

## **ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ В ИНВЕРСНОМ МАГНЕТРОНЕ С ГАЗОВЫМ АНОДОМ, СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ КАТОДНЫМИ УЗЛАМИ И ОСЕВЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ**

Совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) в целях повышения их удельной мощности, КПД и ресурса является одной из актуальнейших задач, стоящих перед разработчиками авиационной техники. Добиться существенного увеличения этих показателей исключительно благодаря совершенствованию конструкции ГТД без разработки новых технологий их производства невозможно. В особенности это касается лопаток ГТД как элементов конструкции, работающих в наиболее тяжёлых условиях.

Так, в последнее время при создании компрессоров ГТД всё чаще отказываются от использования колес, состоящих из отдельных лопаток, в пользу моноколес [1]. Это позволяет улучшить стабильность параметров профиля лопаток и снизить трудоемкость и время изготовления колес. Однако при нанесении на лопатки моноколес эррозионно стойких покрытий возникает целый ряд проблем. Это связано с тем, что размеры моноколес существенно больше размеров отдельных лопаток (до 1000 мм и более). Как следствие возникает необходимость в применении оборудования, способного обеспечить нанесение покрытия на большие поверхности сложной геометрии. При этом процент брака должен быть минимален, так как в этом случае нет возможности замены одной или нескольких бракованных лопаток.

Для лопаток перспективных ГТД характерно возникновение на профиле пера лопаток различных зон, отличающихся друг от друга уровнем температур, напряжений и знаком этих напряжений. Из-за этого покрытие одного типа не может эффективно защищать всю поверхность лопатки. Решить эту задачу можно путем контролируемого нанесения покрытия, т.е. такого технологического процесса, при котором возможно получать покрытие различного химического состава и толщины на различных участках подложки. Это позволит реализовать принцип конструирования покрытий, когда проводится профилирование толщины покрытия в различных зонах на поверхности пера лопатки и используются покрытия различного типа в зависимости от условий их работы в этих зонах [2].

К настоящему времени были предприняты попытки разработки новых технологических процессов, в которых используются уже существующее технологическое оборудование для решения данной задачи. Так был разработан технологический процесс нанесения многослойного жаростойкого покрытия с использованием установки МАП-1 [3]. Данный технологический процесс предусматривает

нанесение жаростойкого покрытия в два этапа с использованием дополнительных масок для создания необходимого профиля покрытия [4]. Но этот техпроцесс весьма трудоёмкий и не обладает необходимой гибкостью, что крайне важно при переходе от одного типоразмера лопаток к другому.

В литературе также описаны возможные пути решения задачи контролируемого нанесения покрытий путем использования нескольких электроннолучевых испарителей [5]. Но даже сами авторы отмечают ряд недостатков предложенного метода, основным из которых является невозможность свободного регулирования скорости нанесения различных компонентов покрытия по поверхности подложки, что обусловлено достаточно большими размерами испарителей.

Гораздо лучше для решения поставленной задачи подходит инверсная магнетронная распылительная система с радиальными потоками плазмы, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» [6]. Её отличительными особенностями являются: наличие множества катодов-мишеней, которые изготавливают из компонентов, составляющих покрытие; большая площадь обработки; возможность распыления магнитных материалов; высокий коэффициент использования материала катодов-мишеней. Данная установка позволяет формировать покрытие сложного состава путем совместного распыления катодов-мишеней, изготовленных из отдельных компонентов, входящих в его состав. Кроме того, можно проводить регулирование состава многокомпонентных покрытий по толщине в процессе их формирования.

В то же время у этой распылительной системы имеются некоторые недостатки:

- необходимость использования планетарных систем вращения подложек, что усложняет технологическую установку и снижает скорость обработки;
- ограниченные возможности по реализации процесса контролируемого нанесения покрытий из-за того, что деталь в процессе обработки необходимо вращать вокруг своей оси;
- деталь может одновременно обрабатываться только с одной стороны, что приводит к возможности адсорбции частиц остаточной атмосферы на ее поверхности и последующему их попаданию в состав полученного покрытия.

Следующим шагом на пути решения проблемы реализации технологического процесса контролируемого нанесения покрытий стала разработка в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» новой схемы инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы [7, 8]. Она совмещает в себе достоинства инверсной магнетронной распылительной системы с

газовым анодом, секционированным катодом и радиальными потоками плазмы и свободна от ее недостатков. Она позволяет в полной мере независимо контролировать процесс нанесения покрытия на обе стороны подложки; отказаться от применения сложных планетарных систем вращения подложек. В процессе нанесения покрытия на поверхности подложек не возникает теневых зон.

В то же время, как любая новая система, для дальнейшего совершенствования она нуждается в детальном исследовании. Для правильного понимания процессов, в ней происходящих, крайне важно знать распределение локальных характеристик плазмы в разрядном промежутке, таких, как плотности электронов и ионов, температура электронов, потенциал плазмы.

В данное время зондовый метод измерения локальных параметров плазмы является наиболее распространенным и доступным. На сегодня накоплен колоссальный теоретический и экспериментальный опыт применения электрических зондов для исследования структуры разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях [9-13]. Одним из главных достоинств зондового метода измерений локальных параметров плазмы является его простота. Как правило, для проведения зондовых измерений не требуется сложной измерительной аппаратуры. Другим неоспоримым достоинством зондового метода можно считать то, что его можно использовать для измерения большого числа параметров в весьма широких пределах, что не имеет аналогов среди других методов диагностики плазмы. Ещё одним очень важным достоинством зондового метода является то, что он позволяет проводить измерение именно локальных параметров плазмы. Большинство других методов, например спектроскопический или микроволновой, позволяют измерять параметры, усреднённые по большому объёму плазмы [9]. Основным же недостатком зондового метода является то, что зонд вносит возмущение в область плазмы вблизи зонда, которое приводит к изменению функции распределения и потенциала пространства в непосредственной близости от него [10].

В графическом виде распределение потенциала плазмы в разрядном промежутке исследуемой распылительной системы представлено на рис. 1. Отличительной особенностью исследуемой распылительной системы является то, что плазма во всём разрядном промежутке имеет высокий потенциал (840...745 В). На оси системы можно наблюдать чётко выраженную зону виртуального анода, где потенциал плазмы имеет максимальное значение. В областях возле анодов потенциал плазмы падает более резко в радиальном направлении, чем в экваториальной плоскости. Таким образом, виртуальный анод имеет веретенообразную форму. Такая форма виртуального анода позволяет эффективно ускорять ионы плазмообразующего газа из экваториальной зоны разрядного

промежутка вдоль оси системы по направлению к секционированным катодным узлам. Снижение потенциала плазмы в осевых направлениях происходит плавно, что свидетельствует о наличии осевого электрического поля во всём объёме разрядного промежутка. Таким образом, рассматриваемая распылительная система, так же как и система с радиальными потоками плазмы [6], может быть отнесена к ускорителям с протяжённой зоной ускорения [14].

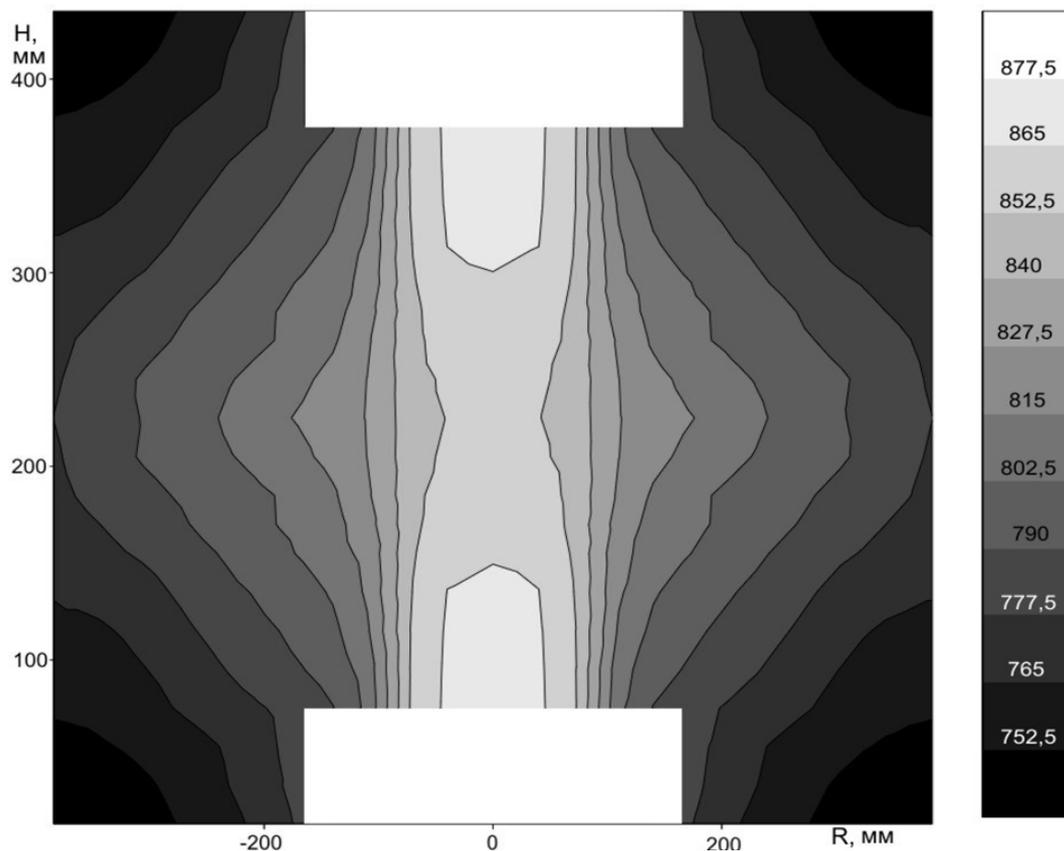


Рисунок 1 – Распределение потенциала плазмы в разрядном промежутке, В

Сравнивая графики распределения плотности электронов в плазме (рис. 2) и график распределения магнитной индукции в технологическом отсеке (рис. 3), можно заметить, что зоны локальных максимумов плотности электронов совпадают с зонами локальных максимумов магнитной индукции и имеют чётко выраженный характер, что присуще холловским системам [9, 10]. В зоне расположения обрабатываемых деталей (в экваториальной зоне технологического отсека, высота  $H = 225$  мм) концентрация электронов минимальна. Это является очень благоприятным фактором, так как в этом случае снижается нагрев обрабатываемых деталей во время нанесения покрытия в результате бомбардировки их поверхности электронами.

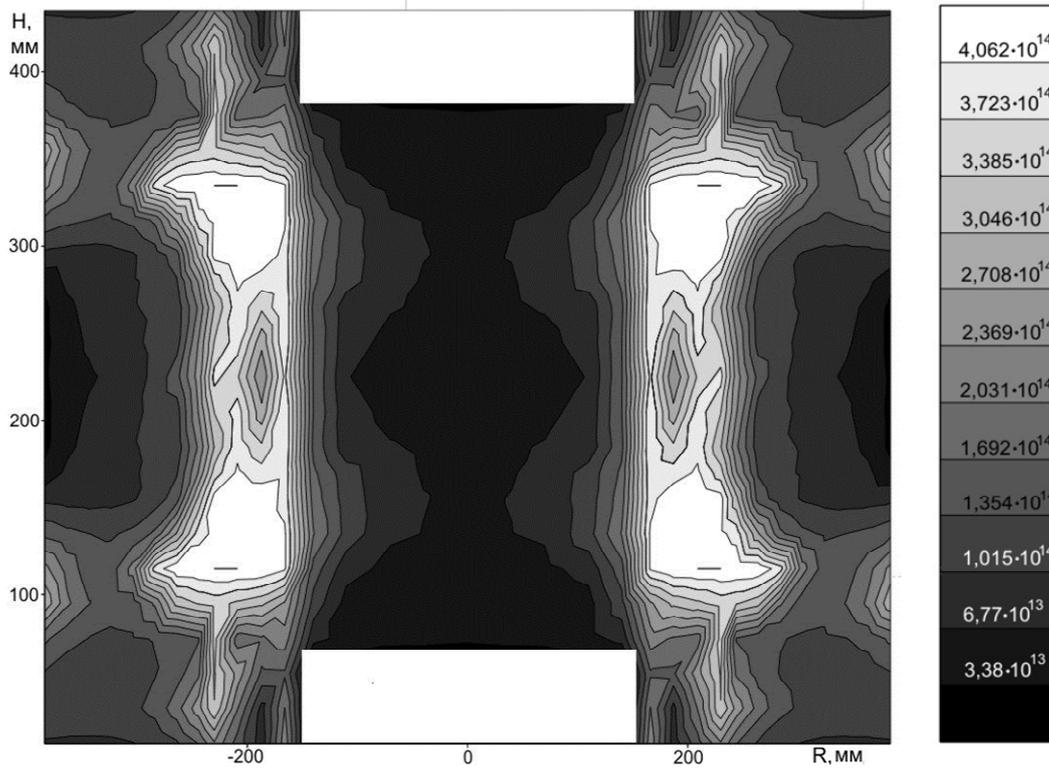


Рисунок 2 – Распределение плотности электронов в разрядном промежутке,  $1/\text{м}^3$

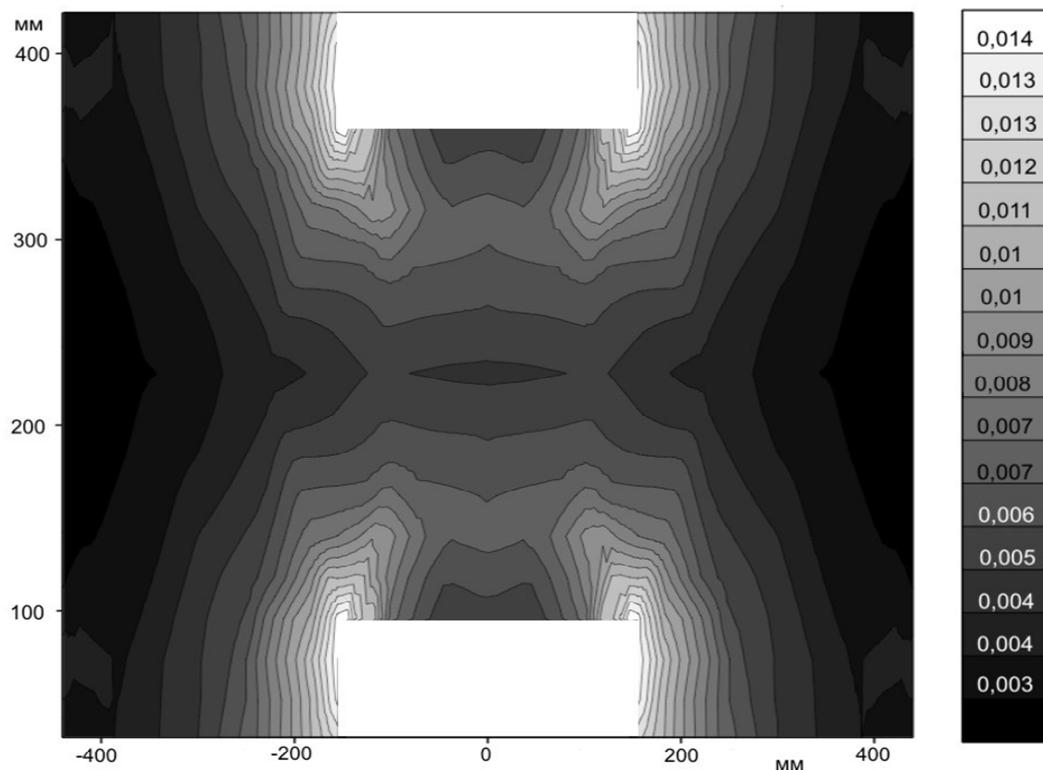


Рисунок 3 – Распределение магнитной индукции в технологическом отсеке экспериментальной установки при токе соленоидов 11 А, Тл

Распределение температуры электронов в плазме представлено на рис. 4. Зоны максимальной температуры электронов совпадают с зонами максимальной концентрации электронов, что также характерно для распылительной системы, описанной в работе [6]. Исключение составляют только зоны в районе 300 мм от оси распылительной системы на высотах  $\sim 180$  мм и  $\sim 260$  мм, где наблюдается явный максимум температуры электронов при одновременном минимуме их концентрации. Максимум температуры электронов в этих зонах обусловлен воздействием ионов плазмообразующего газа, ускоренными под действием электрического поля, создаваемого виртуальным анодом. Минимум же концентрации электронов вызван интенсивной потерей их на боковом экране, находящемся под высоким положительным потенциалом, в результате отсутствия в этих зонах магнитного поля достаточной величины (рис. 3), которое могло бы их удержать в разрядном промежутке.

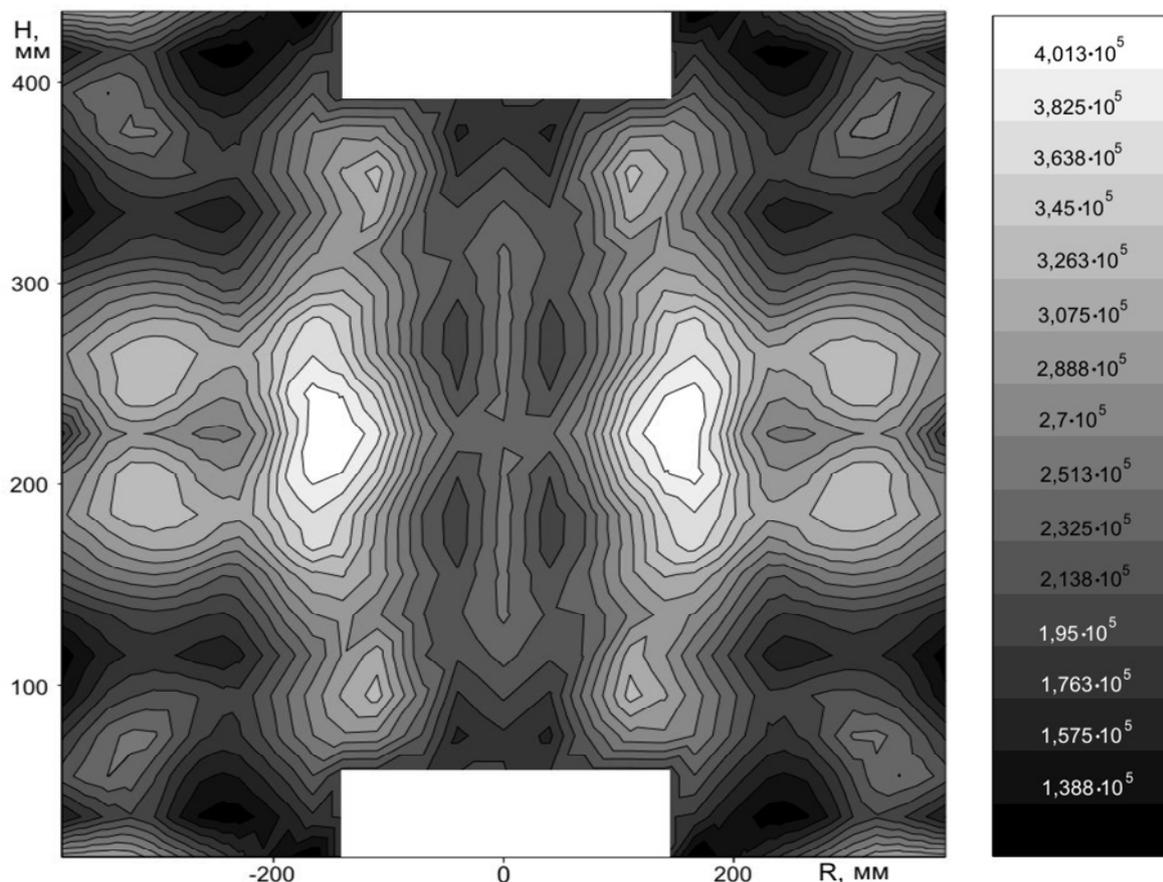


Рисунок 4 – Распределение температуры электронов в разрядном промежутке, К

Следует также отметить, что в рассматриваемой распылительной системе температура электронов примерно в 2 раза ниже, чем в инверсной магнетронной распылительной системе с газовым анодом и радиальными потоками плазмы [6], что является благоприятным

фактором, так как это позволяет снизить тепловую нагрузку на детали во время нанесения покрытия.

Распределение плотности ионов в плазме показано на рис. 5. Максимальная концентрация ионов в системе наблюдается в районе виртуального анода, откуда ионы под действием электрического поля ускоряются в сторону секционированных катодов, расположенных на высоте  $H = 0$  мм и  $H = 440$  мм.

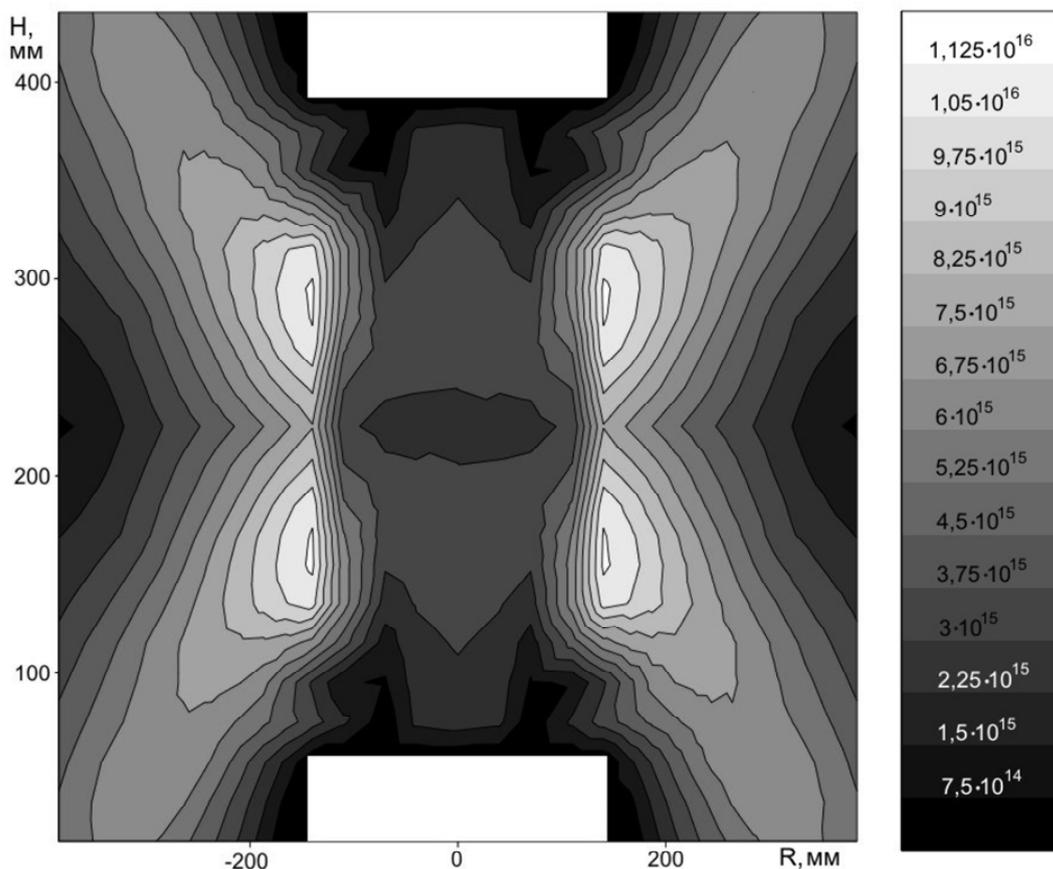


Рисунок 5 – Распределение плотности ионов в разрядном промежутке,  $1/\text{м}^3$

Следует обратить внимание на то, что плотность ионов в разрядном промежутке на порядок выше плотности электронов. Это объясняется действием двух факторов: ионы плазмообразующего газа удерживаются в разрядном промежутке под действием бокового экрана, находящегося под высоким положительным потенциалом; в то же время происходит интенсивная потеря электронов в экваториальной области разрядного промежутка на боковой экран, так как величина магнитного поля в этой области недостаточна для их эффективного удержания.

Сравнивая графики потенциала плазмы (см. рис. 1) и плотности ионов (см. рис. 5), можно видеть, что зона максимально эффективной ионизации рабочего газа расположена в зоне виртуального анода в районе оси системы, в то время как зона ускорения ионов на распыляемые катоды-мишени находится непосредственно над их

поверхностью (потенциал плазмы во всём разрядном промежутке достаточно высокий (~ 780 В) и падает практически до потенциала земли только в слое непосредственно над поверхностью катодов-мишеней). Таким образом, можно сделать вывод, что в рассматриваемой распылительной системе зона генерации ионов и зона их ускорения разделены, что даёт возможность распылять сколь угодно большое количество катодов-мишеней, не влияя на стабильность работы системы в целом.

### Выводы

Представлены результаты зондовых измерений локальных характеристик плазмы для инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы. На основании их анализа исследуемая распылительная система была отнесена к ускорителям холловского типа с протяжённой зоной ускорения. Показано, что в исследуемой распылительной системе зона генерации ионов и их ускорения на распыляемые катоды-мишени разделены, что позволяет проводить их независимое распыление.

### Список использованных источников

1. Технология обработки осевых моноколес высокоскоростным фрезерованием [Текст] / А. Я. Качан, С. А. Петров, В. А. Панасенко и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – 9(35). – С.12–18.
2. Kolomytsev, P.T. Combined coating for turbine blades of high-temperature gas turbine engines [Текст] / P. T. Kolomytsev, V. M. Samoilenko // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2006. – Vol. 48, №. 11 – 12. – P. 558-561.
3. Пат. 2164549 Российская федерация, МКИ С 23 С 14/30. Способ испарения и конденсации токопроводящих материалов / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский, Я.А. Помелов; заявитель и патентообладатель ВНИИМ № 99111127/02; Заявл. 1999.05.27; Оpubл. 27.03.01, Бюл. №7 (Ич.) – 3 с.
4. Budinovskii, S.A. Efficiency of two-stage ion-plasma process for depositing alloyed diffusion aluminate coatings on high-temperature nickel alloys [Текст] / S. A. Budinovskii, S. A. Muboyadzhyan // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2003, Vol. 45, №. 5 – 6. – P.183-188.
5. Костржицкий, А.И. Многокомпонентные вакуумные покрытия [Текст] / А. И. Костржицкий, О. В. Лебединский. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

6. Колесник, В.В. Разработка и исследование технологического процесса и оборудования для формирования многокомпонентных покрытий на лопатки ГТД: дисс.... канд. техн. наук: 05.03.07. – Х., 2007. – 137 с.

7. Управление процессом нанесения жаростойких покрытий на лопатки газотурбинных двигателей [Текст] / В. П. Колесник, Д. В. Слюсарь, В. В. Колесник, В. В. Зиновьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – 7(54). – С. 36–40.

8. Колесник, В.П. Нанесение многокомпонентных покрытий с управляемым компонентным составом по длине изделия [Текст] / Колесник В. П., Колесник В. В., Слюсарь Д. В. // IX Междунар. симпозиум по радиационной плазмодинамике: сб. науч. тр. – М.: НИЦ "Инженер", 2012. – С. 233–238.

9. Чен, Ф. Электрические зонды [Текст] / Чен Ф. // *Диагностика плазмы* / под. ред. Хаддлстоуна Р., Леонарда С. – М.: Мир. – 1967. – С.94-164.

10. Козлов, О.В. Электрический зонд в плазме [Текст] / О. В. Козлов – М.: Атомиздат, 1969. – 291 с.

11. Лёб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах [Текст] / Л. Лёб – М. Л.: Гос. изд.-во техн.-теор. лит., 1950. – 672 с.

12. Ершов, А.П. Метод электрических зондов Ленгмюра. Описание задачи спецпрактикума [Текст] / А.П. Ершов. – М.: Физический факультет МГУ, 2007. – 26 с.

13. Зондовая диагностика низкотемпературной плазмы в магнитном поле [Текст] / Ф. Г. Бакшт, Г. А. Дюжев, Б. И. Циркель и др. // *ЖТФ*. – 1977. – вып.9. – С. 2269–2279.

14. Морозов, А. И. О равновесии и устойчивости потоков в ускорителях типа УЗДП [Текст] / А. И. Морозов // *Плазменные ускорители* / под ред. Арцимовича Л. А. – М.: Машиностроение, 1972. – 312 с.

*Поступила в редакцию: 10.12.2013*

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.В. Колесник,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*