

УДК 621.793.74

Н.П. СТЕПАНУШКИН<sup>1</sup>, В.П. КОЛЕСНИК<sup>1</sup>, Д.В. СЛЮСАРЬ<sup>1</sup>, О.В. ЖОРНИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

<sup>2</sup> *ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С РАДИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Рассмотрены результаты экспериментального исследования технологического плазменного ионного ускорителя с радиальным магнитным полем. На их основании сделан вывод об оправданности применения газоразрядных камер с радиальным магнитным полем и сферических ионно-оптических систем при создании подобных технологических ускорителей.

**плазменный ионный ускоритель, ионно-оптическая система, газоразрядная камера, ионно-плазменное технологическое оборудование, распыление, ионный пучок**

### Введение

В настоящее время технологические плазменные ионные ускорители находят всё более широкое применение. Они используются в микроэлектронике, оптической промышленности, при производстве режущего инструмента, а также при производстве различных деталей газотурбинных двигателей.

### Постановка задачи

При применении в различных технологических процессах плазменный ионный ускоритель должен обеспечивать максимально возможную и регулируемую в широких пределах плотность ионного тока в пучке. Также важным технологическим параметром является равномерность плотности ионного тока по сечению пучка.

При проведении технологических процессов необходимо точно контролировать энергию ионов в пучке. Кроме того, технологический плазменный ионный ускоритель должен быть совместим с остальным оборудованием вакуумной технологической установки.

Следовательно, можно сформулировать требования, которым должен удовлетворять технологический плазменный ионный ускоритель:

1) максимальная, допустимая физическими законами, плотность ионного тока в пучке, что позволяет достичь необходимой производительности;

2) высокая однородность распределения плотности ионного тока по сечению пучка, что даёт возможность обрабатывать изделия с габаритами сопоставимыми с диаметром пучка;

3) высокий коэффициент использования рабочего тела, что является существенным при малой производительности откачивающей вакуумной системы;

4) возможность получения потоков частиц с точно заданными и регулируемыми в широких пределах плотностью тока и энергией, что позволяет точно контролировать все параметры технологического процесса;

5) простота конструкции;

6) ресурс, позволяющий в течение срока эксплуатации окупить производство ускорителя.

### Результаты исследований

В Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» был разработан, изготовлен и испытан технологический плазменный ионный ускоритель [1] с радиальным магнитным полем и сферическими электродами ионно-оптической системы.

Схема ускорителя представлена на рис. 1.

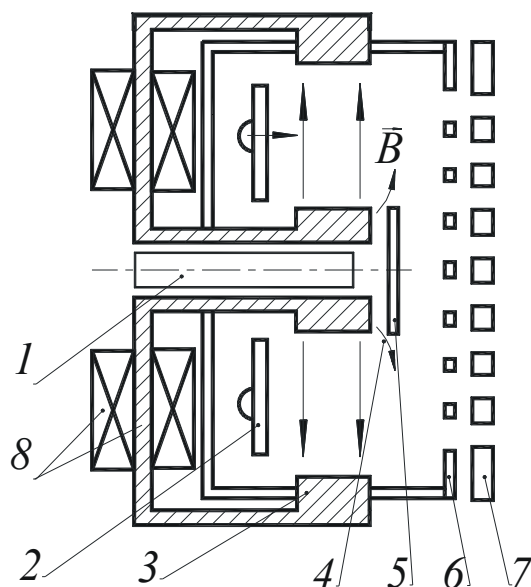


Рис. 1. Технологический плазменный ионный ускоритель с радиальным магнитным полем: 1 – катод; 2 – анод; 3 – газоразрядная камера; 4 – катодная щель; 5 – отражатель; 6 – экранный электрод; 7 – ускоряющий электрод; 8 – магнитная система

Газоразрядная камера (3) представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, на котором укреплены остальные узлы ускорителя. Магнитная система (6) выполнена из шести радиальных магнитопроводов с катушками, замкнутых на периферийный и центральный полюсные наконечники. Анод выполнен в виде диска с коллектором, через который подаётся в газоразрядную камеру основной расход рабочего тела. В ускорителе применён газоразрядный полый катод, установленный в центральном полюсном наконечнике. В газоразрядном полом катоде в качестве эмиттера электронов используется вставка, выполненная из высокоэмиссионного материала  $\text{LaB}_6$ . Для запуска катода и поддержания стабильного разряда в ГРПК используется вольфрамовый нагреватель. За катодом (по потоку) устанавливается отражатель (5), образующий вместе с центральным полюсным наконечником катодную щель (4), через которую электроны из прикатодной плазмы поступают в объём газоразрядной камеры.

Исследование распределения температуры электронов в сечении, соответствующем катодной щели (рис. 2) подтвердило механизм нагрева электронов в ней. Измерения параметров плазмы проводилось с помощью электростатических зондов.

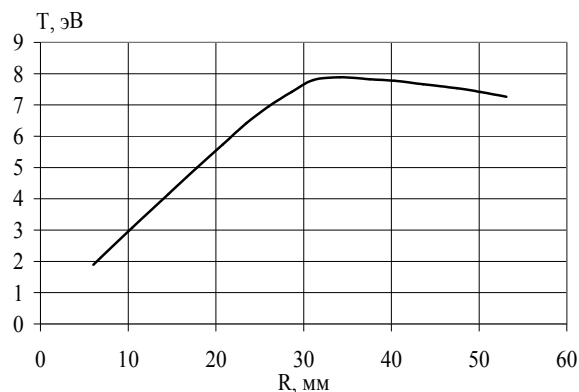


Рис. 2. Распределение температуры электронов по радиусу в сечении катодной щели

При проектировании магнитной системы учитывались следующие моменты. В катодной щели осевая составляющая магнитного поля должна быть много больше радиальной. Это необходимо для того, чтобы при движении электронов от оси ускорителя к периферии катодной щели в скрещенных  $E \perp H$  полях создавались условия, способствующие их нагреву [2]. Таким образом, в объём газоразрядной камеры поступают высокоэнергетичные электроны, являющиеся причиной эффективной ионизации рабочего газа.

Основное радиальное магнитное поле создаётся в зоне перед анодом, что препятствует свободному уходу электронов из объёма газоразрядной камеры, тем самым, улучшая коэффициент их использования. В зоне перед ионно-оптической системой величина магнитной индукции на порядок меньше, что улучшает равномерность распределения плотности плазмы перед экранным электродом, в свою очередь, повышая равномерность ионного пучка.

Ионно-оптическая система представляет собой узел, состоящий из трёх электродов: экранного (6), ускоряющего (7) и замедляющего. Первые два элек-

трода – это густо перфорированные сферические сегменты. Применение сферических электродов в конструкции ионно-оптической системы даёт следующие преимущества [3]:

1) ионно-оптическая система сферической формы имеет высокую жёсткость, что позволяет применять электроды меньшей толщины. Это позволяет повысить плотность ионного пучка;

2) однонаправленное перемещение электродов, вызванное температурными напряжениями, что позволяет сохранять постоянным межэлектродный зазор. Это резко уменьшает число пробоев, позволяя ускорителю работать при меньших зазорах между электродами ионно-оптической системы, что также позволяет добиться большей плотности ионного пучка.

Разработанная ионно-оптическая система является поджатой, то есть такой, у которой диаметр отверстий в экранном электроде больше, чем в ускоряющем. Ионно-оптическая система данной конструкции может работать при меньших расходах рабочего газа при одном и том же ионном токе.

Следует отметить, что в электростатических ускорителях, каковым является технологический плазменный ионный ускоритель, при проектировании ионно-оптических систем необходимо применять все меры, приближающие плотность ионного тока в пучке к максимальной. Одной из таких мер является максимальная прозрачность экранного электрода для ионного потока. В нашем случае эта величина равняется 0,65.

Третий замедляющий электрод представляет собой кольцо из нержавеющей стали, выполненное заодно с экранном кожухом ускорителя.

Ускоритель с радиальным магнитным полем даёт возможность применять газоразрядные камеры с малым отношением длины разрядной камеры  $L$  к ее диаметру  $D$ . В нашем случае  $L/D = 0,5$ . Газоразрядные камеры с малой длиной имеют следующие преимущества:

1) уменьшаются потери ионов на стенках ГРК из-за уменьшения их площади;

2) в результате уменьшения длины свободного пробега снижается количество двукратно заряженных ионов.

Первое улучшает энергетические характеристики ТПИУ и увеличивает коэффициент использования рабочего тела. Второе увеличивает ресурс ТПИУ. Измерения, проведенные на работающем ускорителе, показали, что доля двукратно заряженных тонов составляет  $\sim 0,7\%$  от общего количества ионов. Проведенные исследования параметров плазмы в объёме газоразрядной камеры показали, что распределения плотности плазмы перед экраном электродом (рис. 3), которая на прямую связана с однородностью пучка, лежит на уровне  $\sim 0,8$ .

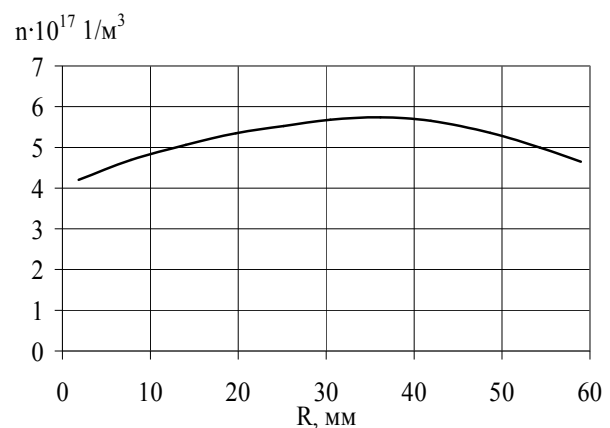


Рис. 3. Распределение плотности плазмы по радиусу в газоразрядной камере перед экраном электродом

Данная модель технологического плазменного ионного ускорителя предназначена для работы с газообразными рабочими телами.

Газ подаётся в газоразрядную камеру по двум каналам. Одна часть ( $\sim 20 \div 30\%$ ) направляется в катод, а вторая часть ( $\sim 70 \div 80\%$ ) – в анодный коллектор.

Возможно применение двух различных газов. Для работы катода необходим нейтральный газ (Ар-

гон, Криптон, Ксенон), причём для увеличения ресурса газоразрядного полого катода этот газ должен иметь чистоту на уровне 0,999.

В качестве основного рабочего тела возможно применение как нейтральных газов, так и реактивных (например  $O_2$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$ ). Испытания и исследования описываемого технологического плазменного ионного ускорителя проводились на аргоне. Регулировка расхода производилась с помощью натекателей. Диапазон регулировки энергии ионов в пучке лежит в пределах  $0,5 \div 3,5$  кэВ, при стабильной работе ускорителя. Изучение эрозии электродов ионно-оптической системы показало, что ожидаемый ресурс ускорителя, обусловленный их стойкостью, лежит на уровне 3000 часов.

В настоящее время проводятся работы по совершенствованию конструкции технологического плазменного ионного ускорителя, его физическим исследованиям и расширению области его применения.

### Заключение

На основании проведенных исследований показано, что использование в конструкции технологических плазменных ионных ускорителей газоразрядных камер с радиальным магнитным полем позволяет добиться высокой равномерности плотности ионного тока по сечению пучка. Кроме того, газоразрядные камеры подобной конструкции обеспечивают высокий коэффициент использования рабочего тела, что очень важно при невысокой производительности вакуумной системы технологической установки. Это даёт возможность сделать вывод о целесообразности применения газоразрядных камер с

радиальным магнитным полем при проектировании технологических плазменных ускорителей.

Проведенные исследования также показали, что сферические ионно-оптические системы позволяют получать при помощи технологических плазменных ионных ускорителей ионные пучки с высокой, регулируемой в широком диапазоне плотностью ионного тока. При этом они обладают достаточно большим ресурсом и стабильностью параметров. Благодаря этим своим качествам сферические ионно-оптические системы тоже могут быть рекомендованы для использования в технологических плазменных ионных ускорителях.

### Литература

1. Применение плазменного ионного ускорителя при производстве и ремонте изделий авиационно-космической техники / Н.В. Белан, А.Н. Прокопенко, Н.П. Степанушкин, В.П. Колесник, Д.В. Слюсарь, В.В. Севернюк // Новые разработки и технологии в газотурбостроении. Материалы 2-й научно-технической конференции, 23-25 июня 2004 г. – Кривой Рог: Констар. – С. 63 – 66.
2. Brophy J.R., Wiebur P.J. Design model for the baffle aperture region of a hollow cathode thruster // AJAAPaper. – 1981. – № 752. – P. 8.
3. Rawlin V.K. Performance of 30-sm ion thrusters with dished acceleratorgrid. // AJAAPaper. – 1973. – № 1055. – P. 11.

*Поступила в редакцию 25.04.2005.*

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.К. Гнап, Национальный аграрный университет, Харьков.