

Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200

77-30569/230165

10, октябрь 2011

Духопельников Д. В., Воробьев Е. В., Ивахненко С. В.

УДК 537.534.2

МГТУ им. Н.Э. Баумана

duh@power.bmstu.ru

vemer@rambler.ru

freeorion@yandex.ru

Любой современный технологический процесс нанесения покрытий обязательно сопровождается подготовкой поверхности обрабатываемого изделия. Для вакуумно-дугового нанесения покрытий подготовка поверхности заключается в очистке от органических загрязнителей, удаления абсорбированного слоя воды и активации поверхности. Для проведения этих процессов на современных установках используются источники ионов. Однако, самые распространенные отечественные промышленные вакуумно-дуговые установки «Булат-3Т» и «Булат-6» не были оснащены ионным источником. Для очистки поверхности в этих установках применялась бомбардировка ионами из плазмы дугового разряда. На очищаемую подложку подавался отрицательный электрический потенциал около 1000 В, в котором ионы приобретали необходимую энергию [1]. При этом часто возникают микродуги, которые портят поверхность изделий. Тонкостенные детали при такой обработке легко перегреваются вплоть до расплавления. Для устранения этого недостатка на свободный фланец вакуумной камеры часто устанавливался источник ионов «Радикал» [2] с диаметром ионного пучка 100 мм, что не позволяло обрабатывать всю область напыления. В рамках работ по модернизации установки «Булат-6» в МГТУ им. Н.Э. Баумана был спроектирован источник ионов «ИИ-200» с диаметром ионного пучка 200 мм [3], который позволяет обрабатывать всю зону напыления в установке «Булат».

Источник ионов ИИ-200, как и «Радикал», работает по схеме ускорителя с азимутальным дрейфом электронов [4]. В таких устройствах реализован принцип бездиссипативного ускорения ионов самосогласованным электромагнитным полем. Ускорительным каналом служит кольцевой зазор между полюсами магнитной системы, ограниченный с одной стороны анодом. В кольцевом канале поддерживается радиальное магнитное поле B_r . Для обеспечения оптимальных параметров работы магнитная система ускорителя с анодным слоем должна обеспечивать радиальное магнитное поле в ускорительном канале $B_r=0,08\div0,12$ Тл [5-7]. Линии электрического поля E перпендикулярны линиям магнитного поля B и направлены вдоль оси канала. Электроны, подвижность которых поперек магнитного поля сильно ограничена, медленно передвигаются к аноду за счет редких столкновений, находясь в магнитной ловушке. Это позволяет скомпенсировать избыточный положительный заряд ионов, снимая тем самым ограничение Чайлда-Ленгмюра [4], и, наиболее эффективно использовать энергию электронов для ионизации рабочего газа. Ионы поступают в канал со стороны анода и ускоряются, практически не испытывая воздействия магнитного поля. В качестве рабочего газа в технологических ионных источниках используется аргон.

Схема ионного источника ИИ-200 показана на рис. 1. Основными элементами ускорителя являются водоохлаждаемый анод 1 и магнитная система, состоящая из корпуса 6, семи постоянных магнитов 2 (NdFeB марки N30U), корпуса 1, ферромагнитной шайбы 5, внутреннего 4 и внешнего 3 полюсов. Полюса 3 и 4 одновременно являются стенками ускорительного канала. Величина магнитного поля B_r в ускорительном канале определяется количеством установленных магнитов, тонкая регулировка поля B_r может осуществляться изменением толщины ферромагнитной шайбы.

Основными управляющими параметрами, определяющими работу ускорителя с замкнутым дрейфом электронов, являются напряжение разряда, расход рабочего вещества и индукция магнитного поля в ускорительном канале [4-7]. Кроме этого на режим работы влияет расстояние между анодом и полюсами магнитной системы. Основными показателями эффективности работы технологического ионного источника являются величина ионного тока I_i , его доля в полном токе разряда I_p (токовый КПД) η_i и коэффициент использования массы (массовый КПД) η_m .

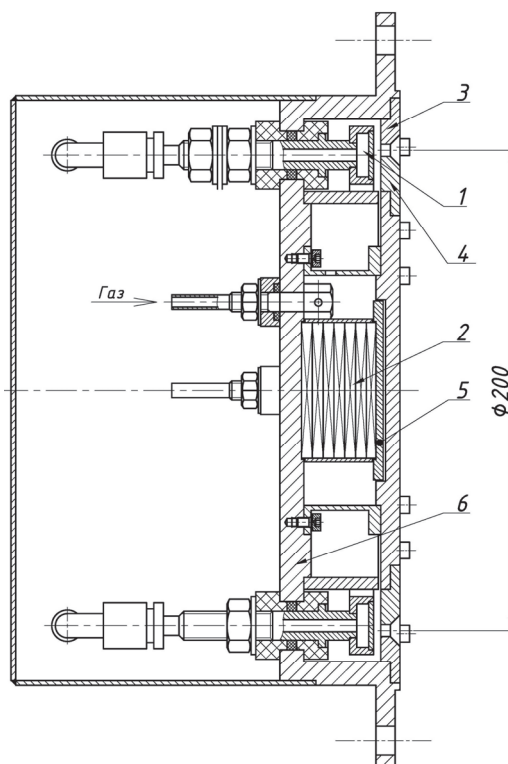


Рис. 1. Схема ускорителя ИИ-200. 1 – анод; 2 – постоянный магнит; 3, 4 – внешний и внутренний магнитные полюса; 5 – ферромагнитная шайба; 6 – корпус.

Для определения оптимального режима работы источника ИИ-200 были сняты вольтамперные характеристики разряда, зависимости ионного тока I_i от напряжения разряда U_p при различных объемных расходах аргона G_v , индукции магнитного поля в ускорительном канале B и различном расстоянии между анодом и полюсами магнитной системы. Ионный ток измерялся при помощи зонда Фарадея, установленного за срезом ускорителя так, чтобы перекрывать всю площадь его пучка (рис. 2). Для отсечки электронного тока на зонд подавался отрицательный относительно вакуумной камеры потенциал. Величина потенциала намного превышала энергию электронов, что обеспечивало приход на зонд только ионной составляющей пучка. Расход рабочего газа определялся U-образным расходомером. Токовый КПД η_i и коэффициент использования массы η_m определялся как:

$$\eta_i = \frac{I_i}{I_p}; \quad \eta_m = \frac{I_i}{I_m}$$

где: I_i - ионный ток; I_m - расход в токовых единицах; I_p - ток разряда.

Для определения расхода газа в токовых единицах I_m объемный расход G_v при атмосферном давлении пересчитывался как массовый расход G_m и расход в токовых единицах I_m :

$$G_m = \frac{G_v \cdot m}{M_v}; \quad I_m = \frac{G_v \cdot N_A \cdot e}{M_v}$$

Остаточное давление в вакуумной камере во всех экспериментах составляло $P_{ост} = 5 \cdot 10^{-3}$ Па.

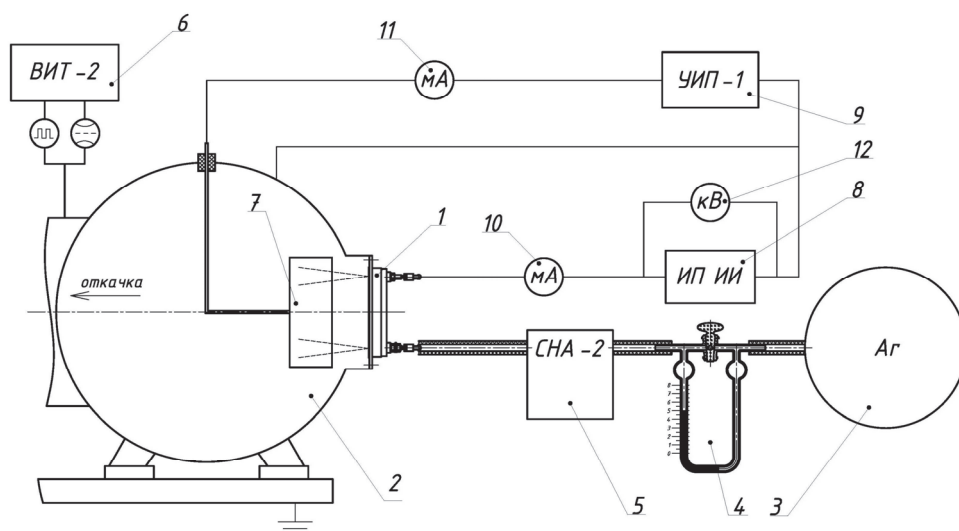


Рис. 2. Схема измерения вольт-амперных характеристик. 1 – ускоритель ИИ-200; 2 – вакуумная камера; 3 – емкость с рабочим веществом; 4 – U-образный расходомер; 5 – система напуска СНА-2; 6 – вакуумметр ВИТ-2; 7 – зонд Фарадея; 8 – блок питания и управления УАС; 9 – источник питания зонда УИП-1; 10, 11 – амперметры М253; 12 – вольтметр блока питания УАС.

Испытания показали, что при различных расходах аргона ионный источник ИИ-200 имеет два различных режима работы: «ускорительный» и «магнетронный». Переход из «ускорительного» в «магнетронный» режим происходит при увеличении расхода аргона $G_v > 7 \cdot 10^{-7}$ м³/с, что соответствует давлению в камере $p = 8 \times 10^{-2}$ Па.

При работе в «ускорительном» режиме визуально наблюдается четкий светящийся контур ионного пучка на всем протяжении от среза ускорителя до обрабатываемой поверхности. Этот режим (рис. 3а) характеризуется небольшим током разряда $I_p = 150 - 300$ мА и высокими значениями токового КПД $\eta_i = 0,7 - 0,8$. Средняя энергия ионов составляет 1,5-1,8 кэВ при напряжении разряда $U_p = 3$ кВ.

При работе в «магнетронном» режиме ионный пучок с четко очерченными границами не формируется, и основной разряд горит на срезе ускорительного канала на полюсах магнитной системы. Внешне разряд похож на разряд в магнетронной распылительной системе [8]. Этот режим (рис. 3б) характеризуется большими токами разряда $I_p > 500$ мА, низким токовым КПД $\eta_i < 0,2 - 0,3$ и низкой энергией ионов (100 – 200 эВ). При этом наблюдается повышенный износ магнитных полюсов.

Коэффициент использования массы во всех режимах менялся мало и составлял $\eta_m = 0,035 - 0,055$.

Зависимости ионного тока I_i и токового КПД η_i от магнитного поля B_r в канале показаны на рис. 4. Зависимости ионного тока I_i и токового КПД η_i от расхода аргона G_v при различных магнитных полях B_r в канале показаны на рис. 5.

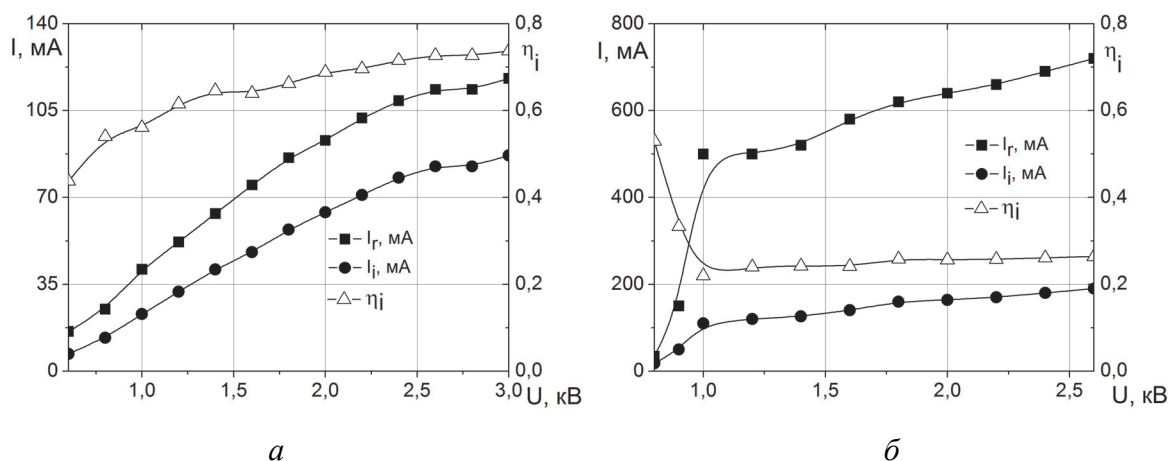


Рис. 3. Характеристики ускорителя ИИ-200 при оптимальном «ускорительном» режиме работы (а) и при «магнетронном» режиме (б).

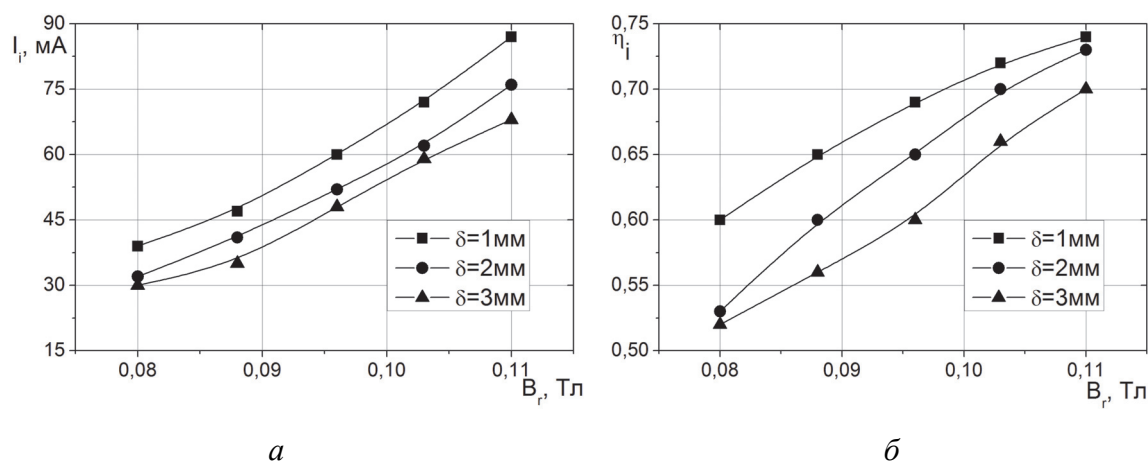


Рис. 4. Зависимости ионного тока (а) и токового КПД (б) от магнитного поля B_r в канале при различных расстояниях между анодом и полюсами. Расход плазмообразующего газа $G_v = 7 \cdot 10^{-7}$ м³/с.

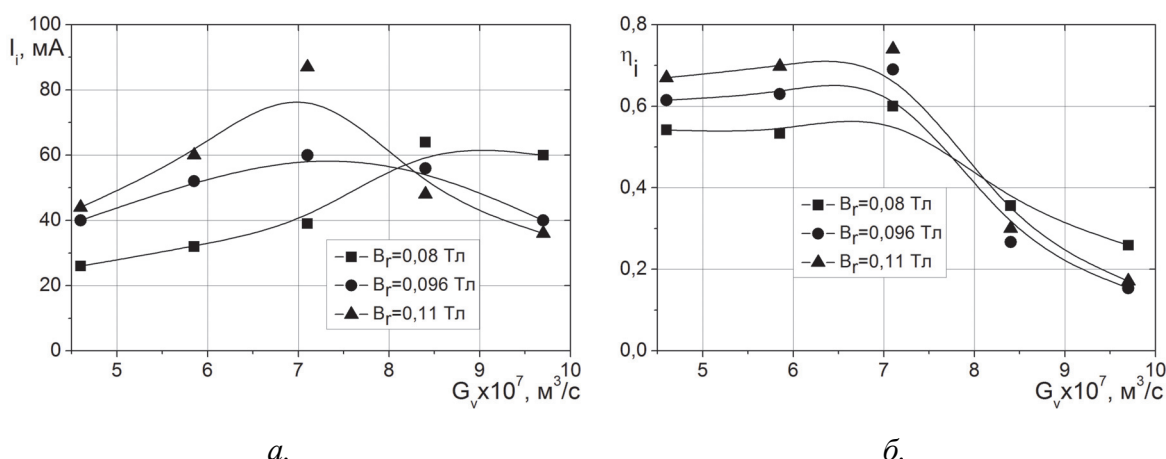


Рис. 5. Зависимости ионного тока (а) и токового КПД (б) от расхода аргона G_v при различных магнитных полях B_r в канале. Расстояние между анодом и полюсами $\delta=1 \text{ мм}$

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний ИИ-200 в «ускорительном» режиме, показал, что наилучшие параметры работы (максимальный ионный ток I_i и токовый КПД η_i) достигаются при минимальном зазоре между анодом и полюсами, наибольшем магнитном поле B_r и расходе аргона при котором происходит переход из «ускорительного» в «магнетронный» режим работы. В оптимальном режиме напряжение разряда составило $U_p=3 \text{ кВ}$, ток разряда $I_p=120 \text{ мА}$, ионный ток $I_i=90 \text{ мА}$ (токовый КПД $\eta_i=0,75$). Этот режим соответствует расходу аргона $G_v = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, индукции магнитного поля $B_r=0,12 \text{ Тл}$ и зазору между анодом и полюсами $\delta=1 \text{ мм}$.

Переход в «магнетронный» режим обусловлен ростом давления в вакуумной камере и соответственно в ускорительном канале. При этом в канале ускорителя снижается величина параметра Холла для электронов [4], что приводит к возможности зажигания магнетронного разряда на поверхности магнитных полюсов [9], которые находятся под отрицательным потенциалом относительно анода. При этом на полюса магнитной системы приходит значительный ионный ток, что увеличивает ток разряда и приводит к распылению полюсов.

Литература

1. *Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.М.* «Вакуумно-дуговые устройства и покрытия» - Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2005, – 236 с.
2. *М.И. Виноградов, Ю.П. Машиев* “Вакуумные процессы и оборудование ионно-и электронно-лучевой технологии”. Машиностроение 1989.
3. *Д.В. Духопельников, А.В. Жуков, Е.В. Воробьёв* и др. «Модернизация установки «Булат-6». В материалах 30-го заседания Международного постоянно действующего научн.-техн. семинара «Электровакuumная техника и технология». Под ред. А.В. Горина. Москва, 2008. С. 74-78
4. *Гришин С.Д.* Электрические ракетные двигатели. Ч.1: Введение. Электростатические двигатели. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999. – 182 с.
5. *С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов.* Электрические ракетные двигатели. – М.: Машиностроение. 1975. – 272 с.
6. *Духопельников Д.В., Юрченко А.А.* Экспериментальное исследование технологического ускорителя "Радикал" без катода компенсатора. Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. –2004. –№3. –С. 74-83.
7. *Алексеев Д.Н.* Исследование особенностей рабочего процесса и ресурса работы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов при низких ускоряющих напряжениях: Дис. канд.техн.наук. –Москва, 1993. –136 с.
8. *Данилин Б.С., Сырчин В.К.* Магнетронные распылительные системы. –М.: Радио и связь, 1982. –72 с.
9. *Духопельников Д.В., Марахтанов М.К.* Значения параметра Холла, характерные для внешней границы зоны замагниченной плазмы в ЕхВ разряде низкого давления //Двигательные, энергетические и электрофизические установки космических летательных аппаратов: Тезисы докладов Всесоюзной юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.В. Квасникова, - Москва, 1992. -С. 13.