

УДК 621.455.32

М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ СВОЙСТВ ЗОНЫ ИОНИЗАЦИИ И УСКОРЕНИЯ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе представлены результаты совместного анализа распределений электрического и магнитного поля в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя, выполненного с целью обнаружения связей свойств зоны ионизации и ускорения (ЗИУ) с параметрами магнитного поля. Установлено наличие связи границ ЗИУ с максимальной величиной радиальной составляющей индукции магнитного поля B_r , связи протяженности ЗИУ и величиной максимального продольного градиента B_r . Обнаружена прямо пропорциональная зависимость напряженности электрического поля от величины максимального продольного градиента B_r . Выявлено отклонение линий одинакового электрического потенциала от силовых линий магнитного поля. Анализ связей проведен по всей ширине ускорительного канала. Приводятся результаты верификации обнаруженных связей.

Ключевые слова: плазменный двигатель, напряженность электрического поля, индукция магнитного поля.

Введение

Магнитное поле (МП) в ускорительном канале (УК) существенно влияет на интегральные характеристики стационарного плазменного двигателя (СПД). Несмотря на более чем 50-летний опыт разработки СПД единое мнение о том, каким должно быть МП, чтобы обеспечивались наилучшие характеристики двигателя, отсутствует. Так, например, в работе [1] оптимальной является конфигурация, близкая к симметричной относительно срединной поверхности УК, но с небольшим наклоном к оси двигателя. В работе [2] оптимальной является такая конфигурация, у которой в прианодной области силовые магнитные линии (СМЛ) являются выпуклыми в сторону анода. В [3] предлагается формировать такую конфигурацию, чтобы были СМЛ проходящие вдоль стенок УК и замыкались они на анод. В [4] в качестве критерия оптимизации предлагается использовать специальную математическую функцию F , в состав которой входят параметры МП. Предлагаемые критерии приводят к некоторому улучшению характеристик двигателя, однако утверждается, что полностью возможности улучшения характеристик двигателя за счет оптимизации МП до сих пор не использованы.

Приведенные выше критерии оптимальности магнитного поля основаны на обнаруженных связях протекания физических процессов в УК с распределением МП. Рассмотрим их:

1) первый критерий [1] основан на том, что вдоль СМЛ движение электронов является относи-

тельно свободным и поэтому вдоль них происходит выравнивание электрического потенциала. В результате, подбирая конфигурацию СМЛ, можно управлять конфигурацией электрического поля, влияющей на фокусировку струи двигателя. Однако неоднократно подтверждалось существенное отклонение линий одинакового потенциала от СМЛ [5, 6], что ставит под вопрос обоснованность использования конфигурации СМЛ в качестве критерия оптимальности МП;

2) второй критерий [2] базируется на известной связи положения зоны ионизации и ускорения (ЗИУ) в УК с величиной индукции МП. Продольные границы ЗИУ могут быть определены по максимальной величине радиальной составляющей индукции МП $B_{r_{max}}$, взятой на срединной линии (поверхности) УК. Согласно [1, 7, 8] ЗИУ начинается в точке с B_r равной $(0,6...1,0) \cdot B_{r_{max}}$, а в качестве окончания ЗИУ принимается координата положения $B_{r_{max}}$. Необходимо отметить, что данная связь является приближенной, так как осредняет границу ЗИУ по ширине канала, в то время, как в действительности ЗИУ начинается в разных местах по ширине УК. Определение границы окончания по $B_{r_{max}}$ также не является верным, так как за срезом УК может падать до 80% от прикладываемого напряжения на расстоянии до 30 мм (в современных СПД $B_{r_{max}}$ расположено вблизи среза УК) [9, 10];

3) третий критерий [3] опирается на то, что увеличение продольного градиента B_r приводит к сокращению ЗИУ, положительно сказываясь на интегральных характеристиках двигателя [11]. Распре-

деление dBr/dz является неоднородным, как по длине, так и по ширине УК. Поэтому использование значения dBr/dz , осредненного на участке нарастания Br со стороны анода до Br_{max} и взятого только на срединной линии, как в работе [11], не позволяет в полной мере отразить влияние градиента на процессы в УК и интегральные характеристики двигателя, так как необходимо рассматривать задачу комплексно.

К вышеизложенному необходимо добавить, что на сегодняшний момент проделан большой объем научно-исследовательской работы по изучению влияния МП на физические процессы в УК СПД, что позволило существенно повысить характеристики двигателя по сравнению с первыми прототипами. Однако полученные сведения не являются всеохватывающими, имеют частный, однонаправленный и зачастую противоречивый характер. Поэтому продолжение работ в данном направлении, а именно поиск новых связей физических процессов с параметрами МП либо уточнение уже известных, является актуальной для разрешения задач.

В качестве цели данной работы было выбрано обнаружение связей свойств ЗИУ (формы, протяженности, пространственного положения) с распределением параметров МП в ускорительном канале СПД.

Описание эксперимента

Исследования проводились на двигателе СПД-70 (наружный диаметр УК 70 мм, мощность ≈ 700 Вт).

Анализ связей свойств ЗИУ с распределением параметров МП проводился по следующим данным:

- распределение электрического потенциала в УК двигателя, измеренное при разрядном напряжении $U_d = 150$ В, и массовом расходе газа через анод двигателя 2,35 мг/с;

- распределение Br в УК, рассчитанное в пакете Ansoft Maxwell 14 при токах в катушках намагничивания магнитной системы, обеспечивающих минимальный разрядный ток. Расчетные данные проверялись экспериментально. Рассогласование экспериментальных и теоретических данных не более 5%.

Описание используемого оборудования и методов расчета приведено в [12, 13, 14].

1. Результаты исследования

1.1. Связь конфигурации электрического поля с конфигурацией СМЛ

На рис. 1 приведено распределение электрического потенциала ϕ в УК с наложенным профилем

СМЛ. Наблюдаемое несовпадение эквипотенциальных линий электрического поля с СМЛ подтверждает необоснованность использования конфигурации СМЛ в качестве инструмента воздействия на распределение электрического поля в УК двигателя.

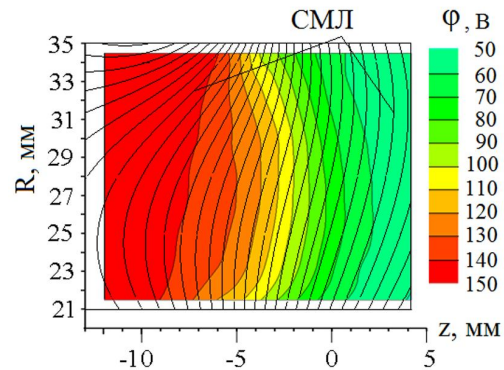


Рис. 1. Распределение электрического потенциала и профиль СМЛ в ГРК ($z=0$ – сечение среза УК)

1.2. Связь границ ЗИУ с величиной Br_{max}

В связи с неоднородностью распределения МП по ширине канала представляет интерес рассмотрение связи границ ЗИУ и величины Br в различных сечениях по ширине канала. Для этого в каждом сечении R по ширине канала строились распределения Br и ϕ . Далее определялась величина Br на границе начала ЗИУ и выражалась через численный коэффициент k с Br_{max} в том же сечении УК. Так как напряженность электрического поля в прианодной области незначительна ($E_z \approx 0$ В/см) и начало ЗИУ может проявляться неявно, то принималось, что ЗИУ начинается в точке с потенциалом на 10 В меньше, чем разрядное напряжение U_d . На рис. 2 показана схема определения коэффициента k на срединной линии УК ($R=28$ мм).

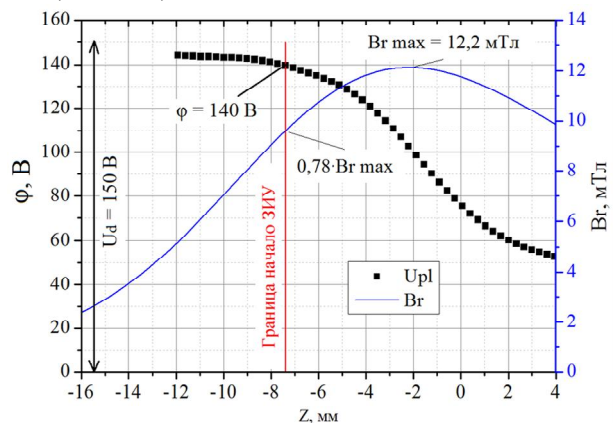


Рис. 2. Схема определения границы начала ЗИУ

На рис. 3 показано изменение коэффициента k по ширине канала с привязкой по двум вариантам – к максимальной величине индукции магнитного

поля на срединной линии B_{\max}^{cp} и к максимальной величине индукции магнитного поля B_{\max}^R для каждого сечения R отдельно. Видно, что в случае привязки к B_{\max}^{cp} значения k различны для сечений срединной линии и вдоль стенок УК ($R = 21$ мм и $R = 35$ мм). В случае привязки к B_{\max}^R , коэффициент k принимает одно единственное значение во всех сечениях УК, а, соответственно, действительное положение границы начала ЗИУ по ширине канала может быть определено с меньшей ошибкой.

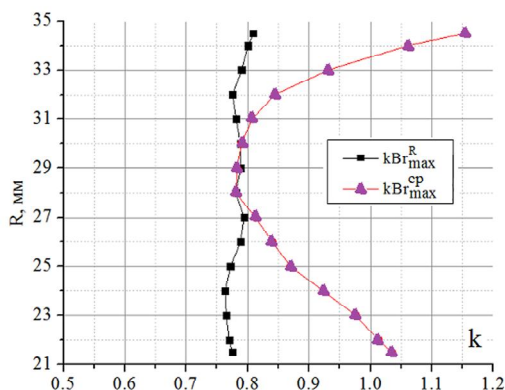


Рис. 3. Связь границы начала ЗИУ с величиной B_{\max}^R по ширине УК

Аналогичным образом была проанализирована возможность определения границы окончания ЗИУ по максимальной величине индукции магнитного поля. На рис. 4 показано, что связать границу окончания ЗИУ с помощью некоторого k , постоянного по всей ширине канала, не представляется возможным. Однако в случае привязки к B_{\max}^R можно однозначно определить ее границу, как лежащую ниже B_{\max}^R в направлении среза УК (так как $k > 1$).

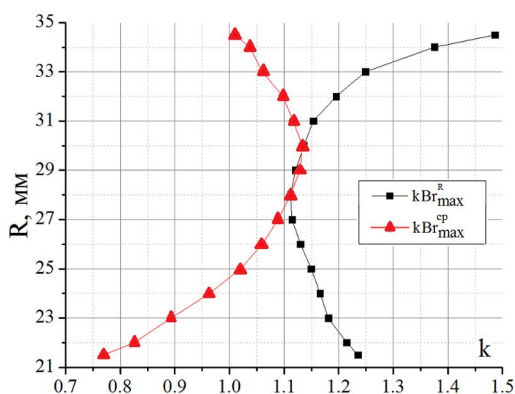


Рис. 4. Связь границы окончания ЗИУ с величиной B_{\max}^R по ширине УК

1.3. Связь протяженности ЗИУ с величиной dBr/dz

Было проверено влияние величины dBr/dz на протяженность ЗИУ $L_{\text{зиу}}$. В каждом сечении по ши-

рине канала фиксировались $L_{\text{зиу}}$ и максимальное значение продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля dBr/dz_{\max} . Приведенные на рис. 5 распределения dBr/dz_{\max} и $L_{\text{зиу}}$ показывают, что в пристеночных областях, где dBr/dz_{\max} максимально, длина ЗИУ минимальна, а в срединной части УК, где dBr/dz_{\max} минимален, ЗИУ является более протяженной. То есть в первом приближении можно считать, что по ширине канала $L_{\text{зиу}}$ обратно пропорциональна dBr/dz_{\max} .

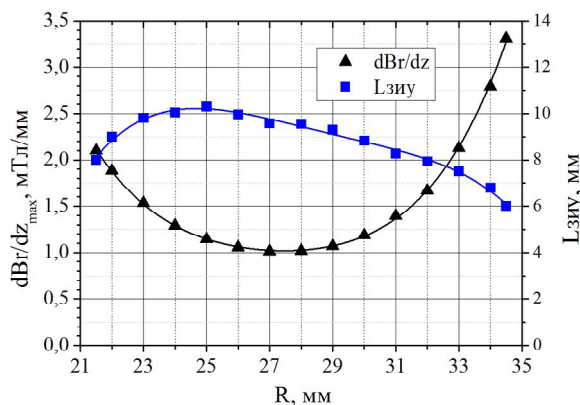


Рис. 5. Распределения dBr/dz_{\max} и $L_{\text{зиу}}$ по ширине УК

1.4. Связь E_z с величиной dBr/dz

Дальнейший анализ полученных результатов показал наличие связи напряженности электрического поля E_z с dBr/dz_{\max} по ширине канала - чем выше градиент, тем выше E_z (рис. 6). При этом в первом приближении можно говорить, что распределение $E_z(R)$ прямопропорционально распределению $dBr/dz_{\max}(R)$.

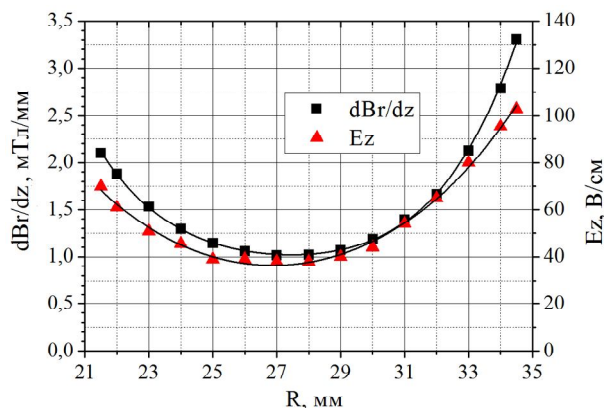


Рис. 6. Распределения dBr/dz_{\max} и E_z по ширине УК в сечении $z = -6$ мм

Однако связь E_z с dBr/dz_{\max} наблюдается только в начальной области ЗИУ (рис. 7), занимающей $\approx 1/3$ от всей протяженности ЗИУ. Видно, что в начальной области наибольшие значения E_z локализованы вдоль наружной стенки УК, а наименьшие – вдоль срединной линии. Это хорошо

согласуется с соотношением dBr/dz_{\max} вдоль наружной стенки к значениям dBr/dz_{\max} вдоль внутренней стенки и на срединной линии УК.

Очевидно, что именно эта связь объясняет наблюдаемый положительный эффект улучшения характеристик двигателя при увеличении градиента МП, так как именно в начале ЗИУ наблюдается максимальная концентрация ионов [1].

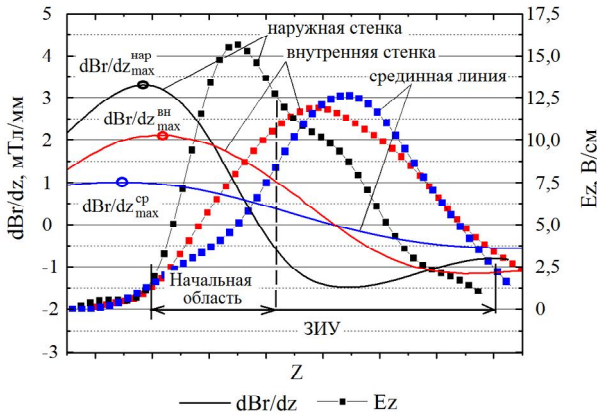


Рис. 7. Распределение dBr/dz и E_z вдоль стенок и срединной линии УК (для лучшей визуализации связи E_z с dBr/dz_{\max} все графики смещены так, что ЗИУ начинается в одной точке)

2. Верификация полученных данных

С целью проверки обнаруженных связей свойств ЗИУ с магнитным полем в УК на базе исследованного двигателя был разработан новый двигатель с измененной магнитной системой. Двигатель получил название СПД-М70М1. Изменения в магнитной системе были направлены на увеличение dBr/dz_{\max} при сохранении значения $B_{r\max}$ на срединной линии УК и сохранении соотношения токов в катушках намагничивания. Для этого методом численного моделирования было определено влияние геометрических параметров магнитной системы двигателя и внесены соответствующие изменения в конструкцию магнитной системы. В результате было получено следующее:

- 1) смещение сечения с величиной $0,8 \cdot B_{r\max}$ на 1-3 мм в направлении выхода из УК (рис. 8);
- 2) увеличение dBr/dz_{\max} по всей ширине канала: на 10% вдоль срединной линии и на 30 – 60% вдоль наружной и внутренней стенок соответственно (рис. 9).

Были проведены зондовые исследования параметров плазмы и обнаружены следующие изменения в свойствах ЗИУ:

- 1) одновременно со смещением сечения $0,8 \cdot B_{r\max}$ произошло смещение границы начала ЗИУ в направлении выхода из УК по всей ширине канала

(рис. 10). При этом граница окончания ЗИУ не сместилась, что свидетельствует о сокращении протяженности ЗИУ;

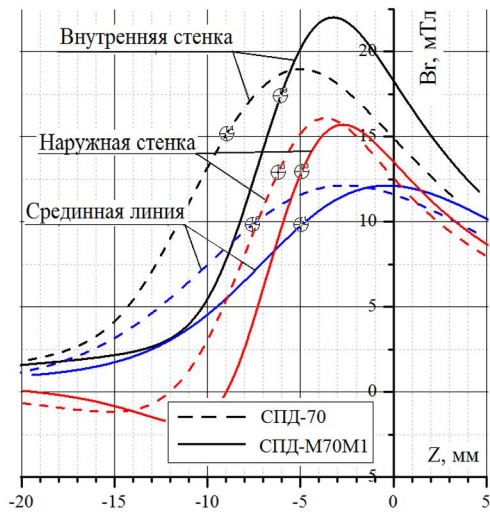


Рис. 8. Распределение B_r вдоль контрольных линий по ширине УК

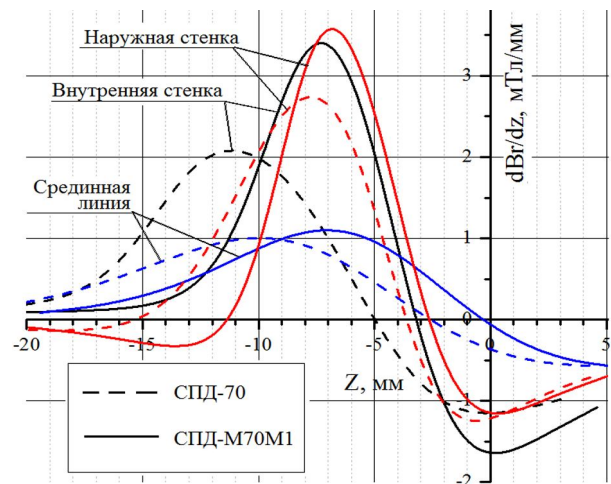


Рис. 9. Распределение dBr/dz вдоль контрольных линий по ширине УК

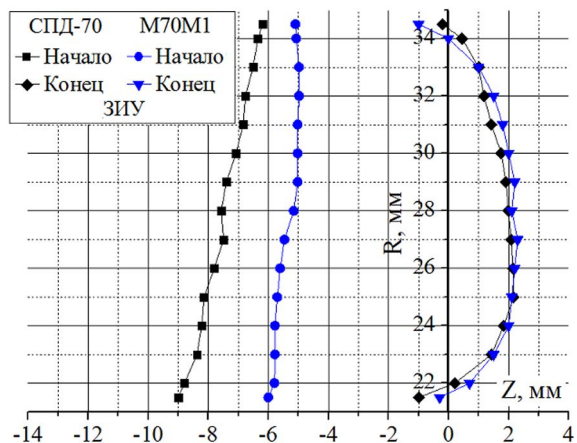


Рис. 10. Положение границ ЗИУ до и после изменений в магнитной системе двигателя

2) одновременно с увеличением dBr/dz_{\max} произошло увеличение напряженности электрического поля E_z по всей ширине канала (рис. 11);

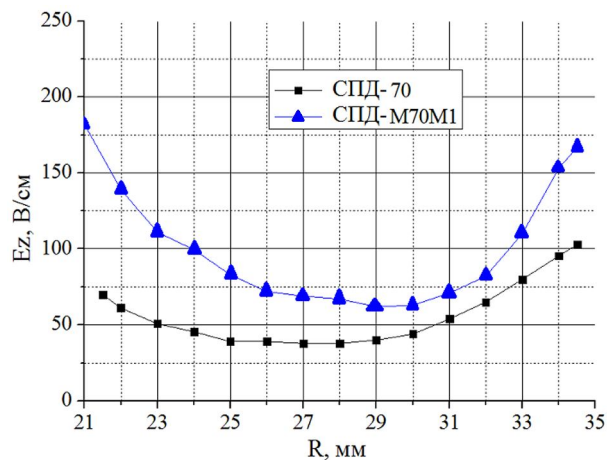


Рис. 11. Распределение E_z по ширине УК СВД до и после изменений в магнитной системе двигателя

3) одновременно с выравниванием сечения с $0,8 \cdot Br_{\max}$ вдоль наружной и внутренней стенок (см. рис. 8) произошло выравнивание границы начала ЗИУ вдоль стенок УК (см. рис. 11).

Выводы

Совместный анализ распределений параметров плазмы и параметров магнитного поля позволил выявить следующее:

- в ускорительном канале СВД конфигурация линий одинакового электрического потенциала не совпадает с конфигурацией силовых магнитных линий, что ограничивает использование конфигурации СМЛ в качестве инструмента управления фокусировкой струи двигателя;

- границы зоны ионизации и ускорения по ширине ускорительного канала могут быть определены по величине индукции магнитного поля. Определено, что в каждом сечении по ширине канала зона ионизации и ускорения начинается в точке с индукцией магнитного поля равной $0,8 \cdot Br_{\max}$, где Br_{\max} – максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного в соответствующем сечении, а граница окончания зоны ионизации и ускорения определяется как лежащая ниже Br_{\max} по направлению истечения плазменной струи двигателя;

- по ширине ускорительного канала протяженность зоны ионизации и ускорения в первом приближении обратно пропорциональна максимальной величине продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля dBr/dz_{\max} ;

- по ширине ускорительного канала напряженность электрического поля E_z в первом приближе-

нии прямо пропорциональна максимальной величине продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля dBr/dz_{\max} .

Выявленные связи подтверждаются результатами совместного анализа свойств ЗИУ и параметров магнитного поля в новом СВД, с заведомо внесенными изменениями в распределении магнитного поля.

Полученные сведения о связи свойств ЗИУ с магнитным полем могут быть использованы при разработке новых двигателей, а также для оптимизации уже существующих моделей.

Литература

1. Ким, В. П. Стационарные плазменные двигатели [текст] / В. П. Ким, Н. В. Белан, А. И. Оранский, В. Б. Тихонов. – Харьков : ХАИ, 1989. – 315 с.
2. Стационарный плазменный ускоритель двигателя АТОН [Текст] / А. И. Морозов, А. И. Бугрова, А. В. Десятков [и др.] // Физика плазмы. – 1997. – Т. 23. – № 7. – С. 635-645.
3. Magnetically Shielded Miniature Hall Thruster: Design Improvement and Performance Analysis [электронный ресурс] / R. W. Conversano, D. M. Goebel, R. R. Hofer [и др.] // 34th International Electric Propulsion Conference. – 2015. – IEPC-2015-100. IEPC-2015-100 / ISTS-2015-b-100. – P. 1-12. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentations/IEPC-2015-100_ISTS-2015-b-100.pdf. – 01.03.2017 г.
4. Blinov, N. V. Experimental investigation of magnetic field topology influence on structure of acceleration layer and performance of hall thruster [электронный ресурс] / N. V. Blinov, O. A. Gorshkov, A. A. Shagayda // 29th International Electric Propulsion Conference. – 2005. – IEPC-2005-033. – P. 1-10. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2005_index/033.pdf. – 01.03.2017 г.
5. Zhurin, V. V. Physics of closed drift thrusters [электронный ресурс] / V. V. Zhurin, H. R. Kaufman, R. S. Robinson // Plasma sources sci. technol. – 1999. – Vol. 8, № 1. – P. 1-20. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/8/1/021/pdf>. – 01.03.2017 г.
6. Linnella, J. A. Internal plasma potential measurements of a hall thruster using xenon and krypton propellant [электронный ресурс] / J. A. Linnella, A. D. Gallimore // Physics of plasmas. – 2006. – Vol. 13, № 9. – P. 1-10. – Режим доступа: <http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2335820>. – 01.03.2017 г.
7. A High Specific Impulse Two-Stage Hall Thruster with Plasma Lens Focusing [электронный ресурс] / R. R. Hofer, P. Y. Peterson, A. D. Gallimore, R. S. Jankovsky // 27th International Electric Propulsion Conference. – 2001. – IEPC-01-036. – P. 1-23. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/>

ba03/e7122de9a345e12c4a8a52fc4e8f68908557.pdf.
– 01.03.2017 г.

8. Haas, J. M. *Low-perturbation interrogation of the internal and near-field plasma structure of a hall thruster using a high-speed probe positioning system* [электронный ресурс] : diss. ... doctor of philosophy : защищена 2001 / James Matthew Haas. – The University of Michigan, USA. – 295 p. – Режим доступа: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/132399>. – 01.03.2017 г.

9. *Controlling Ion Acceleration Region in Hall thrusters* [электронный ресурс] // Y. Raitses, D. Staack, L. Dorf [и др.] // 29th International Electric Propulsion Conference. – 2005. – IEPC-2005-053. – P. 1-4. Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2005index/053.pdf. – 01.03.2017 г.

10. Meezan, N. B. *Anomalous electron mobility in a coaxial Hall discharge plasma* [электронный ресурс] / N. B. Meezan, W. A. Hargus, M. A. Cappelli // *Physical Review E*. – 2001. – Vol. 63, № 2. – P. 1-7. – Режим доступа: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.63.026410>. – 01.03.2017 г.

11. Архипов, А. С. *Стационарные плазменные двигатели Морозова* [Текст] / А. С. Архипов, В. П. Ким, Е. К. Сидоренко. – М. : МАИ, 2012. – 290 с.

12. Титов, М. Ю. *Экспериментальный стенд и оборудование для исследования параметров плазмы в канале стационарного плазменного двигателя* [Текст] / М. Ю. Титов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 7. – С. 121-125.

13. Титов, М. Ю. *Измерение зондовых характеристик в разрядном канале стационарного плазменного двигателя* [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(125). – С. 82-88.

14. Титов, М. Ю. *Исследование влияния токов в катушках магнитной системы стационарного плазменного двигателя на распределение магнитного поля в разрядном канале* [Текст] / М. Ю. Титов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(135). – С. 76 – 82.

References

1. Kim, V. P., Belan, N. V., Oranskii, A. I., Tikhonov, V. B. *Statsionarnye plazmennye dvigateli* [Stationary plasma thrusters]. Khar'kov, KhAI Publ., 1989. 315 p.

2. Morozov, A. I., Bugrova, A. I., Desyatskov A. V. *Statsionarnyi plazmennyi uskoritel' dvigatel' ATON* [ATON stationary plasma thruster]. *Plasma Physics Reports*, 1997. vol. 23, no. 7, pp. 635-645.

3. Conversano, R. W., Goebel, D. M., Hofer R. R., Mikellides, I. G., Katz, I. *Magnetically Shielded Miniature Hall Thruster: Design Improvement and Performance Analysis*. *Proceedings of 34th IEPC*, 2015, Kobe, Japan, IEPC-2015-100, pp. 1-12. Available at: <http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentat>

ions/IEPC-2015-100_ISTS-2015-b-100.pdf (accessed 01.03.2017).

4. Blinov, N. *Experimental Investigation of Magnetic Field Topology Influence on Structure of Accelerating Layer and Performance of Hall Thruster*. *Proceedings of 29th IEPC*, 2005, Princeton, New Jersey, USA, IEPC-2005-033, pp. 1-10. Available at: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_article_download_1988-2007/2005index/033.pdf. (accessed 01.03.2017).

5. Zhurin, V. V., Kaufman, H. R., Robinson, R. S. *Physics of closed drift thrusters*. *Plasma sources sci. technol.* 1999, vol. 8, no. 1, pp. 1–20. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/8/1/021/pdf> (accessed 01.03.2017).

6. Linnella, J. A., Gallimore, A. D. *Internal plasma potential measurements of a hall thruster using xenon and krypton propellant*. *Physics of plasmas*. 2006, vol. 13, no. 9, pp. 1-10. Available at: <http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2335820> (accessed 01.03.2017).

7. Hofer, R. R., Peterson, P. Y., Gallimore, A. D., Jankovsky, R. S. *A High Specific Impulse Two-Stage Hall Thruster with Plasma Lens Focusing*. *Proceedings of 27th IEPC*, 2001, Pasadena, California, USA, IEPC-01-036, pp. 1-23. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/ba03/e7122de9a345e12c4a8a52fc4e8f68908557.pdf> (accessed 01.03.2017).

8. Haas, J. M. *Low-perturbation interrogation of the internal and near-field plasma structure of a hall thruster using a high-speed probe positioning system*. Ph. D. Diss., The University of Michigan, USA, 2001, 295 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/132399> (accessed 01.03.2017).

9. Raitses, Y., Staack, D., Dorf, L., Fisch, N. J., Keidar, M. *Controlling Ion Acceleration Region in Hall thrusters*. *Proceedings of 29th IEPC*, 2005, Princeton, NJ, USA, IEPC-2005-053, pp. 1-4. Available at: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2005index/053.pdf (accessed 01.03.2017).

10. Meezan, N. B., Hargus, W. A., Cappelli, M. A., *Anomalous electron mobility in a coaxial Hall discharge plasma*. *Physical Review E*. 2001, vol. 63, no. 2, pp. 1-10. Available at: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.63.026410> (accessed 01.03.2017).

11. Arhipov, A. S., Kim, V. P., Sidorenko, E. K. *Stacionarnye plazmennye dvigateli Morozova* [Morozov stationary plasma thruster]. Moskow, MAI Publ., 2012. 290 p.

12. Titov, M. Yu., *Experimental stand and equipment for investigation of plasma parameters inside SPT channel*. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 7(124), pp. 121-125. (In Russian).

13. Titov, M. Yu., Loyan A. V., *Measurements of probe characteristics in the discharge channel of stationary plasma thruster*. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 8(125), pp. 82-88. (In Russian).

14. Titov, M. Yu., Investigation of magnetization coil current influence on distribution of magnetic field in discharge channel of stationary plasma thruster. *Avia-*

cijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology, 2015, no. 8(135), pp. 76-82. (In Russian).

Поступила в редакцию 23.05.2017, рассмотрена на редколлегии 7.06.2017

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОНИ ІОНІЗАЦІЇ ТА ПРИСКОРЕННЯ З МАГНІТНИМ ПОЛЕМ У ПРИСКОРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛІ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

М. Ю. Тітов, А. В. Лоян

В роботі представлено результати спільного аналізу розподілів електричного та магнітного полів в прискорювальним каналі стаціонарного плазмового двигуна, виконаного з метою виявлення зв'язків властивостей зони іонізації та прискорення (ЗІУ) з параметрами магнітного поля. Встановлено наявність зв'язку кордонів ЗІУ з максимальною величиною радіальної складової індукції магнітного поля B_r , зв'язку протяжності ЗІУ і величиною максимального поздовжнього градієнта B_r . Виявлено прямо пропорційну залежність напруженості електричного поля від величини максимального поздовжнього градієнта B_r . Виявлено відхилення ліній однакового електричного потенціалу від силових ліній магнітного поля. Аналіз зв'язків проведено по всій ширині прискорювального каналу. Наводяться результати верифікації виявлених зв'язків.

Ключові слова: плазмовий двигун, напруженість електричного поля, індукція магнітного поля.

INVESTIGATION OF RELATIONS OF IONIZATION AND ACCELERATION ZONE PROPERTIES WITH MAGNETIC FIELD IN ACCELERATING CHANNEL OF STATIONARY PLASMA THRUSTER

M. Yu. Titov, A. V. Loyan

Paper represents results of an analysis of electric and magnetic fields distributions in the acceleration channel in stationary plasma thruster, performed to find relationships between properties of ionization and acceleration zone (IAZ) and parameters of magnetic field. There were found: connections between IAZ boundaries and maximum value of the radial component of magnetic induction B_r , connections between IAZ length and magnitude of the maximum longitudinal gradient of B_r . A directly proportional dependence of the electric field strength on the maximum longitudinal gradient B_r was found. Deviation of lines with constant electric potential from magnetic force lines is revealed. The analysis of the relations is carried out over the entire width of the accelerating channel. Results of verification of the detected relations are given.

Keywords: stationary plasma thruster, electric field strength, magnetic field inductance.

Тітов Максим Юрьевич – мл. науч. сотр. каф. Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный Аэрокосмический Университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@khai.edu.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Titov Maksym Yurevich – research assistant, Space technology and non-traditional energy sources department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: titov@khai.edu.

Loyan Andriy Vitalevich – Candidate of Technical Science, senior staff scientist, Space technology and non-traditional energy sources department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.