем // Материалы II Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям.— Минск: Ин-т физики АН БССР, 1973.
6. Гаркуша В. И., Лесков Л. В., Ляпин Е. А. Плазменные ускорители с анодным слоем // Плазменные ускорители и ионные инжекторы.— М.: Наука, 1984.
7. Коврижко А. Ф., Сафронов И. Н., Семенкин А. В. Исследование работы двухступенчатого ускорителя с анодным слоем с одним источником электропитания // ПМТФ.— 1982.— № 6.
8. Лесков Л. В., Подгорнова В. Д. Обобщенные вольт-амперные характеристики и критерии подобия газопроточных полых катодов // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Источники и ускорители плазмы».— Харьков, 1983.— № 7.

Поступила 3/VII 1986 г.

УДК 597.823

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ МИКРОДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ

М. Г. Мусаев, А. С. Плешанов, Э. К. Чекалин

(Москва)

На поверхности электродов, покрытых оксидной пленкой, в условиях вакуумных дуг и низких давлений окружающего газа, как известно, образуются нестационарные быстро перемешивающиеся микродуги, которые опираются на делящиеся ячейки катодного пятна, число их пропорционально общему разрядному току [1]. При этом ячейки пятна испытывают взаимное расталкивание, обусловленное собственными магнитными полями ячеек и пятна [1, 2], и распространяются по всей поверхности электрода. С повышением давления окружающего газа взаимное расталкивание ячеек ослабевает, затем прекращается, и микродуги притягиваются друг к другу амперовыми силами, действующими между параллельно текущими токами, что приводит к компактному расположению ячеек пятна и образованию малоподвижной токовой привязки на поверхности электрода.

В условиях сверхзвукового потока аргоновой плазмы за сильными ударными волнами в ударной трубе при скоростях потока $3 \cdot 10^5$ см·с⁻¹, температуре ~ 8000 К и давлении $\sim 0,15$ МПа наблюдалось разбегание делящихся микродуг по поверхности стеночного электрода круглого сечения диаметром 1 см, размещенного на одной из стенок диэлектрической секции ударной трубы. Другой электрод (анод) располагался на противоположной стенке секции. Электроды включались в цепь с предварительной заряженной батареей конденсаторов, разряд которой через меж-