

**Влияние азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем**

# 10, октябрь 2012

DOI: 10.7463/1012.0483832

Духопельников Д. В., Ивахненко С. Г.

УДК 621.455.4

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Одной из проблем, возникающих при эксплуатации электрических ракетных двигателей (ЭРД) в космических условиях является влияние струи двигателя на телеметрическую аппаратуру, солнечные батареи и другие элементы конструкции космических аппаратов (КА). Для снижения отрицательного влияния ионного пучка на точную аппаратуру спутника, при его проектировании учитывается «область влияния», экспериментально определяемая для каждого изготовленного образца ЭРД [1]. Для уменьшения этой области разработчики двигателей решают задачи фокусировки пучка ионов и компенсации физических процессов, приводящих к их отклонению от номинальной траектории.

Одним из наиболее перспективных двигателей является двигатель с анодным слоем (ДАС) [2]. Принцип работы двигателя основан на ионизации и бездиссипативном ускорении ионов рабочего вещества в поперечном магнитном поле в кольцевом канале, заполненном частично замагниченной квазинейтральной плазмой. Ранее [2, 3, 4] было показано, что одной из причин расхождения струи ДАС является азимутальная закрутка ионов под действием магнитного поля.

При азимутальном повороте в поперечном магнитном поле траектория иона отклоняется на угол  $\alpha$  и перестает быть параллельной оси канала ускорителя, пучок «расходится», его цилиндрическая форма искажается. Угол азимутального поворота ионов  $\alpha$  может быть оценен по формуле, полученной в [4]:

$$tg\alpha = \sqrt{\frac{z \cdot e}{2A m_p} \frac{\int_{x_1}^{\infty} B_z dx}{\sqrt{\varepsilon_i}}} \quad , (1)$$

Где,  $B_z$  – индукция магнитного поля,  $\varepsilon_i$  – энергия иона,  $z$  – заряд иона,  $A$  – атомная масса,  $x_1$  – координата рождения иона.

Рассмотрим двигатель со средним диаметром канала  $D$ , из которого выходит пучок ионов, с углом азимутальной закрутки  $\alpha$  (рис. 1). Расположим систему координат так, чтобы ось  $OZ$  совпадала с осью двигателя, а плоскость  $XOY$  лежала на срезе ускорительного канала. Рассмотрим произвольную точку  $A$ , лежащую на срезе канала двигателя (считаем ширину каналу малой по отношению к диаметру). Ионный пучок, проходящий через эту точку, движется под углом  $\alpha$  по отношению к нормали и распространяется вдоль прямой  $a$ . Через каждую точку на срезе ускорительного канала двигателя проходит такой же ионный пучок и вместе они образуют фигуру вращения, образующей которой будет являться прямая  $a$ . При пересечении этой фигуры вращения с плоскостью  $ZOX$  или  $ZOY$  мы получим продольный профиль ионного пучка за срезом ускорительного канала. Если угол  $a=0$  то пучок будет цилиндрическим. Покажем, что если  $a \neq 0$  пучок имеет форму однополостного гиперboloида, осью которого является ось двигателя, а продольный профиль ионного пучка является гиперболой с асимптотами, выходящими из начала координат под углом  $\alpha$  к оси  $Z$ .

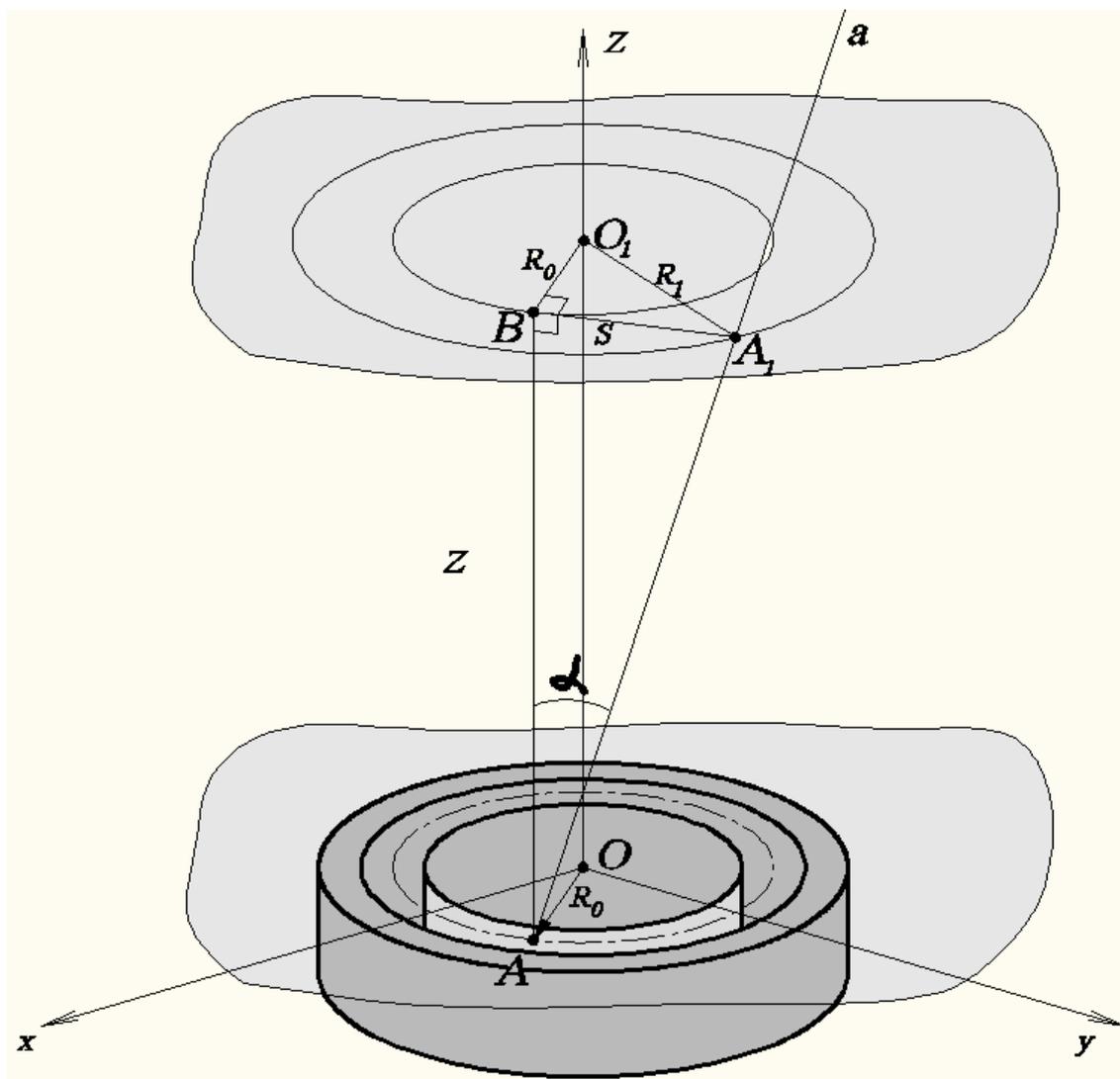


Рис. 1. Траектория иона с углом азимутального отклонения

Определим координаты какой либо точки на поверхности кольцевого ионного пучка за срезом ускорителя. Произвольно выбранную точку  $A$  соединим с началом координат  $O$  отрезком  $OA$ , имеющим длину  $R_0 = D/2$ . На оси  $OZ$  выберем точку  $O_1$  на расстоянии  $z$  от центра координат. Через точку  $O_1$  проведем плоскость параллельную срезу ускорителя. Прямая  $a$  будет пересекать эту плоскость в точке  $A_1$  с координатами  $(x, y, z)$ . Из точки  $A$  проведем перпендикуляр к этой плоскости, который будет пересекаться с ней в точке  $B$ . Для прямоугольного треугольника  $A_1O_1B$  можно записать:

$$R_0^2 + S^2 = R_1^2 \quad (2)$$

Из треугольника  $ABA_1$  для  $S$  получаем:

$$S = z \operatorname{tg}(\alpha) \quad (3)$$

Длину  $R_1$  определим из координат точки  $A_1$ :

$$R_1^2 = x^2 + y^2 \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2), перенесем члены, содержащие  $x, y, z$  в левую часть уравнения (2) и разделим полученный результат на  $R_0$ :

$$\frac{x^2}{R_0^2} + \frac{y^2}{R_0^2} - \frac{z^2}{R_0^2 / (\operatorname{tg} \alpha)^2} = 1 \quad (5)$$

Поскольку точку  $A$  мы выбирали произвольно, то полученному уравнению будут удовлетворять все точки на поверхности ионного пучка. Выражение (5) является каноническим уравнением однополостного гиперboloида в декартовых координатах [5].

Продольный профиль ионного пучка определим как пересечение гиперboloида с плоскостью  $ZOX$  из уравнения (5) при  $y=0$ :

$$\frac{x^2}{R_0^2} - \frac{z^2}{R_0^2 / (\operatorname{tg} \alpha)^2} = 1 \quad (6)$$

Уравнение (6) является каноническим уравнением гиперболы в декартовых координатах [5]. Ветви этой гиперболы пересекают ось  $OX$  в точках  $x = \pm R_0$  и ограничены асимптотами, пересекающими начало координат и повернутыми под углом  $\pm \alpha$  к оси  $OZ$  (рис. 2).

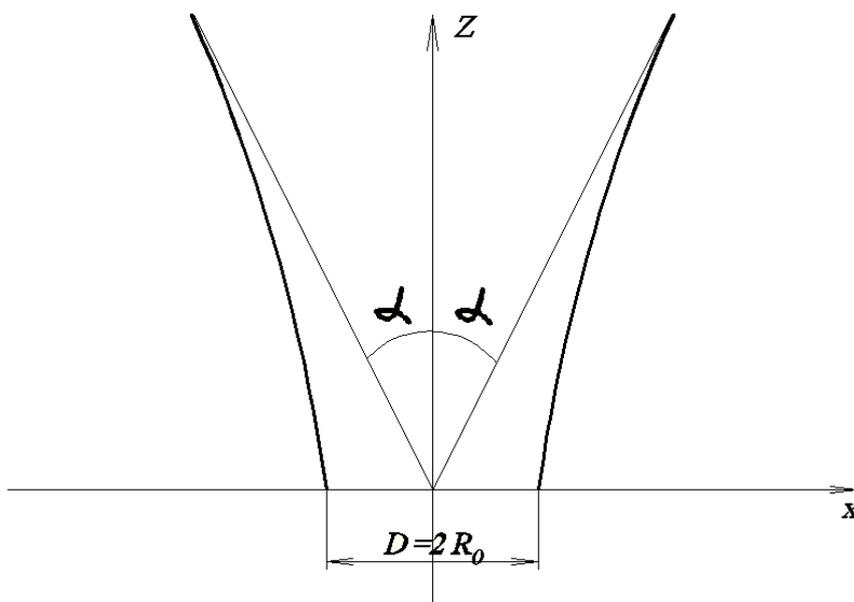


Рис. 2. Гиперболы, отвечающие уравнению (6).

На рис. 3 показаны расчетные продольные профили ионного пучка при различных углах азимутальной закрутки двигателя с диаметром ускорительного канала  $D=80$  мм. Анализ графиков показывает, что даже при небольших углах  $\alpha=3-4^\circ$  уширение пучка относительно диаметра

ускорительного канала двигателя может достигать 20–25 % на расстояниях порядка 0,5 м. При углах азимутальной закрутки  $\alpha=12^\circ$  уширение пучка становится равным 100 %.

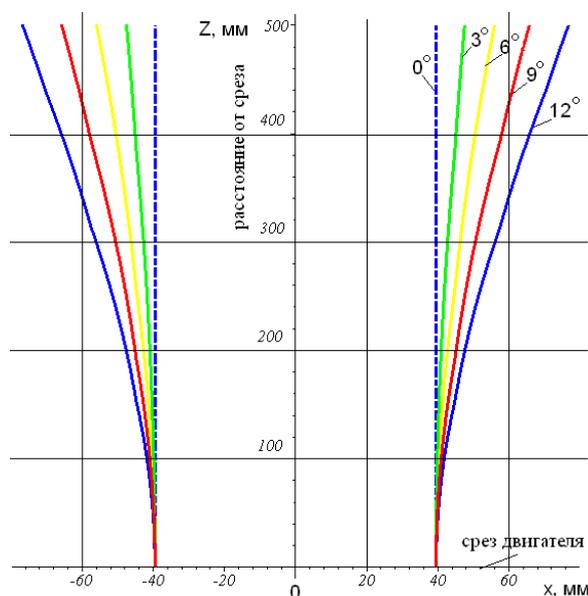


Рис. 3. Расхождение пучка при различных углах азимутальной закрутки для двигателя с диаметром ускорительного канала  $D=80$  мм.

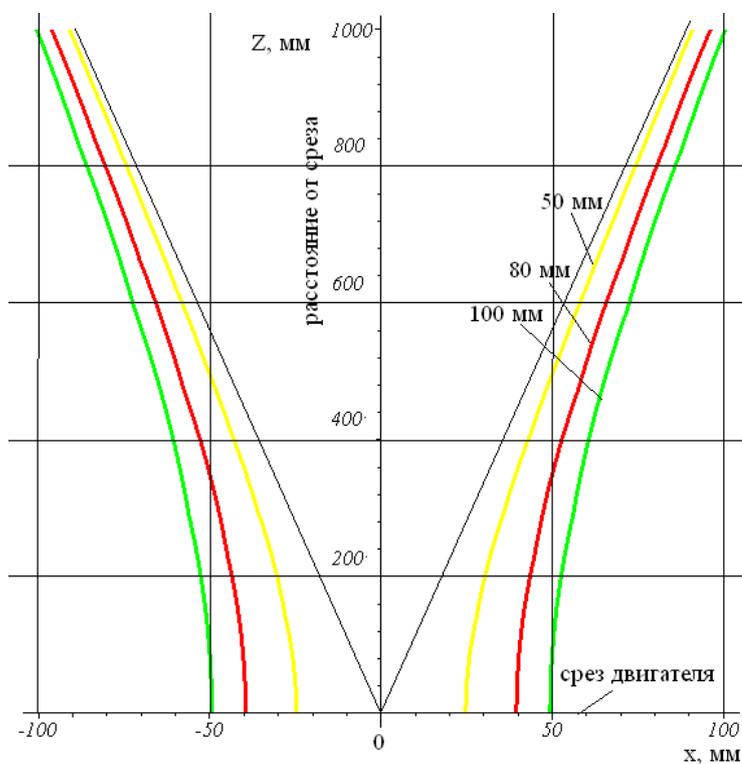


Рис. 4. Расхождение пучка при угле азимутальной закрутки ионов  $\alpha=12^\circ$  и различных диаметрах ускорительного канала  $D$  двигателя.

На рис. 4 показаны расчетные продольные профили ионного пучка при угле азимутальной закрутки ионов  $\alpha=12^\circ$  и различных диаметрах ускорительного канала  $D$  двигателя. Из рис. 4 видно, что фиксированном расстоянии от среза двигателя уширение пучка относительно диаметра ускорительного канала двигателя растёт при снижении диаметра канала.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что азимутальная закрутка ионов в ускорительном канале оказывает существенное влияние на расхождение ионного пучка в холловских двигателях. При азимутальной закрутке пучок ионов приобретает форму однополостного гиперболоида, расширяющегося за срезом ускорительного канала и ограниченного конусом с углом при вершине равным углу азимутальной закрутки  $\alpha$ . Уширение ионного пучка на фиксированном расстоянии от среза двигателя будет зависеть от угла азимутальной закрутки и диаметра ускорительного канала двигателя.

### Список литературы

1. F. S. Gulczinski, A.D. Gallimore, D.O. Carlson, B.E. Gilchrist. Impact of anode layer thruster plumes on satellite communications. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007, 8 p.

2. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели / - М.: Машиностроение, 1989 – 216 с.

3. Е.В. Воробьев, Д.В. Духопельников, С.Г. Ивахненко, М.К. Марахтанов. Потеря тяги в двигателях с анодным слоем за счет азимутальной закрутки ионов. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". - 2011. Специальный выпуск "Ионно-плазменные технологии". – С. 58-63.

4. Е.В. Воробьев, Д.В. Духопельников, С.Г. Ивахненко, А.В. Жуков, Д.В. Кириллов, М.К. Марахтанов. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". - 2011. Специальный выпуск "Ионно-плазменные технологии". – С. 35-41.

5. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М., 1980, 976 с.

**Influence of azimuthal deflection of ions on the beam shape of the engine with anode layer**

# 10, October 2012

DOI: 10.7463/1012.0483832

Duhopel'nikov V.V., Ivakhnenko S.G.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

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

The authors consider influence of azimuthal spin of ions on ion beam divergence in the engine with an anode layer. It is shown that the ion beam takes the form of a one-sheet hyperboloid. The authors obtained dependences describing the hyperboloid, bounding curves and asymptotes, depending on the geometry of the engine and the azimuthal deviation angle. Calculation results in the form of graphic dependencies are given.

Publications with keywords: [anode layer thruster](#), [ion stream](#), [azimuthal deviation](#), [one cavity hyperboloid](#)

Publications with words: [anode layer thruster](#), [ion stream](#), [azimuthal deviation](#), [one cavity hyperboloid](#)

## References

1. Gulczinski F.S., Gallimore A.D., Carlson D.O., Gilchrist B.E. *Impact of anode layer thruster plumes on satellite communications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. 8 p.

2. Grishin S.D., Leskov L.V. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 216 p.

3. Vorob'ev E.V., Duhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Marakhtanov M.K. Poteria tiagi v dvigateliakh s anodnym sloem za schet azimuthal'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.

4. Vorob'ev E.V., Duhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Khollovskii uskoritel' s fokusirovannym puchkom dlia

nanorazmernoj 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.

5. Bronshtein I. N., Semendiaev K. A. *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchaschikhsia VTUZov* [Handbook on mathematics for engineers and students of technical universities]. Moscow, Nauka, 1980. 976 p.