



Феликс Иванович Антонюк родился в 1941 г., окончил в 1967 г. Московский станкоинструментальный институт. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технология машиностроения” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области технологии обработки металлов давлением.

F.Ye. Antonyuk (b. 1941) graduated from the Moscow Machines and Tools Institute in 1967. Ph. D (Eng), assoc. professor of “Technology of Mechanical Engineering” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of technology of metals treatment by pressure.



Андрей Геннадьевич Вяткин родился в 1961 г., окончил в 1986 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Старший преподаватель кафедры “Технология машиностроения” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области технологии обработки металлов давлением.

A.G. Vyatkin (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Senior teacher of “Technology of Mechanical Engineering” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of technology of metals treatment by pressure.

---

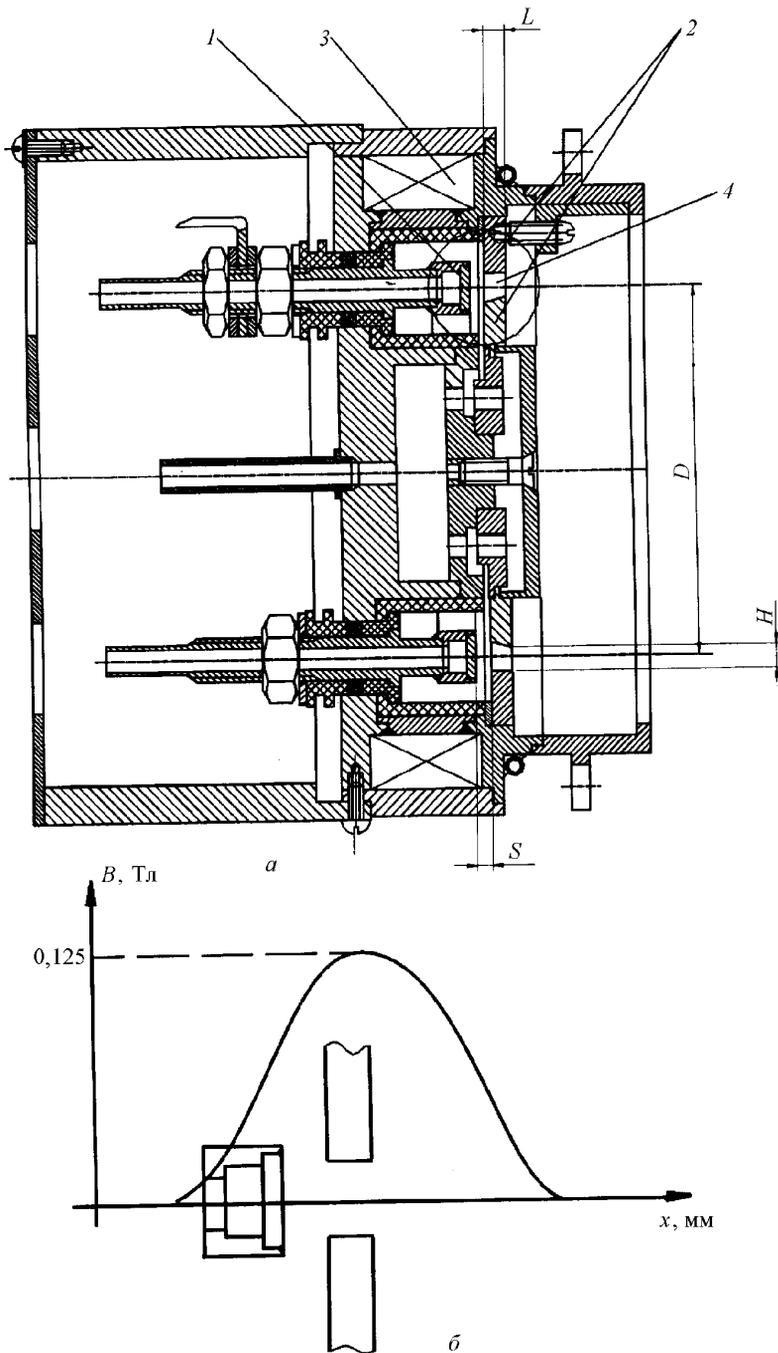
УДК 533.92; 621.384.647

Д. В. Духопельников, А. А. Юрченко

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ “РАДИКАЛ” БЕЗ КАТОДА- КОМПЕНСАТОРА**

*Приведены результаты измерений тока ионного пучка, массового коэффициента полезного действия, доли ионного тока в разрядном токе, а также распределения разрядного тока в элементах технологического ускорителя “Радикал”. Показано, что энергетическая и массовая эффективность такого ускорителя значительно ниже, чем у аналогичного по устройству ионно-плазменного двигателя с анодным слоем.*

Технологический источник ионов “Радикал” широко применяется в вакуумно-плазменных технологиях для травления и очистки поверхности [1]. Ускоритель “Радикал” выполнен по схеме ускорителя с анодным слоем (УАС) [2] без катода-компенсатора (рис. 1, а). По такой же схеме, но с катодом-компенсатором для нейтрализации ионного пучка, выполнены ионно-плазменные двигатели с анодным слоем (ДАС) [2].



**Рис. 1.** УАС “Радикал” (а) и распределение радиальной составляющей магнитного поля вдоль канала (б):

1 — анод; 2 — магнитные полюса; 3 — катушка электромагнита; 4 — ускорительный канал

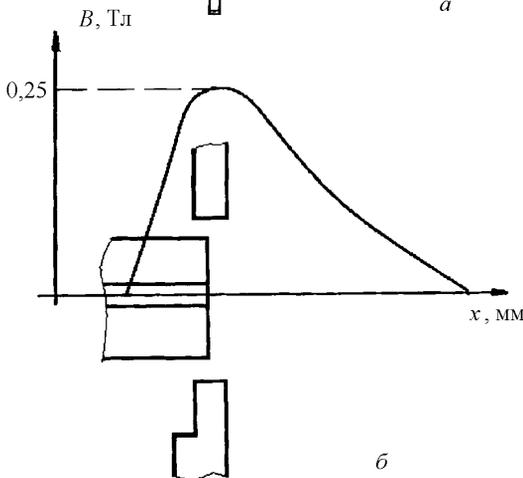
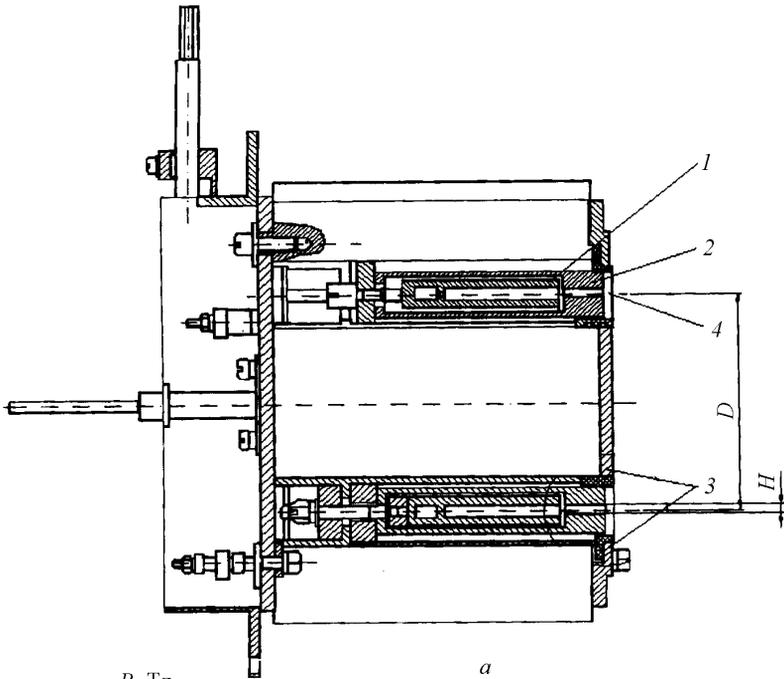
Для повышения КПД ДАС часто делают двухступенчатыми, при этом первая ступень служит для ионизации рабочего тела, вторая — для ускорения ионов. Типичная схема двухступенчатого ДАС D-100 приведена на рис. 2, *a* (катод-компенсатор не показан) [3, 4]. Так как ДАС создавали как двигатели малой тяги для космических аппаратов, то разработчики уделяли большое внимание их энергетическому совершенству. Массовый КПД (коэффициент использования рабочего газа) достигал в ДАС 80–90 %, а доля ионного тока в полном токе разряда составляла 85–95 %, тяговый (энергетический) КПД достигал 65–75 % [5–9]. Как оказалось, в источнике ионов “Радикал” эти параметры значительно ниже: массовый КПД не выше 15 %, доля ионного тока в полном токе разряда не выше 50 %, тяговый КПД менее 7,5 %.

В УАС реализован принцип бездиссипативного ускорения ионов самосогласованным электромагнитным полем [2]. Как видно из рис. 1, *a* и 2, *a*, ускорительным каналом в УАС служит кольцевой зазор между полюсами магнитной системы, ограниченный с одной стороны анодом. Магнитная система создает в кольцевом канале радиальное магнитное поле  $B$ , перпендикулярное электрическому полю  $E$ , направленному вдоль оси канала. Электроны, подвижность которых поперек магнитного поля сильно ограничена, медленно двигаются к аноду. Ионы поступают в канал со стороны анода и ускоряются, не испытывая воздействия магнитного поля. Полюса магнитной системы являются проводниками и находятся под потенциалом катода. Вакуумная камера и полюса магнитной системы находятся под одним потенциалом.

В исследуемом ускорителе средний радиус кольцевого зазора составляет  $D = 100$  мм, ширина межполюсного зазора  $H = 4$  мм, толщина полюсов  $L = 6$  мм, расстояние от среза полюсов до анода  $S = 5$  мм. Распределение радиальной составляющей магнитного поля вдоль канала показано на рис. 1, *б*. В качестве рабочего газа использовался аргон. Величина магнитного поля в зазоре составляет 0,08...0,12 Тл. Плотность разрядного тока  $j$  достигает 10...14 мА/см<sup>2</sup>.

Выбранный для сравнения ДАС D-100 (см. рис. 2, *a*) [3, 4] может работать как в двухступенчатом, так и в одноступенчатом режиме на различных газах (ксенон, криптон, аргон). Средний диаметр кольцевого зазора составляет  $D = 100$  мм, ширина межполюсного зазора  $H = 8$  мм. Распределение радиальной составляющей магнитного поля вдоль канала показано на рис. 2, *б*. Величина магнитного поля в зазоре составляет 0,1...0,3 Тл. Плотность разрядного тока  $j$  достигает 300...500 мА/см<sup>2</sup>.

Основными параметрами, характеризующими энергетическое совершенство ускорителя, являются массовый КПД  $\eta_m$  и тяговый КПД  $\eta_t$ ,



**Рис. 2.** ДАС D-100 (а) и распределение радиальной составляющей магнитного поля вдоль канала (б):

1 и 2 — анод первой и второй ступени; 3 — магнитные полюса; 4 — ускорительный канал

причем, последний определяется главным образом долей ионного тока в разрядном  $\eta_i$  и отношением средней энергии ионов на выходе ускорителя к разрядному напряжению  $\eta_f$ :

$$\eta_m = \frac{I_i}{I_m}; \quad \eta_t = \frac{\eta_i}{\eta_f}; \quad \eta_i = \frac{I_i}{I_P}; \quad \eta_f = \frac{Mv_i^2}{2eU_P}.$$

где  $I_i$  — ионный ток;  $I_m$  — расход в токовых единицах;  $I_P$  — ток раз-

ряда;  $M$  — масса ионов;  $v_i$  — средняя скорость ионов;  $e$  — заряд электрона;  $U_p$  — напряжение разряда.

Ионный ток ускорителя  $I_i$  измерялся коллектором, который устанавливался на выходе ускорительного канала и перекрывал всю площадь ионного пучка. На коллектор подается отрицательный относительно камеры электрический потенциал величиной 20...25 В. Величина потенциала превышает в 5...6 раз электронную температуру, что позволяет отсечь электронную компоненту пучка и собирать на коллектор только ионную составляющую. Ионный ток ускорителя всегда меньше тока разряда  $I_p$ . Расход рабочего газа определялся расходомером как объемный расход  $G_V$  при атмосферном давлении и пересчитывался как массовый расход  $G_m$  и расход в токовых единицах  $I_m$ :

$$G_m = \frac{G_V m}{M_V}; \quad I_m = \frac{G_V N_A e}{M_V},$$

где  $m = 40$  г/моль — молярная масса аргона;  $M_V = 22,4$  л/моль — молярный объем;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  частиц/моль — число Авогадро;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона.

Практически, расход в токовых единицах  $I_m$  показывает, какой максимальный ионный ток можно получить при данном расходе. Для измерения тока на полюсах магнитной системы корпус ускорителя изолировали от вакуумной камеры и соединяли с ней через миллиамперметр.

Среднюю энергию ионов на выходе ускорителя определяли осреднением тормозной характеристики пучка, которую получали трехэлектродным зондом [10 и 11].

Зонд располагался на срезе канала ускорителя со стороны вакуумной камеры. Зонд состоял из расположенных друг за другом двух сеток и коллектора. Сетки предназначены для разделения электронной и ионной компонент плазмы. Первая сетка, обращенная к плазме, находящаяся под потенциалом плазмы, служила для экранирования плазмы от поля второй сетки; вторая сетка, расположенная между первой сеткой и коллектором, — для разрыва плазмы и выделения ионной компоненты. На вторую сетку подавали отрицательный относительно плазмы электрический потенциал. Коллектор служил для торможения и сбора ионной компоненты. На коллектор подавали положительный, относительно второй сетки потенциал. Тормозной характеристикой называется зависимость ионного тока  $I_3$ , поступающего на коллектор от задерживающего положительного потенциала коллектора  $U_k$ .

Средняя энергия ионов вычислялась по тормозной характеристике

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{I_{3\text{max}}} \int_0^{\infty} I_3(U_k) dU_k,$$

где  $I_{3\max}$  — ток зонда при нулевом тормозящем потенциале.

Исследования проводились при скоростях откачки  $S_0 = 70$  л/с и  $S_0 = 450$  л/с.

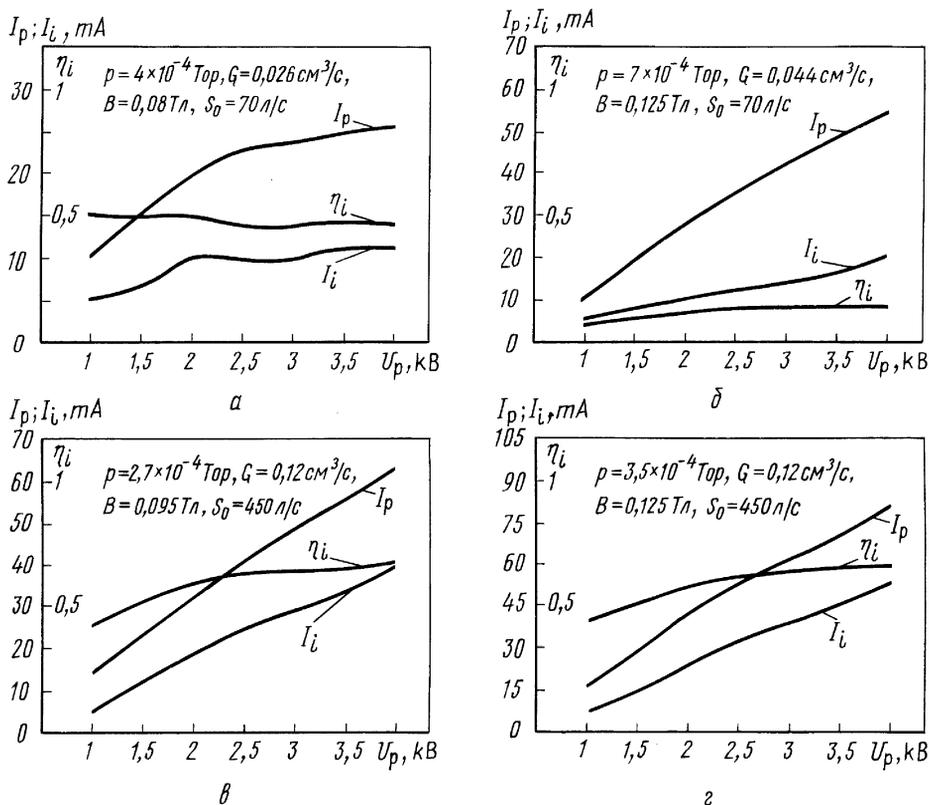
Разрядное напряжение  $U_p$  изменялось от 1 до 4 кВ.

Магнитное поле  $B$  в ускорительном канале изменялось в диапазоне от 0,065 до 0,125 Тл.

На рис. 3 приведены типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) УАС “Радикал” и зависимости ионного тока пучка  $I_i$ , доли ионного тока в токе разряда  $\eta_i$  от разрядного напряжения  $U_p$  при различных магнитных полях  $B$ , расходах  $I_m$  и скоростях откачки  $S_0$ .

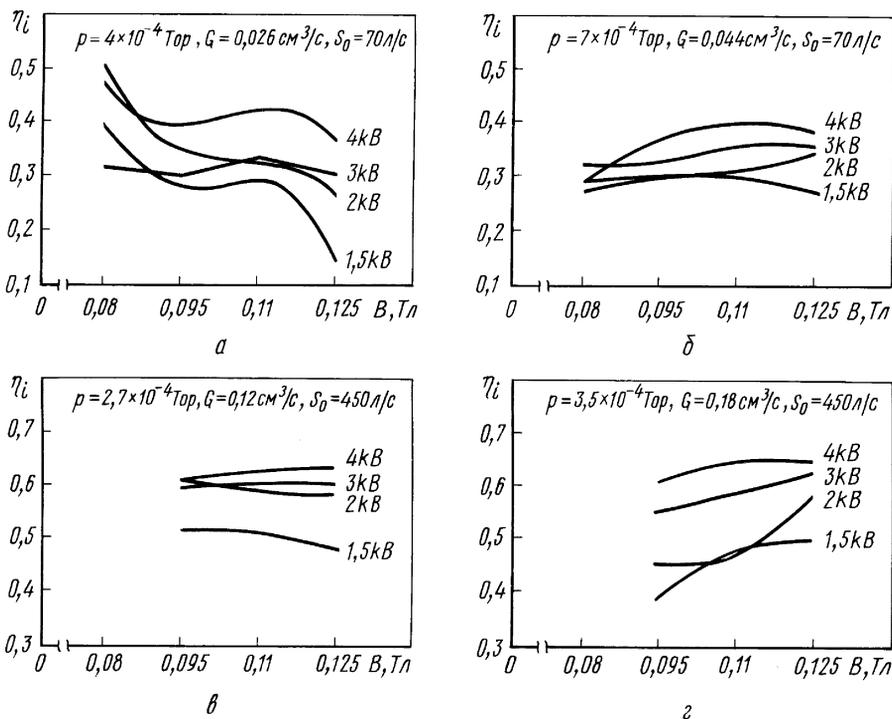
На рис. 4 и 5 приведены зависимости значений  $\eta_i$ ,  $\eta_m$  от величины поля  $B$  в канале ускорителя для фиксированных значений  $S_0$ ,  $I_m$  в диапазоне разрядного напряжения  $U_p = 1 \dots 4$  кВ.

Массовый КПД  $\eta_m$  слабо зависит от индукции магнитного поля и растет с ростом разрядного напряжения. При постоянных расходе ра-



**Рис. 3.** ВАХ, ионный ток, подаваемый на коллектор, и доля ионного тока в токе разряда в зависимости от напряжения разряда:

$p$  — давление в вакуумной камере;  $G$  — объемный расход Ar через УАС;  $B$  — индукция магнитного поля в канале УАС;  $S$  — производительность откачной системы



**Рис. 4.** Доля ионного тока в токе разряда в зависимости от индукции магнитного поля в ускорительном канале для разных значений напряжений разряда

бочего газа и скорости откачки существует оптимальное значение магнитного поля  $B = 0,095 \dots 0,11$  Тл, при котором  $\eta_m$  максимально. При увеличении скорости откачки  $S_0$  оптимальное значение  $B$  смещается в сторону меньших значений.

С увеличением разрядного напряжения доля ионного тока и массовый КПД возрастают.

Было обнаружено, что при увеличении производительности откачной системы  $S_0$  увеличивается доля ионного тока  $\eta_i$  и снижается массовый КПД  $\eta_m$ . Например, при  $S_0 = 70$  л/с максимальная величина доли ионного тока составила  $\eta_i = 0,5$ , а массового КПД  $\eta_m = 0,15$ . При  $S_0 = 450$  л/с максимальная величина доли ионного тока достигала  $\eta_i = 0,65$  при массовом КПД  $\eta_m = 0,08$ .

Доля тока, идущего на полюса магнитной системы, составляет 15–30 % тока разряда.

На рис. 6 приведены типичные тормозные характеристики ионного пучка на выходе ускорителя. Из рис. 6 видно, что энергия ионов не превышает 34 % напряжения разряда. Осреднение тормозных характеристик по энергии показывает, что средняя энергия ионов составляет 10–15 % от разрядного напряжения.

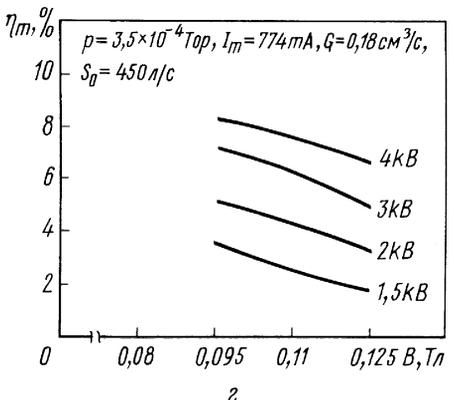
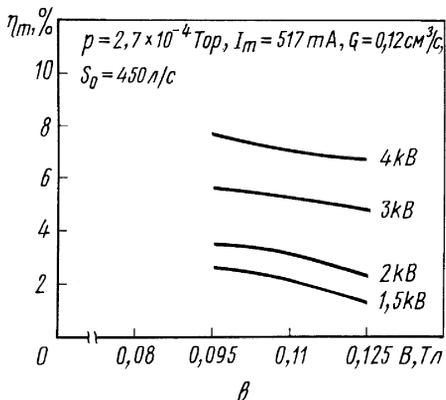
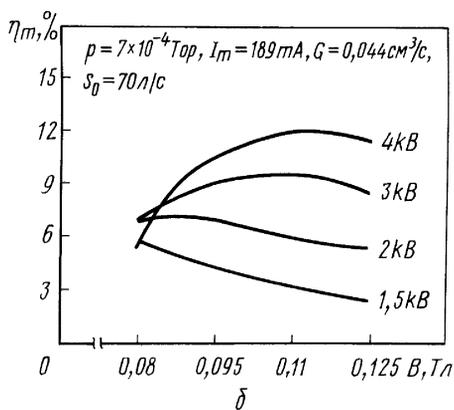
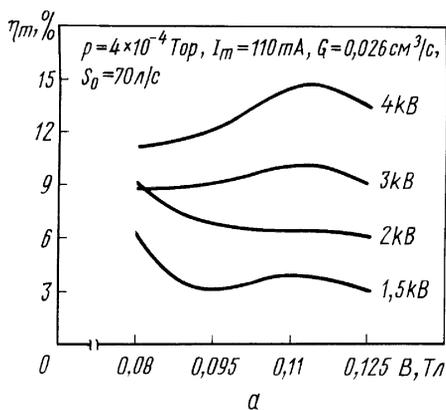


Рис. 5. Массовый КПД в зависимости от индукции магнитного поля в ускорительном канале для разных значений напряжений разряда  $U_p$ ;  $I_m$  — расход газа через ускоритель, выраженный в токовых единицах

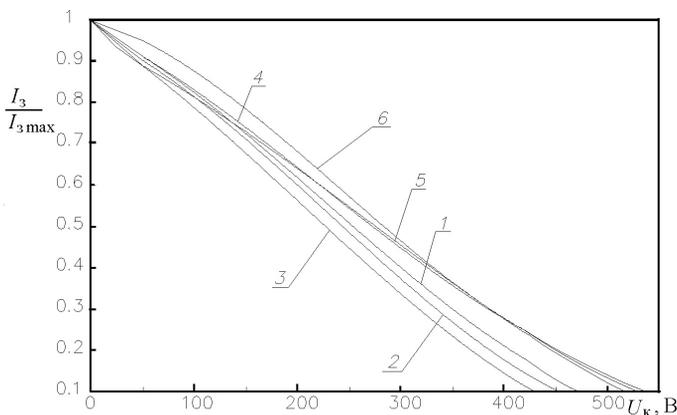


Рис. 6. Тормозные характеристики ионного пучка на выходе ускорителя

В таблице приведены для сравнения геометрические характеристики ускорительного канала: величина разрядного напряжения  $U_p$  — это максимальная величина индукции магнитного поля в ускорительном

канале  $B$ , плотность тока в ускорительном канале  $j$  и основные энергетические характеристики ускорителей “Радикал” и ДАС D-100, полученные при работе на аргоне в оптимальном режиме.

Таблица

### Значения характеристик ускорителей при работе на аргоне

Тип ускорителя	Диаметр/зазор $D/H$ канала, мм	$U_p$ , В	$B$ , Тл	$j$ , mA/cm <sup>2</sup>	$\eta_i$	$\eta_m$	$\eta_f$	$\eta_t$
“Радикал”	100/4	2000	0,125	12	0,5	0,15	0,25	0,125
D-100	100/8	1100	0,3	500	0,55	0,8 (предположительно)	0,8	0,44

**Выводы.** 1. УАС “Радикал” проигрывает типичному ДАС D-100 по тяговому (энергетическому) КПД в 6 раз, а по массовому КПД (коэффициенту использования массы) — в 5 раз.

2. Работа УАС “Радикал” в основном похожа на работу ДАС D-100, однако, низкая эффективность ионизации рабочего газа в канале ускорителя приводит к тому, что величина разрядного тока растет с ростом напряжения.

3. Энергетические характеристики УАС “Радикал” чувствительны к скорости откачки камеры: увеличение скорости откачки приводит к росту доли ионного тока и снижению массового КПД.

4. В УАС “Радикал” большое значение тока на полюсах магнитной системы, в некоторых случаях превосходящее значение тока ионного пучка, приводит к повышенному износу канала ускорителя.

5. В УАС “Радикал” максимальная энергия ионов не превышает 34 % разрядного напряжения. Средняя энергия ионов не превышает 15 % разрядного напряжения.

6. Все сказанное является следствием низкой эффективности ионизации в канале ускорителя. Мерами по повышению вероятности ионизации и улучшению параметров ускорителя могут быть оптимизация величины и профиля магнитного поля в канале УАС; увеличение плотности тока в канале УАС; изменение схемы подачи рабочего тела; применение двухступенчатой схемы ускорения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов М. И., Маишев Ю. П. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989.

3. Tverdokhlevov S. O. Study of double-stage anode layer thruster using inert gases. 23rd International electric propulsion conference. – 1993.
4. Tverdokhlevov S. O., Semenkina A. V. Multimode, high specific impulse hall thruster technology. – 36th AIAA/ASME/ASEE. – Joint propulsion conference. – 2000.
5. Гришин С. Д., Ерофеев В. С., Лесков Л. В. и др. Характеристики холловского ускорителя ионов с анодным слоем // Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. – Минск, 1973.
6. Ерофеев В. С., Ляпин Е. А. Интегральные характеристики источника ионов холловского ускорителя с анодным слоем // Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. – Минск, 1973.
7. Абдюханов М. А., Ерофеев В. С., Лесков Л. В. Работа ускорителя с анодным слоем из различных рабочих веществ // Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. – Минск, 1973.
8. Ерофеев В. С., Ляпин Е. А. Модификация разряда в источнике ионов холловского ускорителя с анодным слоем // Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. – Минск, 1973.
9. Жаринов А. В., Попов Ю. С. “Основы теории ускорителя с замкнутым холловским током и анодным слоем. // Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. – Минск, 1973.
10. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. – М.: Атомиздат, 1969.
11. Подгорный И. М. Лекции по диагностике плазмы. – М.: Атомиздат, 1968.

Статья поступила в редакцию 8.10.2003

Дмитрий Владимирович Духопельников родился в 1962 г., окончил в 1986 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заведующий лабораторией кафедры “Плазменные энергетические установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области ионно-плазменных технологий и устройств.

D.V. Dukhopelnikov (b. 1962) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Head of laboratory of “Plasmous Power Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of ion-plasmous technologies and devices.



Андрей Анатольевич Юрченко родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Плазменные энергетические установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области ионно-плазменных технологий и устройств.

A.A. Yurchenko (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Plasmous Power Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of ion-plasmous technologies and devices.

