

## Момент вращения в двигателях с анодным слоем

# 10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0656749

Воробьев Е.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г.

УДК 621.455.4

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[ivakhnenko@bmstu.ru](mailto:ivakhnenko@bmstu.ru)

[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)

[mkm@power.bmstu.ru](mailto:mkm@power.bmstu.ru)

[evgsparrow@gmail.com](mailto:evgsparrow@gmail.com)

### *Введение*

В работах [1-3] было показано влияние эффекта азимутального отклонения ионов на форму ионного пучка и снижение энергетических характеристик холловских двигателей. В данной статье рассматривается возникновение момента вращения, передаваемого двигателем космическому аппарату, причиной появления которого является азимутальное отклонение ионов.

Холловские двигатели уже более 40 лет используются на космических аппаратах [4-7]. Они применяются для коррекции орбиты спутников, а также для маршевых операций по изменению высоты полета. В настоящее время существенно расширяется область применения таких двигателей на автоматических космических аппаратах для проведения исследований различных типов, в том числе [7-9]:

- проведение фундаментальных исследований гравитационного и магнитного полей Земли;
- моделирование физических процессов в условиях невесомости;
- изучение дальнего космоса с помощью орбитальных телескопов различного частотного диапазона;
- изучение процессов в пылевой плазме;
- получение новых лекарственных препаратов;
- проведение биологических экспериментов;
- получение сверхчистых материалов.

Необходимость проведения таких исследований в космосе определяется условиями невесомости, которые невозможно создать в течении длительного времени в наземных условиях. Поэтому к космическим аппаратам, предназначенным для этих целей, предъявляют особые требования – приборы и аппаратура должны находиться в состоянии свободного падения [5]. Такие аппараты имеют особую конструкцию, которая сводит к минимуму его габариты. Двигательная установка должна компенсировать любые источники возмущения движения такого аппарата (сопротивление окружающей атмосферы, потоки частиц и т.д.).

### ***Угол азимутального отклонения ионов***

Как было сказано выше, для холловских двигателей характерно азимутальное отклонение ионов в ускорительном канале. Это отклонение возникает в результате действия силы Лоренца на ускоряемые ионы [1-3], [10], [11]. Как было показано в работе [1], ионы отклоняются от оси двигателя на угол  $\alpha$ , который можно вычислить как:

$$\alpha = \frac{q}{m_p AgI_{sp}} \int_0^{\infty} B_r(x) dx \quad (1)$$

где:  $q$  – заряда иона,  $m_p$  – масса протона,  $A$  – относительная атомная масса иона,  $g$  – ускорение свободного падения,  $I_s$  – удельный импульс двигателя,  $B_r(x)$  – радиальная составляющая индукции магнитного поля в канале вдоль оси канала ускорителя.

В работе [2] было показано, что интеграл в выражении (1) может быть оценен как:

$$\Omega = \int_0^{\infty} B_r(x) dx = B_{0r} (l + 1, 25h) \quad (2)$$

где:  $B_{r0}$  – максимальная величина радиальной составляющей индукции магнитного поля в ускорительном канале,  $h$  – ширина зазора между полюсами магнитной системы,  $l$  – длина ускорительного канала.

Тогда из (1) с учетом (2) для однозарядных ионов получаем:

$$\alpha = \frac{q}{m_p AgI_{sp}} \int_0^{\infty} B_r(x) dx = \frac{qB_{0r} (l + 1, 25h)}{m_p AgI_{sp}} = \frac{q\Omega}{m_p AgI_{sp}} = 10^7 \frac{\Omega}{AI_{sp}} \quad (3)$$

### Момент вращения и угловые ускорения

Отклонение ионов на угол  $\alpha$  от оси двигателя приводит к возникновению крутящего момента (рис. 1). Т.о. часть силы тяги  $F_T$  двигателя будет создавать крутящий момент  $M$ . Величину этого момента можно вычислить зная средний диаметр ускорительного канала двигателя  $D$ :

$$M = \frac{F_T D}{2} \sin \alpha, \quad (4)$$

где:  $D$  – средний диаметр двигателя.

Тогда угловое ускорение аппарата  $\varepsilon_a$  и угловая скорость  $\omega_a$  через время работы двигателя  $t$  могут быть найдены как:

$$\varepsilon_a = \frac{d\omega_a}{dt} = \frac{M}{J_a}, \quad \omega_a = \frac{M}{J_a} t \quad (5)$$

где:  $J_a$  – момент инерции аппарата относительно оси двигателя.

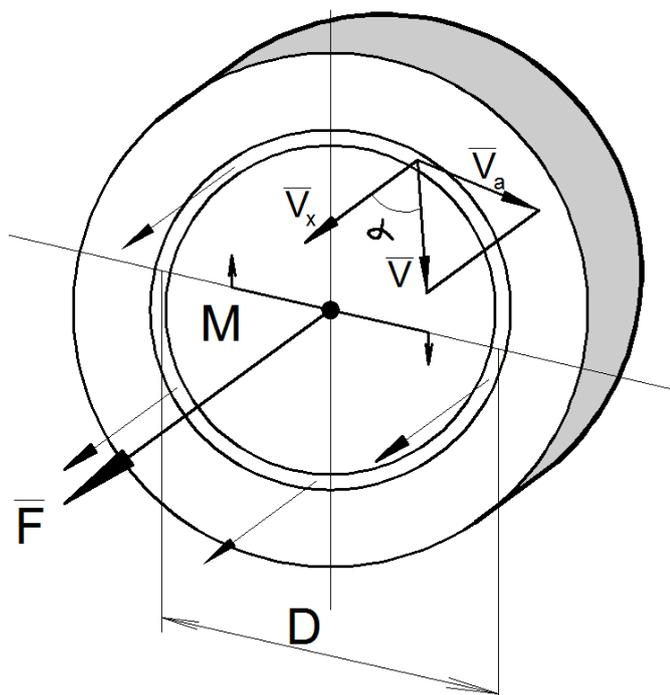


Рис.1. Схема возникновения вращающего момента в холловском двигателе:  $V_x$  – скорость иона в направлении оси двигателя;  $V$  – скорость иона;  $V_a$  – азимутальная составляющая скорости иона;  $\alpha$  – угол азимутального отклонения;  $M$  – вращающий момент;  $F_T$  – сила тяги;  $D$  – средний диаметр

Будем считать, что аппарат массой  $m_a$  имеет форму цилиндра радиуса  $R_a$ , ось которого совпадает с осью двигателя, а масса распределена равномерно по объему. Если ось двигателя совпадает с осью такого цилиндра, то момент инерции аппарата можно оценить как:

$$J_a = \frac{1}{2} M_a R_a^2 \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в (4) получаем зависимость для крутящего момента двигателя при малых углах азимутального отклонения ионов:

$$M = \frac{F_T D}{2} \frac{q B_{0r} (l + 1,25h)}{m_p A g I_{sp}} = \frac{F_T D}{2} \frac{q \Omega}{m_p A g I_{sp}} = 10^7 \frac{F_T D}{2} \frac{\Omega}{A I_{sp}} \quad (7)$$

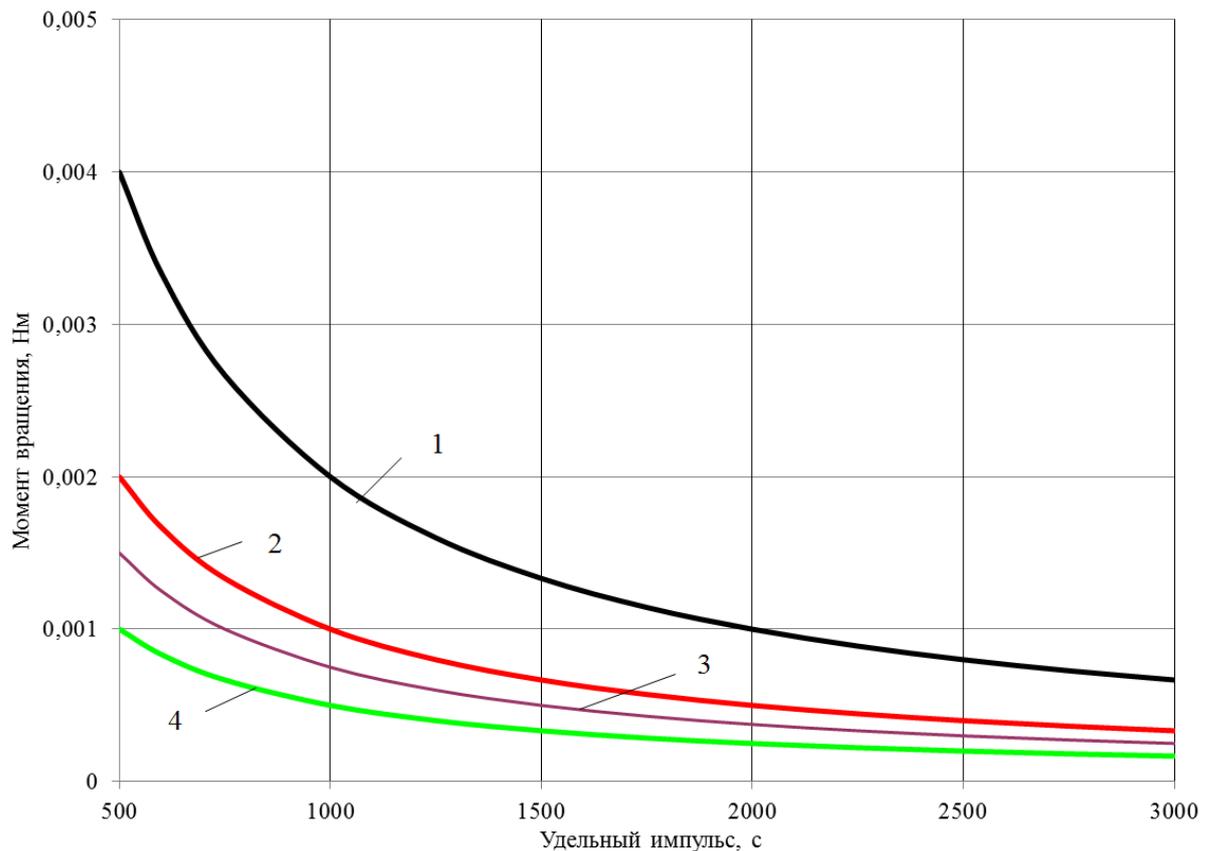


Рис. 2. Зависимость момента вращения, создаваемого двигателем, работающим на аргоне, от удельного импульса при различных значениях  $\Omega$ , сила тяги 100 мН, средний диаметр

80 мм:

1 –  $\Omega = 2 \times 10^{-3}$  Тл·м; 2 –  $\Omega = 1 \times 10^{-3}$  Тл·м;

3 –  $\Omega = 0,75 \times 10^{-3}$  Тл·м; 4 –  $\Omega = 0,5 \times 10^{-3}$  Тл·м;

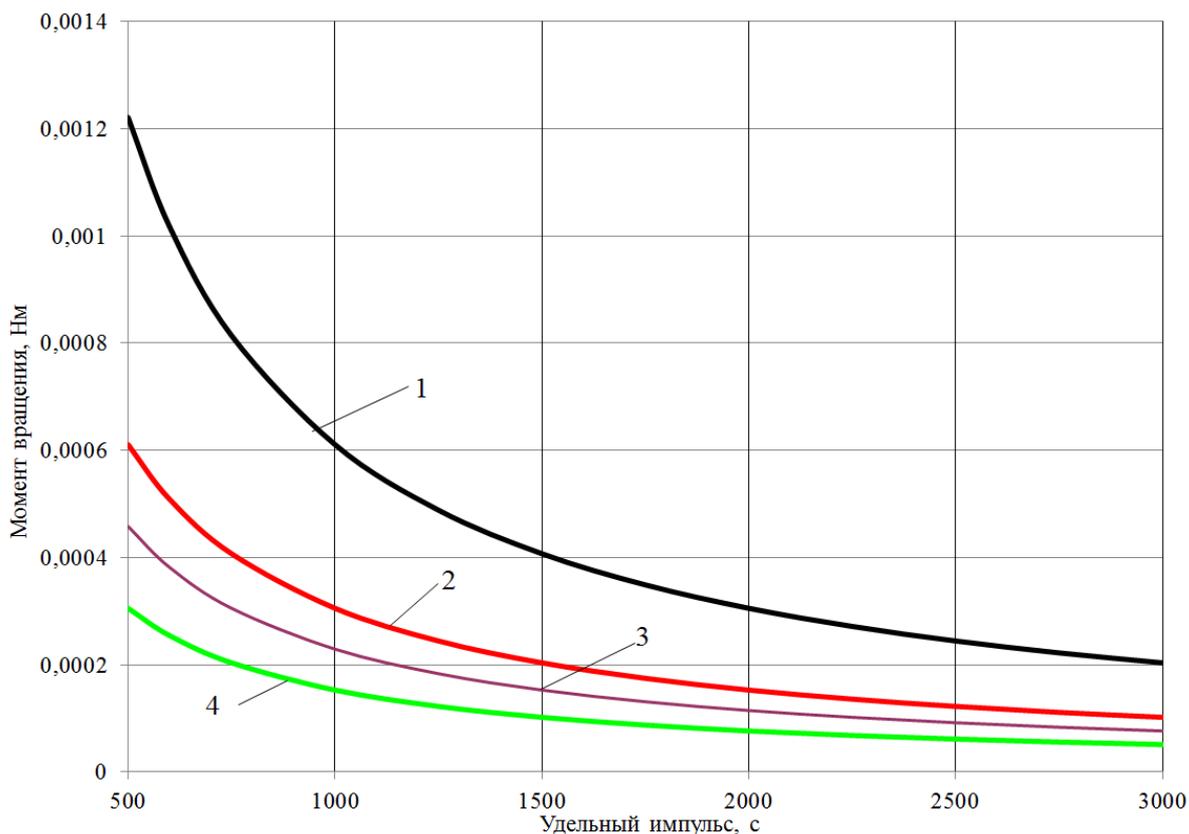


Рис. 3. Зависимость момента вращения, создаваемого двигателем, работающим на ксеноне, от удельного импульса при различных значениях  $\Omega$ , сила тяги 100 мН, средний диаметр 80 мм:

$$1 - \Omega = 2 \times 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м}; \quad 2 - \Omega = 1 \times 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м};$$

$$3 - \Omega = 0,75 \times 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м}; \quad 4 - \Omega = 0,5 \times 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м};$$

Из полученного выражения (7) видно, что момент вращения  $M$  в холловском двигателе растет при увеличении силы тяги  $F_T$ , геометрических размеров ускорительного канала (длина, ширина и средний диаметр) и величины радиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_{0r}$  в ускорительном канале. Снижение атомной массы рабочего вещества  $A$  и удельного импульса двигателя  $I_s$  также приводит к росту момента вращения.

#### **Оценка воздействия момента вращения на аппарат**

Выражение (7) позволяет оценить угловые ускорения и угловые скорости космического аппарата. При тяге двигателя, работающего на ксеноне,  $F_T = 0,2 \text{ Н}$  с удельным импульсом  $I_s = 1000 \text{ с}$  и диаметром ускорительного канала 100 мм на космическом аппарате массой 1000 кг и радиусом  $R_a = 1 \text{ м}$  угловые ускорения могут

составлять  $\varepsilon=1 \times 10^{-6}$  рад/с<sup>2</sup>. За времена работы от 100 до 500 часов угловые скорости могут составлять  $\omega=0,4 \dots 2$  рад/с и центростремительные ускорения вращения на периметре аппарата будут иметь величину  $a_c = 0,17 \dots 4$  м/с<sup>2</sup>. Для аргона эти величины будут иметь значения соответственно: угловые ускорения  $\varepsilon=3,75 \times 10^{-6}$  рад/с<sup>2</sup> угловые скорости  $\omega=1,35 \dots 6,75$  рад/с центростремительные ускорения  $a_c = 2 \dots 45$  м/с<sup>2</sup>.

На рисунке 2 и 3 представлены зависимости момента вращения, создаваемого холловским двигателем, работающем на ксеноне и аргоне соответственно, при различных параметрах двигателя.

### **Выводы**

1. Момент вращения, вызванный азимутальным отклонением ионов может привести возникновению заметных угловых ускорений (до  $10^{-5}$  рад/с<sup>2</sup>), что требует соответствующей компенсации.
2. 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
3. Увеличение тяги двигателя, геометрических размеров ускорительного канала и величины индукции магнитного поля в ускорительном канале приводит к росту момента вращения, создаваемого холловским двигателем.
4. Снижение атомной массы рабочего вещества и удельного импульса двигателя приводит к росту момента вращения, создаваемого холловским двигателем.
5. Для снижения нагрузки на систему стабилизации космического аппарата по компенсации вращающего момента целесообразно устанавливать соосно два двигателя, с противоположным направлением магнитного поля и азимутального отклонения ионов. Это обеспечит взаимную компенсацию моментов вращения, создаваемых двигателями.
6. Необходимо проработать схемы ускорительных каналов холловских двигателей со знакопеременным магнитным полем для устранения азимутального отклонения ионов.

### **Список литературы**

1. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К., Крылов В.И. Влияние азимутального отклонения ионов плазменной струи на тяговый КПД двигателя с

- анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. DOI: [10.7463/1212.0483944](https://doi.org/10.7463/1212.0483944)
2. Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К. Потеря тяги в двигателях с анодным слоем за счет азимутальной закрутки ионов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Ионно-плазменные технологии». С. 58-63.
3. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г. Влияния азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. DOI: [10.7463/1012.0483832](https://doi.org/10.7463/1012.0483832)
4. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
5. Гришин С.Д. Основы теории электрических ракетных двигателей. Ч. 1. Введение. Электростатические двигатели. М.: Машиностроение, 1999. 119 с.
6. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Изд-во МАИ, 2012. 292 с.
7. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов /; под ред. акад. РАН А.С. Коротева. М.: Машиностроение, 2008. 280 с.
8. Wallace N., Jameson P., Saunders C., Fehringer M., Edwards C., Floberghagen R. The GOCE ion propulsion assembly – lessons learnt from the first 22 months of flight operations // 32<sup>nd</sup> International Electric Propulsion Conf. Wiesbaden, Germany. September 11–15, 2011. IEPC-2011-327. P. 1-21.
9. Nefedov A.P., Morfill G.E., Fortov V.E., Thomas H.M., Rothermel H., Hagl T., Ivlev A.V., Zuzic M., Klumov B.A., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F., Gidzenko Y.P., Krikalev S.K., Shepherd W., Ivanov A.I., Roth M., Binnenbruck H., Goree J.A., Semenov Y.P. PKE-Nefedov: Plasma crystal experiments on the international space // New Journal of Physics. 2003. Vol. 3, no. 5. P. 33.1-33.10.
10. Ивахненко С.Г., Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Марахтанов М.К. Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в

двигателях с анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: [10.7463/1112.0483882](https://doi.org/10.7463/1112.0483882)

11. Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Жуков А.В., Кириллов А.В., Марахтанов М.К. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. "Ионно-плазменные технологии". С. 35-41.

## Torque in the thrusters with anode layer

# 10, October 2013

DOI: [10.7463/1013.0656749](https://doi.org/10.7463/1013.0656749)

Vorob'ev E.V., Marahtanov M.K., Duhopel'nikov V.V., Ivakhnenko S.G.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[ivakhnenko@bmstu.ru](mailto:ivakhnenko@bmstu.ru)

[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)

[mkm@power.bmstu.ru](mailto:mkm@power.bmstu.ru)

[evgsparrow@gmail.com](mailto:evgsparrow@gmail.com)

Effect of the torque in the thruster with anode layer was considered. It was shown that the mechanism of appearance of such torque is associated with the azimuthal deflection of ions in the accelerating channel of an engine as it moves in the radial magnetic field. Dependences between the angular acceleration of a device and the strength of magnetic field for different thruster's operating modes, different working substances and mass-dimensional characteristics of the spacecraft were obtained. It was also demonstrated that this torque could have a significant impact on the stabilizing system in cases of long-time operation. The remedy for harmful influence of the azimuthal deflection of ions on the spacecraft's rotation was proposed.

**Publications with keywords:** [anode layer thruster](#), [the azimuthal deflection of ions](#), [thrust](#), [torque](#)

**Publications with words:** [anode layer thruster](#), [the azimuthal deflection of ions](#), [thrust](#), [torque](#)

### References

1. Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G., Marakhtanov M.K., Krylov V.I. Vliyaniye azimutal'nogo otkloneniya ionov plazmennoy strui na tyagovyy KPD dvigatelya s anodnym sloem [The influence of the azimuthal deviation ion plasma jet on the traction motor efficiency with anode layer]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 12. DOI: [10.7463/1212.0483944](https://doi.org/10.7463/1212.0483944)
2. Vorob'ev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Marakhtanov M.K. Poteria tiagi v dvigateliakh s anodnym sloem za schet azimutal'noi zakrutki ionov [Loss of traction in the engines with anode layer due to azimuthal swirl of ions]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2011, spec. iss. "Ionno-plazmennye tekhnologii" ["Ion-plasma technology"], pp. 58-63.
3. Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G. Vliyaniya azimutal'nogo otkloneniya ionov na formu puchka dvigatelya s anodnym sloem [Influence of azimuthal deflection of ions on the beam

- shape of the engine with anode layer]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 10. DOI: [10.7463/1012.0483832](https://doi.org/10.7463/1012.0483832)
4. Grishin S.D., Leskov L.V. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 216 p.
5. Grishin S.D. *Osnovy teorii elektricheskikh raketnykh dvigatelei. Ch. 1. Vvedenie. Elektrostaticheskie dvigateli* [Fundamentals of the theory of electric rocket engines. Pt 1. Introduction. Electrostatic engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1999. 119 p.
6. Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnye plazmennye dvigateli Morozova* [Morozov stationary plasma thruster]. Moscow, MAI Publ., 2012. 292 p.
7. Gorshkov O.A., Muravlev V.A., Shagaida A.A. *Khollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlia kosmicheskikh apparatov* [Hall and ion plasma thrusters for spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 280 p.
8. Wallace N., Jameson P., Saunders C., Fehring M., Edwards C., Floberghagen R. The GOCE ion propulsion assembly – lessons learnt from the first 22 months of flight operations. In: *Proc of the 32nd International Electric Propulsion Conf.*, Wiesbaden, Germany, 11-15 September, 2011. IEPC-2011-327, pp. 1-21.
9. Nefedov A.P., Morfill G.E., Fortov V.E., Thomas H.M., Rothermel H., Hagl T., Ivlev A.V., Zuzic M., Klumov B.A., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F., Gidzenko Y.P., Krikalev S.K., Shepherd W., Ivanov A.I., Roth M., Binnenbruck H., Goree J.A., Semenov Y.P. PKE-Nefedov: Plasma crystal experiments on the international space. *New Journal of Physics*, 2003, vol. 5, no. 1, pp. 33.1-33.10. Available at: <http://iopscience.iop.org/1367-2630/5/1/333/fulltext/> , accessed 01.09.2013.
10. Ivakhnenko S.G., Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Marakhtanov M.K. Eksperimental'noe podtverzhdenie effekta azimutal'nogo otkloneniya ionov v dvigatelyakh s anodnym sloem [Experimental demonstration of azimuthal ion deviation effect in engines with anode layer]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 11. DOI: [10.7463/1112.0483882](https://doi.org/10.7463/1112.0483882)
11. Vorob'ev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Khollovskii uskoritel' s fokusirovannym puchkom dlia nanorazmernoi obrabotki krupnogabaritnykh zerkal opticheskikh teleskopov [Hall accelerator with a focused beam for nanoscale processing of large-sized mirrors of optical telescopes]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2011, spec. iss. "Ionno-plazmennye tekhnologii" ["Ion-plasma technology"], pp. 35-41.