

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 537.534.2

УПРАВЛЕНИЕ ИОННЫМИ ПОТОКАМИ В ХОЛЛОВСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

Духопельников Д.В.* , Воробьев Е.В.** , Ивахненко С.Г.***

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия*

** e-mail: duh@bmstu.ru*

*** e-mail: evgsparrow@gmail.com*

**** e-mail: ivakhnenko@bmstu.ru*

Показано, что азимутальное отклонение ионов в канале холловских ускорителей под действием силы Лоренца не позволяет сфокусировать ионный пучок в пятно с гауссовым распределением плотности ионного тока. Показано, что при помощи дополнительной магнитной системы, установленной за выходом из ускорительного канала, можно компенсировать азимутальное отклонение ионов и добиться хорошей фокусировки ионного пучка. Представлен ускоритель ИИ200К, реализующий данный способ фокусировки. Изложены результаты измерения распределения плотности ионного тока по радиусу ионного пучка ускорителя ИИ200К на различных расстояниях от ускорителя.

Ключевые слова: сила Лоренца, ускоритель с анодным слоем, холловский ускоритель, фокусировка ионного пучка.

Холловские электрические ракетные двигатели (ЭРД) уже 40 лет успешно эксплуатируются на космических аппаратах [1–3]. Они используются для коррекции и изменения высоты орбиты спутников, а также для маршевых операций [4].

Одновременно с этим ускорители, выполненные по аналогичным схемам, получили широчайшее распространение в вакуумных ионно-плазменных технологиях в качестве систем ионной очистки [5, 6] и наноразмерной обработки поверхности [7, 8].

Ускорители с анодным слоем (УАС) работают по принципу бездиссипативного ускорения ионов самосогласованным электромагнитным полем [2].

Ускорение ионов происходит в кольцевом канале, образованном полюсами магнитной системы и ограниченном с одной стороны анодом. Магнитная система создает в кольцевом канале радиальное магнитное поле B , перпендикулярное электрическому полю E , направленному вдоль оси канала. Электроны, подвижность которых поперек магнитного поля сильно ограничена, медленно двигаются к аноду, совершая азимутальные движения в направлении, перпендикулярном полям E и B , что приводит к появлению азимутального тока электронов. Ионы рождаются около анода и ускоряются в направлении поля E вдоль оси канала x .

В первом приближении считается, что магнитное поле не влияет на движение ионов в ускорительном канале. На самом деле, ионы под действием магнитного поля отклоняются на малую величину. Это явление может привести к снижению тяги [9], изменению формы цилиндрической струи, которая приобретает форму однополостного гиперболоида и расходится с углом, равным углу азимутального поворота ионов [10]. Также азимутальный поворот ионов приводит к появлению момента вращения [11]. При работе двигателя на веществах с большой атомной массой, таких, как ксенон, первые два явления вносят очень малый вклад в баллистику летательного аппарата. В то же время следует учитывать создаваемый момент вращения, так как длительное время работы холловского двигателя, при относительно небольшой азимутальной составляющей силы тяги, может привести к возникновению существенных угловых скоростей (до нескольких рад/с), что требует учета при проектировании аппарата.

При очистке поверхности, перед нанесением покрытия, обрабатываемая деталь вращается в цилиндрическом ионном пучке. Такой пучок, характерный для холловских ускорителей, создает на поверхности детали кольцевое пятно, перемещающееся при вращении детали. Такая форма пучка также приемлема для операций эквидистантного съема при круговых циклических движениях пятна ионного пучка по обрабатываемой поверхности при ионно-лучевой обработке оптических деталей. Однако для локальной корректировки ошибок формообразования или исправления регулярных отклонений от заданной формы необходим пучок, создающий на поверхности детали пятно, в котором распределение плотности ионного тока по радиусу близко к распределению Гаусса с максимумом в центре. Для формирования такого пучка из кольцевого ему необходимо придать коническую форму, сфокусировав его на поверхности обрабатываемой детали. Решению этой проблемы посвящена данная работа.

В ускорителях с азимутальным дрейфом электронов силовые линии магнитного поля являются электрическими эквипотенциалами [2, 12], что позволяет управлять ионным пучком, придавая магнитному полю необходимую форму. Этим пользуются при проектировании электрических ракетных двигателей для обеспечения наименьшей расходимости пучка [13]. Логично предположить, что свести кольцевой пучок в пятно с максимумом плотности ионного тока в центре можно, придав ускорительному каналу коническую форму.

Однако полностью сфокусировать ионный пучок таким способом не удается. Пучок в этом случае приобретает гиперболическую форму (рис. 1). Причиной этого является азимутальная составляющая скорости ионов, которую они приобретают в ускорительном канале под действием силы Лоренца [2, 14].

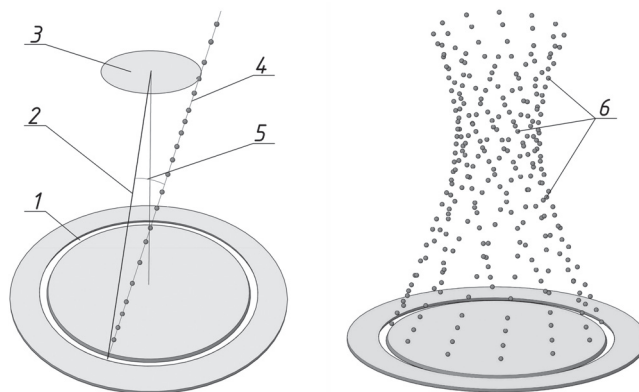


Рис. 1. Схема формирования гиперболического ионного пучка в ускорителе с коническим каналом: 1 — кольцевой канал УАС; 2 — образующая конической поверхности; 3 — кольцевое пятно от ионного пучка на обрабатываемой детали; 4 — траектория иона; 5 — угол азимутального поворота ионов; 6 — гиперболический контур пучка

Об этом эффекте впервые было упомянуто в работе [2] как об одном из механизмов снижения коэффициента полезного действия электрических ракетных двигателей с замкнутым дрейфом электронов. Впоследствии при разработке двигательных систем и технологических ускорителей азимутальная закрутка ионов учитывалась крайне редко. Принято считать, что ионы, ускоряясь в разрядном промежутке, не испытывают влияния со стороны магнитного поля, из-за большой, по сравнению с электронами, массы. В технологических УАС магнитное поле в ускорительном канале составляет 0.1—0.3 Тл. При работе на аргоне угол отклонения ионов от прямолинейной траектории на выходе из ускорительного канала может достигать 3—4° [9], поэтому необходимо учитывать данное явление. Например, в работе [15] рассматривался технологический УАС с фокусировкой пучка для ионно-лучевой пайки. Там азимутальное отклонение ионов при ускорении положительно влияло на распределение припоя на обрабатываемой поверхности, заставляя его вращаться в направлении этого отклонения.

Этот эффект не позволяет полностью сфокусировать ионный пучок приданием полюсным накопникам магнитной системы конической формы,

так как при азимутальном отклонении ионов пучок становится гиперболическим.

Движение иона в канале ускорителя в скрещенных полях E и B (рис. 2) описывается системой уравнений:

$$M \frac{dV_x}{dt} = q(E - V_y B); \quad (1)$$

$$M \frac{dV_y}{dt} = qV_x B. \quad (2)$$

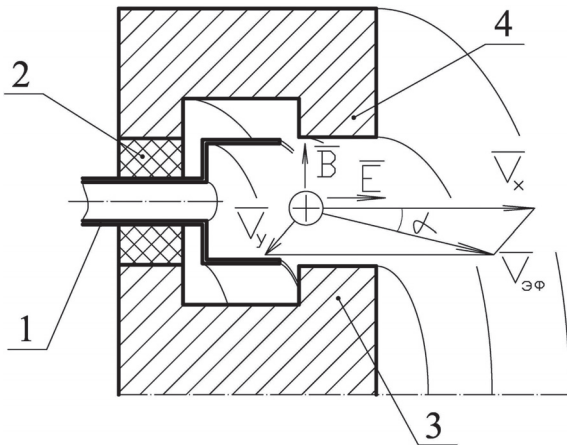


Рис. 2. Схема движения иона в ускорительном канале двигателя с анодным слоем: 1 — анод; 2 — изолятор; 3 — внутренний полюс; 4 — внешний полюс

Из уравнения (2), меняя переменную дифференцирования, получаем

$$M \frac{dV_y}{dt} = M \frac{dx}{dt} \frac{dV_y}{dx} = MV_x \frac{dV_y}{dx} = qV_x B,$$

откуда

$$M \frac{dV_y}{dx} = qB. \quad (3)$$

Интегрируем (3) при условии $x = 0, V_y = 0$:

$$V_y = \frac{q}{M} \int_0^{\infty} B dx. \quad (4)$$

Считая, что ион рождается возле анода и приобретает энергию, проходя разность потенциалов, равную ускоряющему напряжению U , получаем для угла α :

$$\alpha = \frac{V_y}{V_{\text{эф}}} = \left(\frac{2qU}{M} \right)^{-1/2} \frac{q}{M} \int_0^{\infty} B dx = \left(\frac{q}{2MU} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} B dx. \quad (5)$$

Как видно из полученного результата, угол отклонения α зависит от отношения заряда q к его массе M , ускоряющего напряжения U и распределения магнитного поля B вдоль оси канала ускорителя и не зависит от распределения электрического поля E .

Для полной фокусировки ионного пучка необходимо, чтобы угол азимутального отклонения на выходе из канала ускорителя был равен нулю. Из выражения (5) видно, что обеспечить это можно, если распределение магнитного поля вдоль ускорительного канала будет удовлетворять условию

$$\int_0^{\infty} B_l dx = 0. \quad (6)$$

Добиться выполнения этого условия можно, создавая обратное радиальное магнитное поле, вектор индукции которого направлен противоположно полю в канале ускорителя. Для этого на небольшом расстоянии от среза ускорительного канала устанавливается дополнительный магнитный полюс, формирующий магнитное поле, направленное противоположно полю в канале (рис. 3,а). Распределение составляющей индукции магнитного поля, перпендикулярной оси ускорительного канала, принимает вид, показанный на рис. 3,б. Ионный

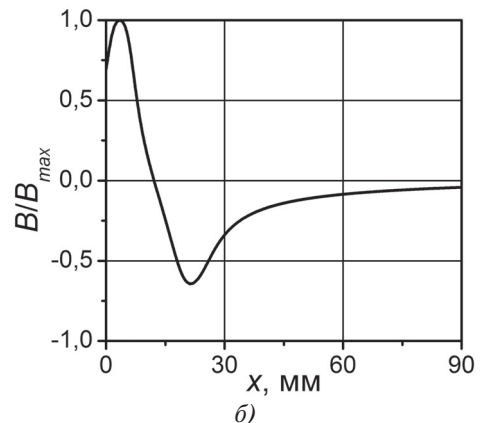
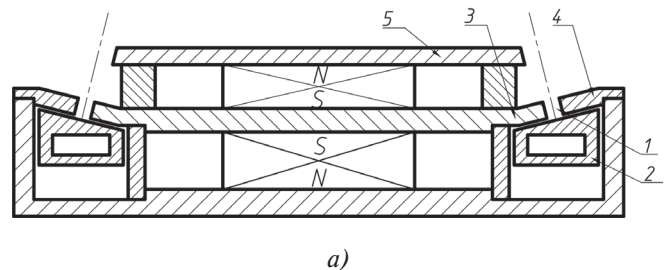


Рис. 3. Схема УАС с дополнительной магнитной системой (а) и распределение перпендикулярной составляющей магнитного поля вдоль образующей ускорительного канала (б): 1 — ускорительный канал; 2 — анод; 3 — внутренний полюс; 4 — внешний полюс; 5 — дополнительный полюс

пучок в области дополнительного магнитного полюса разворачивается в азимутальном направлении в сторону, противоположную его развороту в ускорительном канале. В результате форма пучка становится конической и фокусируется на заданном расстоянии в пятно, у которого максимум плотности ионного тока находится в центре.

Измерения распределения ионного тока по радиусу пучка производились на ускорителе ИИ200К, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Диаметр ускорительного канала 200 мм, напряжение разряда 2700 В, средняя энергия ионов 1700 эВ, ток разряда 200 мА, ионный ток пучка 155 мА, максимальная плотность ионного тока на поверхности обрабатываемой детали 40 А/м². Рабочий газ — аргон. Ускоритель выполнен по схеме, представленной на рис. 3,а, с магнитной системой, обеспечивающей выполнение условия (6) и фокусирующей ионный пучок на расстоянии 400 мм от выхода из ускорительного канала. Измерение индукции магнитного поля вдоль оси ускорительного канала производилось гауссметром AlphaLab GM-2.

Для измерения распределения плотности ионного тока по радиусу пучка ускорителя применялся многоэлектродный датчик, состоящий из 27 ионных зондов Фарадея, собирающая поверхность которых имела диаметр 5,5 мм. Зонды устанавливались с шагом 7 мм. Измерения производились на расстояниях 100, 250 и 400 мм от ускорителя. Полученные распределения плотности ионного тока по радиусу пучка показаны на рис. 4.

Как видно из рисунка, по мере удаления от среза ускорителя кольцевой ионный пучок (рис. 4,а) фокусируется в пятно с максимумом плотности ионного тока в центре (рис. 4,б).

Выводы

Проведенные исследования показали, что, дополняя конструкцию УАС с коническим каналом магнитной системой, компенсирующей азимутальный поворот ионов в ускорительном канале, можно полностью сфокусировать кольцевой ионный пучок на заданном расстоянии. При этом распределение плотности ионного тока по радиусу будет иметь форму, близкую к распределению Гаусса. Ускорители с анодным слоем, изготовленные по представленной схеме, могут применяться для точной ионно-лучевой обработки изделий вместо сеточных ускорителей Кауфмана, традиционно занимающих эту нишу. Это позволит повысить эффективность обработки, снизить стоимость и сложность оборудования. В таблице приведены технические характеристики представленного в данной работе ионного источника ИИ200К и типичного

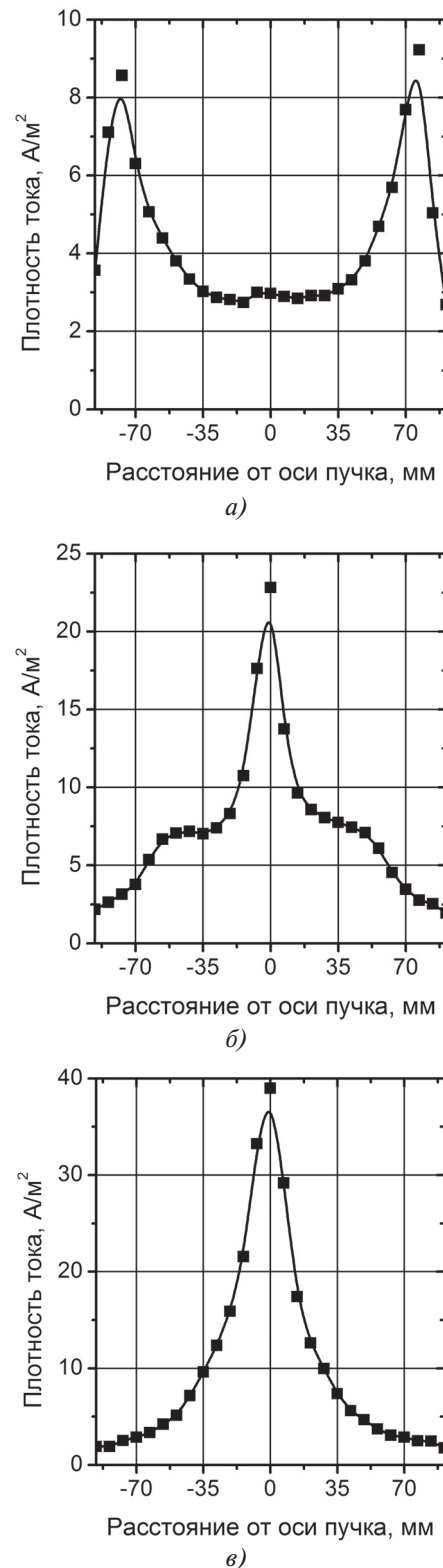


Рис. 4. Распределение плотности ионного тока по радиусу сфокусированного пучка на различных расстояниях от среза ускорителя: а — 100 мм; б — 250 мм; в — 400 мм

сеточного ускорителя, применяемого для обработки оптических деталей [7].

Характеристики ускорителей ИИ200К и кауфмановского

Параметр	УАС-200К	«Кауфман»
Диаметр зоны обработки, мм	70	20
Напряжение разряда, В	2700	3500—5000
Энергия ионов, эВ	1000—1350	3000-4500
Ток разряда, мА	200	—
Ионный ток пучка, мА	155	1,24 – 3,89
Плотность ионного тока на поверхности обрабатываемой детали, А/м ²	30—50	5—20
Коэффициент использования газа	0,054	0,0015—0,0089
Максимальная скорость распыления оптического ситалла, мкм/мин	0,032—0,036	0,0038—0,0085

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-38-00776\16 от 25.02.2016.

Библиографический список

1. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 2008. — 280 с.
2. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели. — М.: Машиностроение, 1989. — 216 с.
3. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 292 с.
4. Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Яшина Н.В. Использование маршевой электроракетной двигательной установки для управления ориентацией КА // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 3. С. 31-40.
5. Zhurin V.V. Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology. — Wiley, 2011. — 326 p.
6. Браун Я. Физика и технология ионных пучков / Пер. с англ. под ред. д.ф.-м.н. Е.С. Машковой. — М.: Мир, 1998. — 496 с.
7. Young-Sik Ghim, Shin-Jae You, Hyug-Gyo Rhee, Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee. Ultra-precision surface polishing using ion beam figuring // Proceedings of SPIE 8416, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, October 16, 2012, no. 841610.
8. Мартынов М.И., Михнев Р.А., Семенов А.П., Штандель С.К. Технология и метрология малоразмерной ионно-лучевой обработки оптических деталей // Формообразование оптических поверхностей: Труды международной академии «Контенант», Российское отделение. М., 2005. Т. 1. С. 151-170.
9. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В., Крылов В.И. Влияние азимутального отклонения ионов плазменной струи на тяговый КПД двигателя с анодным слоем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 12. С. 219-232.
10. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г. Влияние азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. №10. С. 157-164.
11. Воробьев Е.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г. Момент вращения в двигателях с анодным слоем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. С. 149-158.
12. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. — М.: Физматлит, 2006. — 576 с.
13. Hofer R.R. Development and Characterization of High-Efficiency, High-Specific Impulse Xenon Hall Thrusters. / A Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan, 2004. — 400 p.
14. Bizyukov A.A., Girka A.I., Sereda K.N., Nazarov A.V., Romaschenko E.V. Hall ion source with ballistic and magnetic beam focusing // Problems of atomic science and technology. 2008. № 6. Series: Plasma Physics (14), pp. 174-176.
15. Ланин В., Телеш Е. Пайка ионным лучом в вакууме // Технологии в электронной промышленности. 2007. №7. С. 64-68.

ION FLUX CONTROL IN HALL ACCELERATORS

Dukhopel'nikov D.V.* , Vorob'ev E.V.** , Ivakhnenko S.G.***

Moscow state technical university named after N.E. Bauman,
MSTU, 5/1, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

* e-mail: duh@bmstu.ru

** e-mail: evgsparrow@gmail.com

*** e-mail: ivakhnenko@bmstu.ru

Abstract

Hall thrusters are widely used for satellite orbit correction and marching operations for altitude change. At the same time the accelerators designed according to similar schemes acquired wide spread occurrence in vacuum ion plasma technologies as ion-cleaning and nano-scale surface treatment systems.

In a first approximation, in the design of such devices it is assumed that the magnetic field does not affect the ions movement in the accelerating channel. Actually, the ions deflected slightly in azimuthal direction under magnetic field impact, whereby the beam acquires the shape of one-sheet hyperboloid. With the thrusters, it might lead to the plume spread, derating and angular momentum occurrence. This leads to significant divergence of the ion beam in the technological accelerators operating on relatively lightweight argon. For surface cleaning before coating deposition such divergence of circular beam is acceptable, since maximum processing area is required. However, for dimensional ion beam processing narrow ion beams with Gauss ion current density distribution are required. At the same time, effect of the ion azimuthal deviation does not allow focusing the ion beam of the Hall accelerator only by coning the walls of the acceleration channel.

In this paper, additional magnetic pole was installed for focusing ion beam into a spot with Gauss ion current density distribution along radius at the outlet of the cone acceleration channel of the ion source. This magnet pole produced the magnetic field which vector is opposed to magnetic field vector in the channel. Ion beam in the additional magnetic pole area turns in azimuthal direction, opposite to its turn in the acceleration chamber. As a result, the beam is coned and focused at a specified distance into a spot with maximum ion current density concentrated in the center.

The paper formulates the criterion of optimum ion beam focusing in accelerator with anode layer. The ion current density distribution along the radius of the focused ion beam was measured with the accelerator experimental sample. It was shown that the installation of additional magnetic pole allows focusing the ion beam completely.

The obtained results can be used in the design of ion sources for punctual ion-beam machining of the details for optical and electronic industry.

Keywords: Lorentz force, accelerator with anode layer, Hall-effect thruster, ion beam focusing.

References

1. Gorshkov O.A., Muravlev V.A., Shagaida A.A. *Khollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov* (Hall and ion plasma thrusters for spacecraft), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 280 p.
2. Grishin S.D., Leskov L.V. *Elektricheskie raketnye dvigateli* (Electric rocket engines), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 216 p.
3. Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnye plazmennye dvigateli Morozova* (Stationary plasma engines Morozov), Moscow, MAI, 2012, 292 p.
4. Obukhov V.A., Pokryshkin A.I., Popov G.A., Yashina N.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 31-40.
5. Zhurin V.V. *Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2011, 326 p.
6. Brown Ian G. *The Physics and Technology of Ion Sources*, Wiley, 2006, 399 p.
7. Young-Sik Ghim, Shin-Jae You, Hyug-Gyo Rhee, Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee. Ultra-precision surface polishing using ion beam figuring. *Proceedings of SPIE 8416, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*, October 16, 2012, no. 84161O.
8. Martynov M.I., Mikhnev R.A., Semenov A.P., Shtandel' S.K. *Formoobrazovanie opticheskikh poverkhnostei: trudy mezhdunarodnoi akademii "Kontenant", Rossiiskoe otdelenie*. Moscow, 2005, vol. 1, pp. 151-170.
9. Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'ev E.V., Krylov V.I. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2012, no. 12, pp. 219-232.
10. Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2012, no. 10, pp. 157-162.
11. Vorob'ev E.V., Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe*

- izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 10, pp. 149-156.
12. Morozov A.I. *Vvedenie v plazmodinamiku* (Introduction to plasma dynamics), Moscow, Fizmatlit, 2006, 576 p.
 13. Hofer R.R. *Development and Characterization of High-Efficiency, High-Specific Impulse Xenon Hall Thrusters*. A Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan, 2004, 400 p.
 14. Bizyukov A.A., Girka A.I., Sereda K.N., Nazarov A.V., Romaschenko E.V. Hall ion source with ballistic and magnetic beam focusing, *Problems of atomic science and technology*, 2008, no. 6. Series: Plasma Physics (14), pp. 174-176.
 15. Lanin V., Telesh E. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2007, no. 7, pp. 64-68.