

УДК 669.187.58

А. В. ИСАКОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ В АНОМАЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

На основании разработанной жидкостной модели проведен расчет потенциала плазмы, температуры и концентрации электронов в разрядном промежутке со скрещенными электрическим и магнитным полями с различными конфигурациями магнитного поля в разрядном промежутке. Получено, что при различных конфигурациях магнитного поля в разрядном промежутке реализуются различные режимы работы. В зависимости от режима работы неравномерность распределений плотности ионного тока по периферии может варьироваться от 2 до 25 %. Потенциал плазмы в зоне с максимальной концентрацией электронов изменяется в пределах от 1 до 20 %, а температура электронов остается практически без изменения.

Ключевые слова: электромагнитная катушка, аномальный тлеющий разряд, концентрация электронов, температура электронов, потенциал плазмы, разрядный промежуток.

Введение

Аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях широко применяется как в технологии ускорителей заряженных частиц, так и в технологии тонких пленок [1 – 4].

Нанесение функциональных покрытий на детали машин аэрокосмической техники позволяет значительно увеличить их ресурс. Наиболее перспективным вакуумным методом нанесения защитных покрытий является магнетронный метод [5, 6].

В магнетронных распылительных системах используется аномальный тлеющий разряд, горящий в скрещенных магнитном и электрическом полях, который позволяет получать высокие плотности плазмы при относительно низких давлениях [7].

Постановка задачи исследования

Повышение эффективности магнетронных распылительных систем возможно за счет уменьшения затрат на создание требуемых распределений вектора и величины магнитной индукции в разрядном промежутке.

Рассмотрим пространственную конфигурацию электродов, приведенную в работе [8]. При напуске в вакуумную камеру рабочего газа (аргона) до давления 0,5...0,05 Па и подаче на анод постоянного напряжения 400...900 В внутри разрядного промежутка зажигается аномальный тлеющий разряд.

В работе [9] проведен анализ способов создания магнитного поля в рассматриваемом разрядном

промежутке, рассмотрены различные конфигурации магнитных систем. А именно, магнитные системы с одной, двумя и четырьмя катушками. Для каждой конфигурации магнитного поля получены распределения вектора и величины магнитной индукции в срединной плоскости.

Целью данной статьи является определение влияния неравномерности распределения величины магнитной индукции в различных зонах на основные параметры плазмы и на распределение плотности тока по длине катода при различных конфигурациях магнитных систем.

Определение параметров плазмы в разрядном промежутке со скрещенными электрическим и магнитным полями

Для решения поставленной задачи использовалась жидкостная модель, приведенная в работе [10], со следующими допущениями:

– максимальная величина магнитной индукции на оси симметрии разрядного промежутка в срединной плоскости не превышает 0,02 Тл;

– рассматриваемые системы не осесимметричные, поэтому проведена аппроксимация распределений величины и вектора магнитной индукции к результату, приведенному в работе [9], путем изменения габаритных размеров экрана из магнитомягкой стали, расположенного между вакуумной камерой и электромагнитной катушкой.

В результате решения системы уравнений жидкостной модели для пространственной геометрии

электродов с одной электромагнитной катушкой, при величине магнитной индукции B (рис. 1), получены распределения концентрации электронов n_e , температуры электронов T_e , потенциала плазмы ϕ в срединной плоскости (рис. 2) и плотности тока по длине катода j_c (рис. 3).

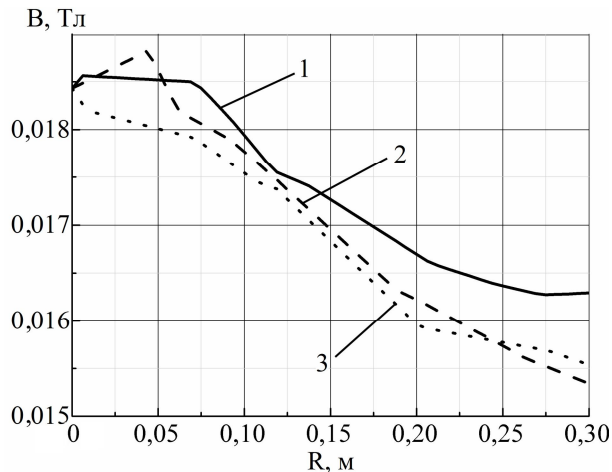


Рис. 1. Распределения величины магнитной индукции в срединной плоскости разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой в сечениях: А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3)

Основные параметры плазмы и распределения плотности тока получены для трех сечений разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой: сечение А-А расположено в одной плоскости с электромагнитной катушкой, сечение Б-Б повернуто относительно сечения А-А на угол $\alpha = 90^\circ$, сечение В-В повернуто относительно сечения Б-Б на угол α . Для магнитной системы разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками $\alpha = 45^\circ$, а для магнитной системы с четырьмя электромагнитными катушками $\alpha = 22,5^\circ$.

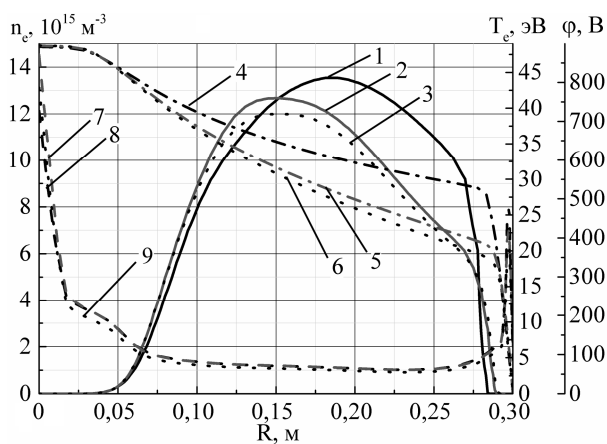


Рис. 2. Распределения концентрации (1-3) и температуры электронов (4-6), потенциала плазмы (7-9) в срединной плоскости разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой

На рис. 2 представлены распределения концентрации электронов в сечениях А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3), температуры электронов в сечениях А-А (4), Б-Б (5) и В-В (6), потенциала плазмы в сечениях А-А (7), А-А (8) и В-В (9) в срединной плоскости разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой.

Из распределения потенциала плазмы (см. рис. 2) видно, что неравномерность распределения потенциала плазмы в зоне с максимальной концентрацией электронов достигает 20 %. Таким образом энергия ионов в сечении А-А и в сечении В-В будет отличаться на 20 %.

Из представленного распределения плотности тока на рис. 3 можно сделать вывод, что неравномерность распределения плотности тока по сечениям достигает 25 %.

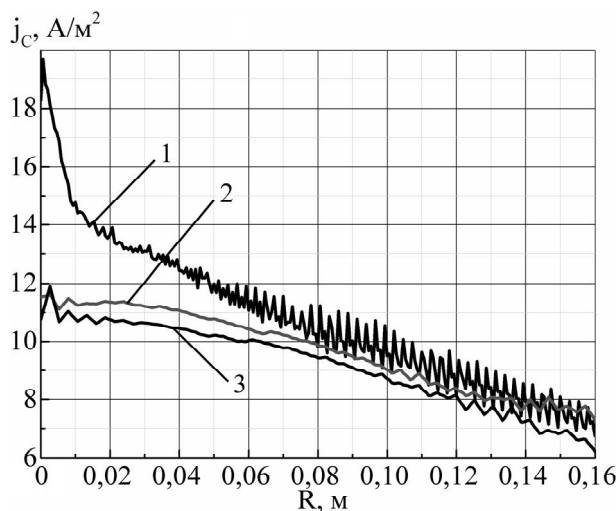


Рис. 3. Распределения плотности тока в срединной плоскости разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой в сечениях: А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3)

Увеличить равномерность распределения величины магнитной индукции в разрядном промежутке, а соответственно и равномерность распределения плотности тока по сечениям, возможно за счет использования двух и более электромагнитных катушек.

В результате решения системы уравнений жидкостной модели для разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками, при величине магнитной индукции, представленной на рис. 4, получены распределения основных параметров плазмы в срединной плоскости (рис. 5) и плотности тока по длине катода (рис. 6).

На рисунке 5 представлены распределения концентрации электронов в сечениях А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3), температуры электронов в сечениях А-А (4), Б-Б (5) и В-В (6), потенциала плазмы в сечениях А-А (7), Б-Б (8) и В-В (9) в срединной

плоскости разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками.

Из распределения потенциала плазмы (см. рис. 5) видно, что неоднородность потенциала плазмы, в зоне с максимальной концентрацией электронов, составляет 10 %.

Из представленного распределения плотности тока на рис. 6 можно сделать вывод, что неравномерность распределения плотности тока по сечениям достигает 16 %.

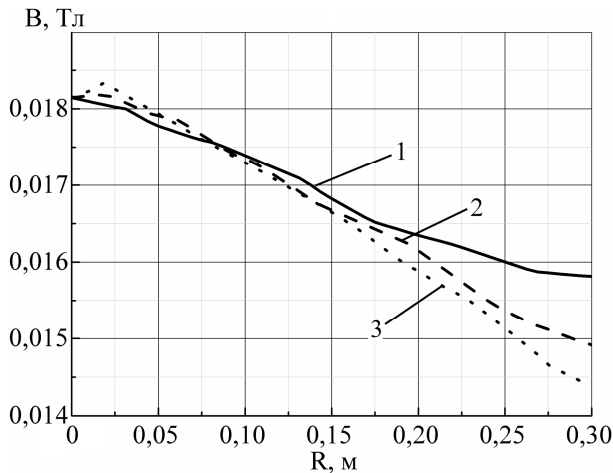


Рис. 4. Распределения величины магнитной индукции в срединной плоскости разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками в сечениях: А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3)

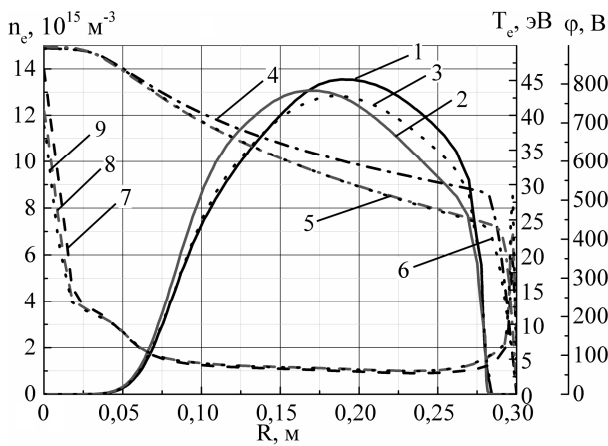


Рис. 5. Распределения концентрации (1-3) и температуры электронов (4-6), потенциала плазмы (7-9) в срединной плоскости разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками

Увеличение равномерности распределений плотности тока на катод и основных параметров плазмы по сечениям в разрядном промежутке с двумя электромагнитными катушками возможно за счет использования четырех электромагнитных катушек.

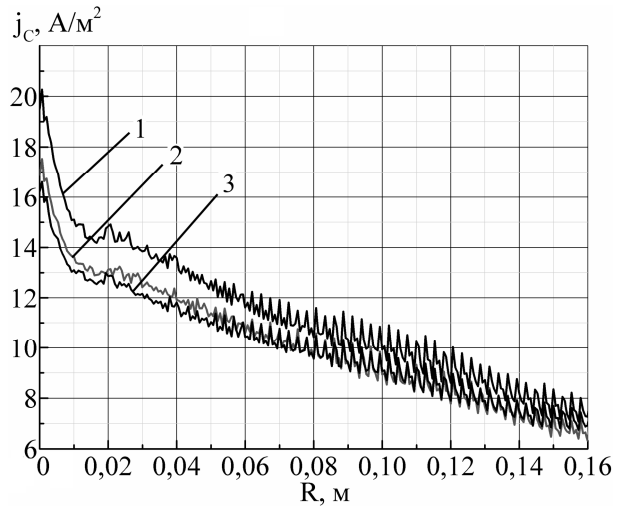


Рис. 6. Распределения плотности тока в срединной плоскости разрядного промежутка с двумя электромагнитными катушками в сечениях: А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3)

В результате решения системы уравнений жидкостной модели для разрядного промежутка с четырьмя электромагнитными катушками, при величине магнитной индукции, представленной на рис. 7, получены распределения основных параметров плазмы в срединной плоскости (рис. 8) и плотности тока по длине катода (рис. 9).

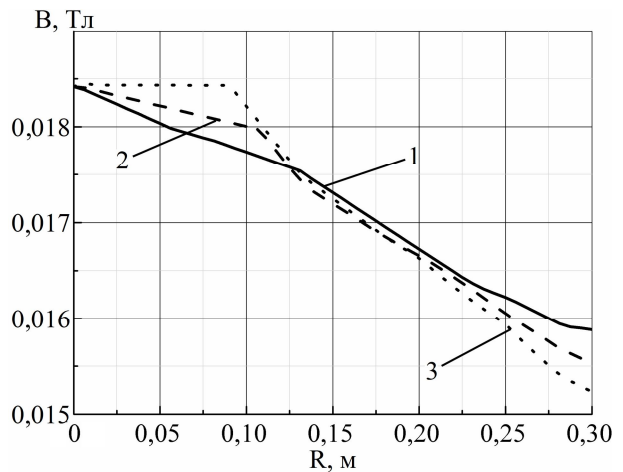


Рис. 7. Распределения величины магнитной индукции в срединной плоскости разрядного промежутка с четырьмя электромагнитными катушками в сечениях: А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3)

На рисунке 8 представлены распределения концентрации электронов в сечениях А-А (1), Б-Б (2) и В-В (3), температуры электронов в сечениях А-А (4), Б-Б (5) и В-В (6), потенциала плазмы в сечениях А-А (7), Б-Б (8) и В-В (9) в срединной плоскости разрядного промежутка с четырьмя электромагнитными катушками.

Из распределения потенциала плазмы (см рис. 8) видно, что неравномерность распределения потенциала, в зоне с максимальной концентрацией электронов, лежит в пределах 1 %.

Из представленного распределения плотности тока на рисунке 9 можно сделать вывод, что неравномерность распределения плотности тока по сечениям не превышает 2 %.

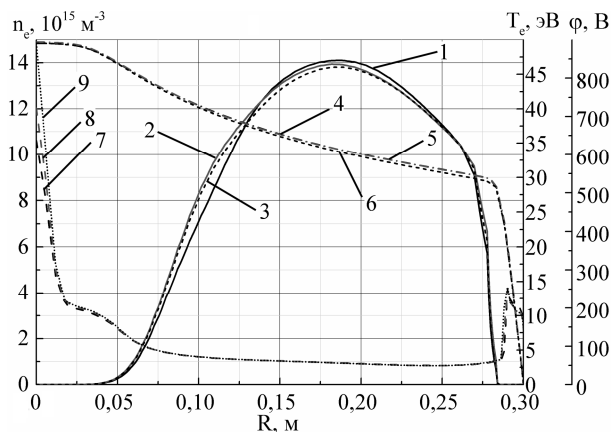


Рис. 8. Распределения концентрации (1-3) и температуры электронов (4-6), потенциала плазмы (7-9) в срединной плоскости разрядного промежутка с четырьмя электромагнитными катушками

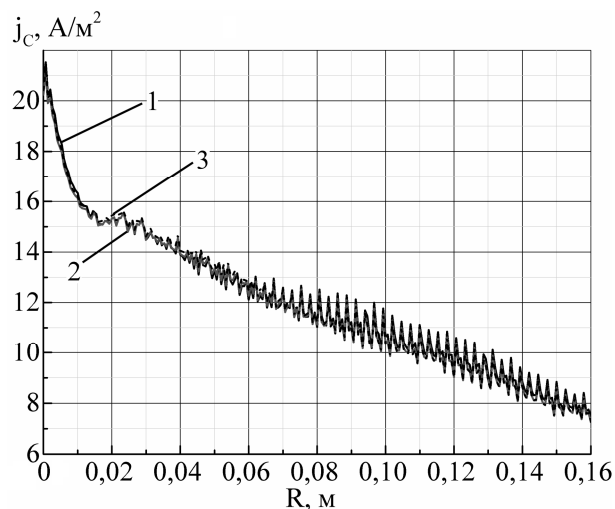


Рис. 9. Распределения плотности тока в срединной плоскости разрядного промежутка с четырьмя электромагнитными катушками в сечениях: А-А (1), В-В (2) и В-В (3)

Результаты исследований

Проанализировав рассмотренные выше способы создания магнитного поля, можно сделать вывод, что магнитная система с четырьмя катушками позволяет получать неравномерность распределения плотности тока по сечениям менее 2 %.

Проанализировав рис. 10 можно сделать вывод, что с уменьшением количества катушек n, мощность P, вкладываемая в электромагнитные катушки падает, но увеличивается неоднородность плотности тока по сечениям K.

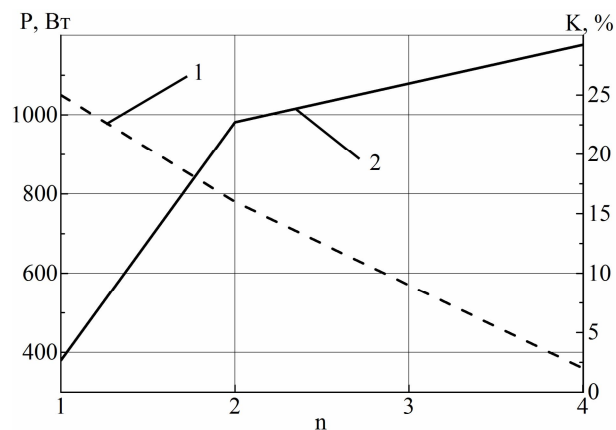


Рис. 10. Зависимость неравномерности плотности тока по сечениям (1) и зависимости вкладываемой мощности в электромагнитные катушки (2) от количества электромагнитных катушек

Выводы

На основании разработанной жидкостной модели проведен расчет основных параметров плазмы в разрядном промежутке с одной, двумя и четырьмя электромагнитными катушками.

Определено, что разрядный промежуток с четырьмя электромагнитными катушками имеет неравномерность распределения плотности тока на катод по сечениям не более 2 %, а для разрядного промежутка с одной электромагнитной катушкой неравномерность распределения плотности тока на катод по сечениям достигает 25 %.

Получено, что разрядный промежуток с одной электромагнитной катушкой имеет неравномерность распределения потенциала плазмы по сечениям 20 %. Увеличение количества катушек до четырех позволяет получить неравномерность распределения потенциала плазмы по сечениям не более 1 %.

Литература

1 Гасанов, И. С. Плазменная и пучковая технология [Текст] / И. С. Гасанов. – Баку : Изд-во «Элм», 2006. – 174 с.
 2 Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. Н. Луценко // Металлы. – 2007. – № 5. – С. 23–34.
 3 Мубояджян, С. А. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД [Текст] / С. А. Мубояджян, В. П. Лесников,

В. П. Кузнецов. – Екатеринбург : Изд-во «Квест», 2008. – 208 с.

4 Schmidt, B. *Ion Beams in Materials Processing and Analysis [Text]* / B. Schmidt, K. Wetzig. – New York : Springer, 2013. – 418 p.

5 Колесник, В. П. *Технологические генераторы плазмы [Текст]* / В. П. Колесник, В. В. Колесник. – К. : Милениум, 2009. – 92 с.

6 Bishop, C. A. *Vacuum Deposition onto Webs, Films and Foils [Text]* / C. A. Bishop. – Second Edition. – Waltham : Elsevier, 2011. – 530 p.

7 Кузьмичев, А. И. *Магнетронные распылительные системы. Введение в физику и технику магнетронного распыления [Текст]* / А. И. Кузьмичев. – К. : Аверс, 2008. – 2008 с.

8 Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy, N. P. Stepanushkin, A. A. Taran // *Int. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and*

The Adjoint Workshop "Nano- and micro- sized structures in plasmas" : book of abstracts, Kharkiv, 15-18 sept. 2014. – Kharkiv, 2014. – P. 133.

9 *Научные основы создания новых высокоэффективных катодов для плазменных технологий в космической, авиационной и других отраслях промышленности. Создание физических основ синтеза композиционных катодных материалов на основе гафнатов бария-стронция с вольфрамом : отчет о НИР (промежуточ.) : Д505-19 / 2012-Ф [Текст] / Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т» ; рук. Таран А. А. ; исполн. : Кислицын А. П. [и др.]. – Х., 2013. – 78 с. – ДР0112U001039.*

10 Computer simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy and others // *Probl. of atom. sci. and tech.* – 2014. – V. 94, № 6. – P. 171 – 174.

Поступила в редакцию 16.04.2015, рассмотрена на редколлегии 15.05.2015

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ В АНОМАЛЬНИХ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ В СХРЕЩЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНОМУ І МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

О. В. Исаков

На підставі розробленої рідинної моделі проведено розрахунок потенціалу плазми, температури і концентрації електронів в розрядному проміжку зі схрещеними електричним і магнітним полями з різними конфігураціями магнітного поля в розрядному проміжку. Отримано, що при різних конфігураціях магнітного поля в розрядному проміжку реалізуються різні режими роботи. Залежно від режиму роботи нерівномірність розподілів густини іонного струму по периферії може змінюватись від 2 до 25 %. Потенціал плазми в зоні з максимальною концентрацією електронів змінюється в межах від 1 до 20 %, а температура електронів залишається практично без зміни.

Ключові слова: електромагнітна котушка, аномальний тліючий розряд, концентрація електронів, температура електронів, потенціал плазми, розрядний проміжок.

THE ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD CONFIGURATION INFLUENCE ON THE PLASMA PARAMETERS IN THE ABNORMAL GLOW DISCHARGE IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

O. V. Isakov

On the basis of the developed fluid model, the calculations were executed for the plasma potential, electron temperature and electron density in a discharge gap with crossed electric and magnetic fields with different configurations of the magnetic field in the discharge gap. The results show that for the different configurations of the magnetic field in the discharge gap, various modes of operation were obtained. Depending on the operation mode the unevenness of the ion current density distributions along the periphery may vary from 2 to 25 %. Plasma potential in the zone of the maximum electron density ranges from 1 to 20 % while the electron temperature remains virtually unchanged.

Key words: electromagnetic coil, abnormal glow discharge, electron density, electron temperature, plasma potential, discharge gap.

Исаков Алексей Владимирович – аспирант каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lewka@3g.ua.