

# 03, март 2016

УДК 537.534.2

**Режимы работы малогабаритного технологического ионного источника  
с анодным слоем**

***Велиев Н. С.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки»*

***Наточий Г. Ю.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки»*

***Вершинин И. Н.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки»*

*Научный руководитель: Воробьев Е. В., ассистент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,*

*кафедра «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки»  
[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)*

**Введение**

Благодаря широкому диапазону уникальных свойств, ионно-плазменные тонкоплёночные покрытия различных типов широко применяются в современной промышленности. Существуют покрытия позволяющие улучшить трибологические характеристики поверхностей изделий [1], для увеличения КПД солнечных коллекторов, на их собирающие поверхности наносят селективные покрытия [2], тонкоплёночные защитные покрытия наносятся на поверхности изделий подверженных повышенному износу (режущий инструмент, поршневые кольца и т.д.) [3] или работающих в условиях повышенных температур (лопатки турбин) [4].

Для получения качественных тонкоплёночных покрытий с хорошей адгезией к подложке необходимо перед нанесением тщательно очистить обрабатываемую поверхность. К загрязнениям, препятствующим нанесению качественного покрытия относят как посторонние вещества, попавшие на поверхность изделия и адсорбированные ею (органические вещества, вода и т.д.), так и различные химические соединения (чаще всего, окислы). Для их удаления применяют многоступенчатую очистку, последним

этапом которой является бомбардировка поверхности ускоренными ионами инертных газов непосредственно перед нанесением покрытия. Помимо непосредственного удаления загрязнений, ионная бомбардировка приводит к химической активации поверхности.

Существуют несколько методов очистки поверхности ионной бомбардировкой. Например, для очистки поверхности может применяться тлеющий разряд [5]. В этом случае изделие выступает в роли катода и подвергается бомбардировке ионами, рождаемыми в разряде. Такой способ имеет ряд недостатков: неравномерность плотности ионного тока по поверхности изделия, относительно высокое рабочее давление, возможность повреждения поверхности при возникновении микропробоев. Кроме того, для очистки тлеющим разрядом изделие должно быть проводящим.

Указанных недостатков лишены методы очистки, при которых поверхность подвергается воздействию уже сформированного потока высокоэнергетичных ионов. При этом ионный пучок создается неподвижным ионным источником и направляется на вращающиеся изделия. Ускоренные ионы бомбардируют обрабатываемую поверхность, удаляя тонкий приповерхностный слой вместе со всеми загрязнениями.

Наиболее распространенным типом ионного источника, применяемого в современной промышленности для ионной очистки, является ускоритель с анодным слоем – разновидность холловского ускорителя с замкнутым дрейфом электронов [6]. Для работы таких ускорителей в замкнутом ускорительном канале формируются скрещенные электрическое и магнитное поля. Электроны, попав, или родившись в канале, оказываются в своеобразной магнитной ловушке, ограничивающей их подвижность в направлении анода. В результате, создаются условия для бездиссипативного ускорения ионов в плазме. Отличительной особенностью ускорителей с анодным слоем являются проводящие стенки ускорительного канала. В большинстве случаев, в промышленности используются ускорители без внешнего катода-компенсатора, а нейтрализация избыточного положительного заряда ионного пучка осуществляется за счёт остаточного газа и вторичной электронной эмиссии с обрабатываемой поверхности. Поэтому единственным недостатком такого метода является невысокая плотность тока и, как следствие, невозможность прогрева деталей перед нанесением покрытия.

В настоящее время не существует чёткой методики расчёта рабочих характеристик ускорителей с анодным слоем и конструкторы при их разработке полагаются, в основном, на собственный опыт. При этом, точные значения рабочих параметров нового ускорителя остаются неизвестными и перед вводом в эксплуатацию должны быть экспериментально измерены для успешного включения в технологический процесс.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование рабочих режимов малогабаритного ускорителя с анодным слоем УАС-40, работающего на постоянных магнитах, и определение его оптимальных характеристик.

### Описание экспериментов

Объектом исследования данной работы был ускоритель с анодным слоем УАС-40, схема которого представлена на рисунке 1. УАС-40 имеет цилиндрический ускорительный канал диаметром 40 мм. Фотография работающего УАС-40 приведена на рисунке 5.

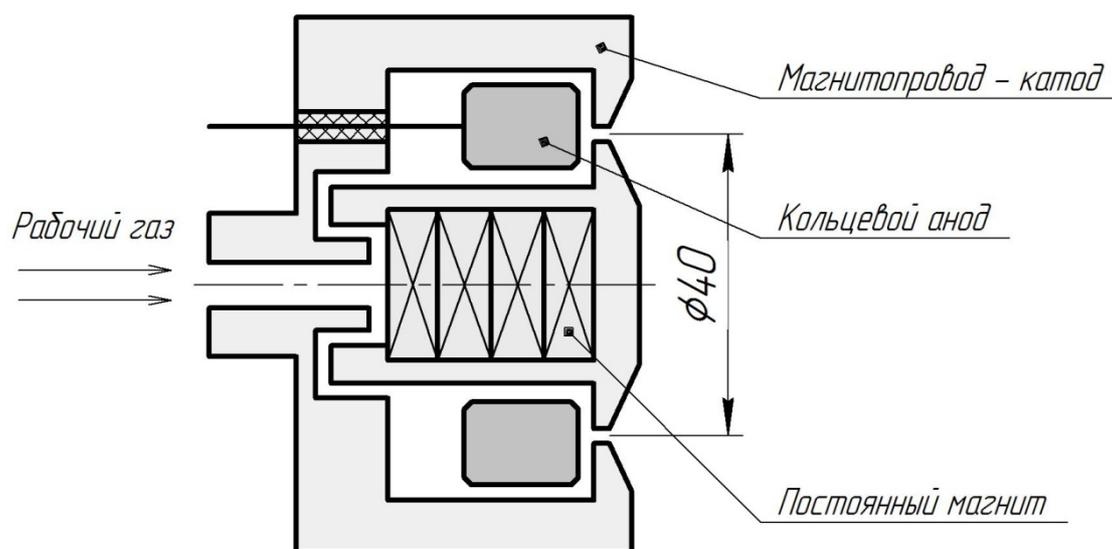


Рис. 1. Схема ионного источника УАС-40

УАС-40 был установлен на фланце вакуумной камеры. Откачка вакуумной камеры осуществлялась безмасляной откачной системой на основе турбомолекулярного насоса до остаточного давления  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па ( $1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст.). В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, который подавался в ускоритель через регулятор расхода газа MKS Instruments 2179 А. Давление во время экспериментов измерялось инверсномагнетронным вакуумметром. Ускоритель работал без катода-компенсатора.

В работе исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости ионного тока пучка от напряжения разряда. Принципиальная схема эксперимента показана на рисунке 2. Ток разряда измерялся миллиамперметром, включенным в цепь питания разряда ускорителя. Для измерения ионного тока использовался ионный зонд Фарадея, установленный напротив ускорителя так, чтобы его собирающая поверхность полностью перехватывала весь ионный пучок. Для предотвращения потока электронов из плазмы пучка на зонд подавался отрицательный относительно катода ускорителя

потенциал -50 В, значительно превышающий энергию электронов. Ток в цепи зонда измерялся миллиамперметром, включённым в его цепь. Основной вклад в погрешность измерения ионного тока при помощи зонда Фарадея вносит вторичная ион-электронная эмиссия с его собирающей поверхности. С учетом вторичной эмиссии ионный ток пучка вычислялся по формуле  $I_i = \frac{I_{probe}}{1+\gamma}$ , где  $I_{probe}$  – ток в цепи зонда Фарадея;  $\gamma$  – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии, равный для медной поверхности и ионов аргона с энергиями до 3000 эВ примерно 0,1 [7].

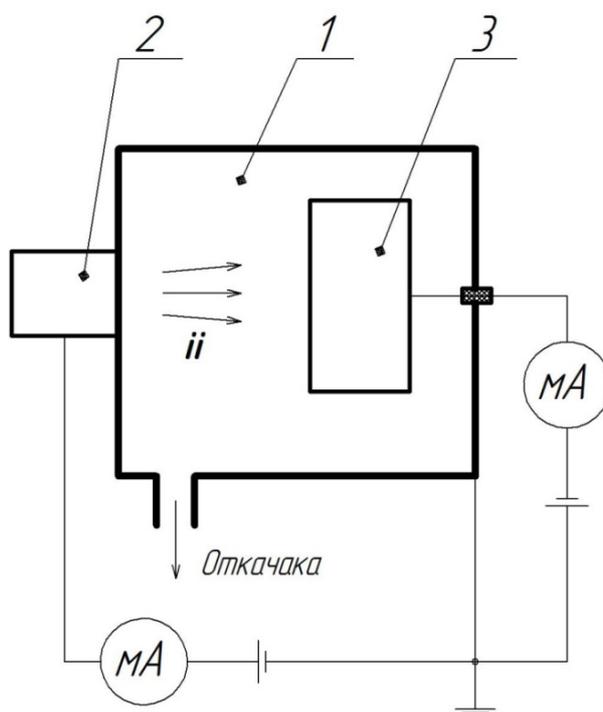


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента: 1 – вакуумная камера; 2 – УАС-40; 3 – зонд Фарадея.

Характеристики ускорителя измерялись при расходах рабочего вещества от 2 до 12 scsm и напряжениях разряда от 800 до 3000 В.

### Результаты экспериментов

Основными характеристиками рабочего режима ионного источника являются напряжение и ток разряда, ионный ток пучка, средняя энергия ионов, расход рабочего вещества и индукция магнитного поля в ускорительном канале. Оператор, управляя ионным источником на постоянных магнитах, имеет возможность независимо изменять только напряжение разряда и расход рабочего вещества, от которых зависят все остальные характеристики. Эффективность работы технологического ионного источника

определяется ионным током пучка и энергией ионов, а экономичность – долей ионного тока в полном токе разряда  $\eta_i$ , и коэффициентом использования массы  $\eta_m$ . На рис. 3 представлены вольтамперные характеристики, зависимости ионного тока и токового КПД от напряжения при различных расходах аргона. Токовый КПД ускорителя вычислялся по формуле  $\eta_i = \frac{I_i}{I}$ .

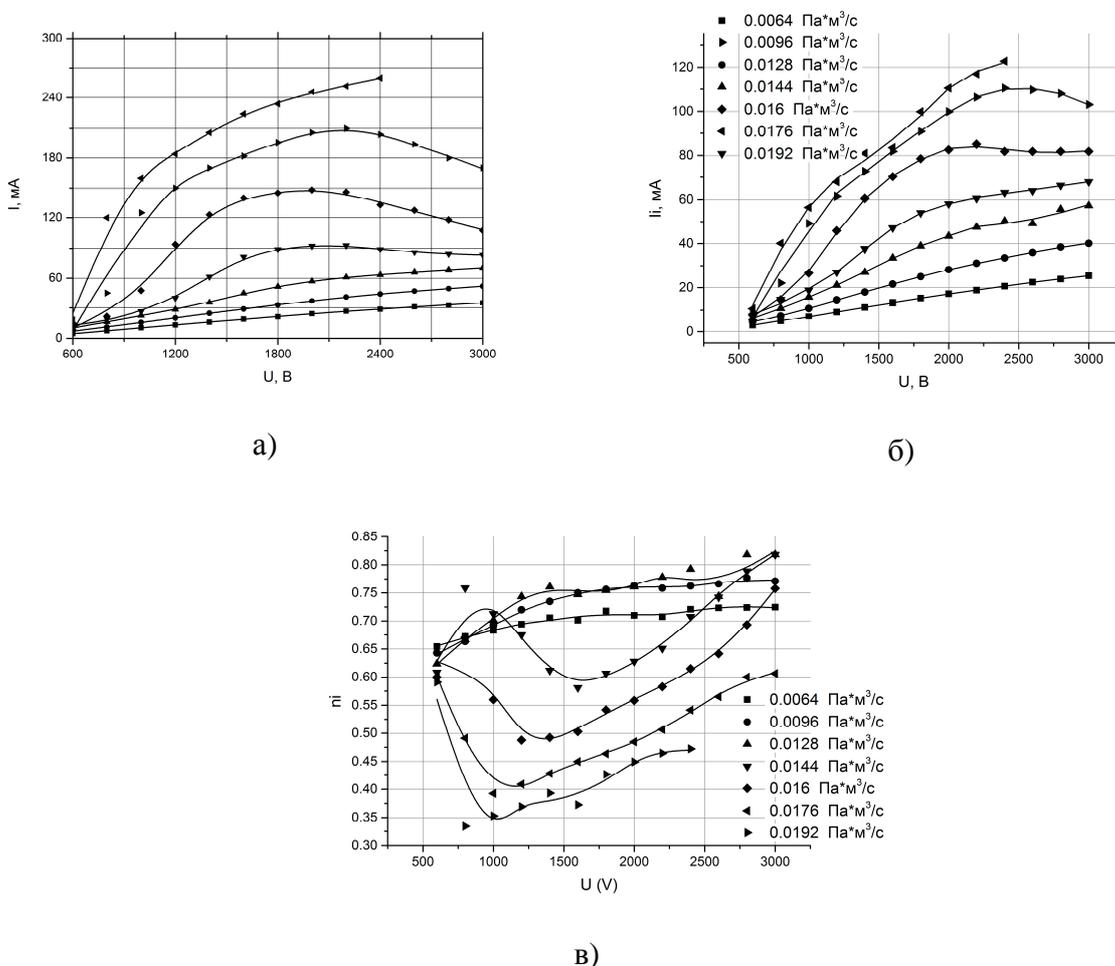


Рис. 3. ВАХ (а), зависимости ионного тока (б) и токового КПД (в) от напряжения

При низких значениях расхода рабочего вещества наблюдается монотонное увеличение тока разряда и ионного тока с ростом напряжения, токовый КПД во всем диапазоне напряжений превышает 70 %. С ростом расхода ионный ток и ток разряда увеличиваются. При повышении расхода аргона выше критической отметки режим работы ионного источника изменяется: ускоряется рост тока разряда с увеличением расхода аргона (рис. 3а), уменьшается токовый КПД (рис. 3б), зависимости ионного тока и тока разряда от напряжения из монотонных превращаются в экстремальные. Также значительно изменяется и внешний вид разряда. При низких расходах аргона наблюдается чётко выраженный ионный пучок, небольшое расширение которого обусловлено

азимутальным отклонением ионов в ускорительном канале под действием сильного магнитного поля [8]. При значениях расхода аргона выше критической отметки, ионный пучок практически исчезает, а вблизи магнитных полюсов появляется яркое свечение, напоминающее магнетронный разряд.

Наличие двух режимов: нормального ускорительного при низких расходах рабочего вещества и магнетронного – при высоких напряжениях характерно для всех технологических ускорителей с анодным слоем, работающих без катода-компенсатора. В работе [9] переход между двумя режимами связывают со снижением параметра Холла электронов, что приводит к зажиганию магнетронного разряда на заземленных полюсах магнитной системы.

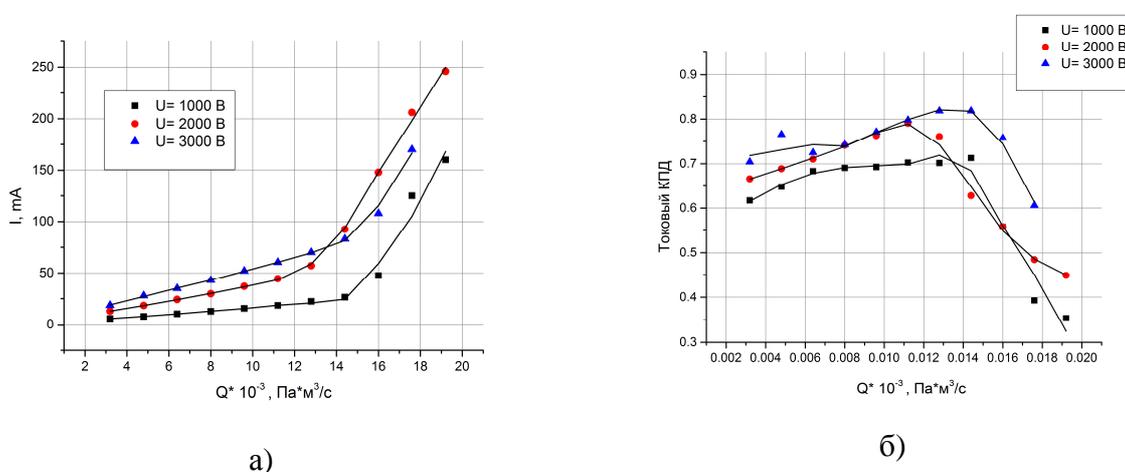


Рис. 4. Зависимости тока разряда (а) и токового КПД (б) от расхода аргона при различных напряжениях разряда.



Рис. 5. Фотографии разряда ионного источника УАС-40 при работе в нормальном ускорительном (а) и магнетронном (б) режимах

Переход ионного источника в магнетронный режим работы сопровождается снижением средней энергии ионов и сильным расхождением ионного пучка, что делает его непригодным для использования для очистки и активации поверхности перед

нанесением покрытия. При работе в этом режиме на полюса магнитной системы приходит значительный ионный ток, что приводит к их интенсивному распылению и загрязнению атмосферы вакуумной камеры и обрабатываемых поверхностей материалом полюсных наконечников. Кроме того, распыление полюсных наконечников снижает ресурс устройства. В тоже время, в магнетронном режиме ионный источник может работать при низких, 300 – 1000 В, напряжениях разряда, выдавая значительный ионный ток, что позволяет использовать ускорители с анодным слоем для ионного ассистирования при нанесении покрытий.

Критическое значение расхода аргона при котором происходит переход ускорителя в магнетронный режим можно определить по излому зависимости тока разряда от расхода (рис. 4а). Ускоритель УАС-40 имеет различные критические значения расхода в разных диапазонах напряжения разряда. При низких напряжениях разряда переход в магнетронный режим происходит при расходе 9 сссм, в области средних напряжений – при 8 сссм. Наилучшую работу ускоритель демонстрирует при высоком напряжении разряда, режим работы изменяется при 9.5 сссм.

Коэффициент использования рабочего вещества (массовый КПД) ускорителя УАС-40 в нормальном ускорительном режиме при напряжении разряда 3000 В составляет 9 – 11 % (рис. №). В магнетронном режиме массовый КПД немного увеличивается, что обусловлено ростом ионного тока.

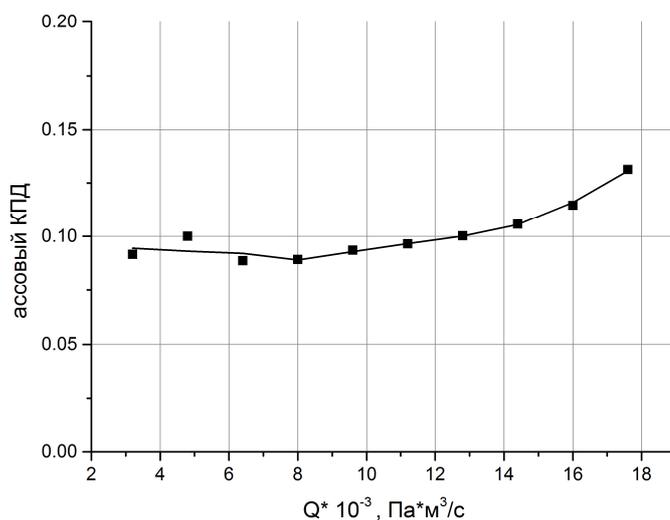


Рис. 6. Зависимость массового КПД ускорителя от расхода рабочего вещества при напряжении разряда 3000 В.

## Заключение

Оптимальными режимами работы технологического ионного источника являются режимы, при которых достигаются максимально возможные значения ионного тока при высоких значениях токового КПД. Анализ представленных результатов показывает, что в различных диапазонах напряжения оптимальные режимы работы ускорителя УАС-40 отличаются. При напряжениях ниже 1000 В оптимальные режимы достигаются при расходе аргона 9 сссм. При напряжениях от 1500 до 2500 В оптимальному режиму соответствует расход 8 сссм. При высоких напряжениях, 2500 – 3000 В, наилучшие характеристики достигаются при расходе 9 – 10 сссм. Необходимо отметить, что при расходе аргона 8 сссм во всем диапазоне рабочих напряжений ускоритель демонстрирует стабильно высокие значения ионного тока при токовом КПД выше 70 %. При высоких значениях расхода газа ускоритель переходит в магнетронный режим работы, непригодный для использования для ионной очистки поверхности.

## Список литературы

- [1]. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Кириллов Д.В. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления // Нанотехнологии. 2014. № 9 (39). С. 30-32.
- [2]. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К. Селективные покрытия солнечных коллекторов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 5. С. 75-80.
- [3]. Кулешов А.К., Углов В.В., Чаевский В.В., Анищик В.М. Свойства покрытий на основе нитридов Cr, Ti, Mo с включением металлов, осаждённых на режущий инструмент // Трение и износ. 2011. № 3. С. 267-270.
- [4]. Мингажев А.Д., Новиков А.В., Криони Н.К., Бекишев Р.Р. Защитное покрытие для лопаток паровых турбин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2014. № 4. С. 257-278.
- [5]. Лучкин А.Г., Лучкин Г.С. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами // Вестник Казанского Технологического Университета. 2012. № 15. С. 208-210.
- [6]. Островский В.Г., Смоленцев А.А., Соколов Б.А., Черашев Д.В. Электроракетная двигательная установка на основе двигателей с замкнутым дрейфом электронов // Космическая техника и технологии. 2013. № 2. С. 42-52.

- [7]. Медвед Д., Штрассер Й. Кинетическая эмиссия электронов с твёрдых тел // Успехи физических наук. 1967. № 91. С. 485-526.
- [8]. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В. Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем // Наука и образование МГТУ им. Н. Э. Баумана электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0483882.
- [9]. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.В. 77-30569/230165 Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200 // Наука и образование МГТУ им. Н. Э. Баумана электрон. журн.. 2011. № 13. С. 19-21. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/230165.html> (дата обращения 29.10.2015).