Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем

11, ноябрь 2012

DOI: 10.7463/1112.0483882

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

УДК 621.455.4

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

freeorion@yandex.ru

duh@power.bmstu.ru

mkm@power.bmstu.ru

evgsparrow@gmail.com

Введение

В работах [2, 3] было показано, что в двигателях с анодным слоем (ДАС) может проявляться эффект азимутального отклонения ионов под действием магнитного поля. Это явление может приводить к расхождению пучка двигателя, а также к уменьшению тягового КПД ДАС [1]. Ионный пучок имеет кольцевую форму. При этом расхождение пучка определяется рядом факторов: азимутальное отклонение ионов в магнитном поле, рассеяние ионов на нейтралах, диффузия в поперечном к оси пучка направлении и т.п.. Поэтому выделить вклад азимутального отклонения ионов в расхождение пучка за срезом ускорителя сложно, а обнаружить визуально практически невозможно.

Оборудование

Схема эксперимента, демонстрирующего эффект азимутального отклонения ионов, показана на рис. 1. В вакуумной камере был установлен ускоритель с анодным слоем 1, работавший на аргоне. Средний диаметр ускорительного канала составлял $D=100$ мм, ширина канала $h=5$ мм. На оси двигателя, на расстоянии 100 мм от среза, устанавливался металлический экран 2 с радиальной щелью шириной 3 мм, расположенной горизонтально, через которую в направлении мишени 3 пропусклась часть кольцевого ионного пучка 4. Ионы, проходящие через щель, образуют коллимированный пучок 5, уходящий в сторону мишени 3. Мишень 3 была сделана из силикатного стекла, закрепленного в оправке, и установлена на оптической скамье, расположенной параллельно оси ускорителя на расстоянии 300 мм от

среза. Под действием ионного пучка на поверхность стекла возникает характерное красное свечение, отмечая место положение точки попадания коллимированного пучка на мишень 6. Если ионы не имели бы азимутального отклонения, то ионный пучок, проходящий через щель, двигался бы по прямой 7 и падал на мишень в точке 8. При наличии азимутального отклонения ионов пучок 5 должен попадать на мишень в точке 6. Прямая 7 и пучок 5, при этом, будут образовывать угол α , равный углу азимутального отклонения ионов в канале ускорителя.

Рис. 1. Схема эксперимента. 1-ускоритель с анодным слоем; 2-металлический экран; 3-стеклянная мишень; 4-кольцевой ионный пучок; 5-коллимированный ионный пучок с азимутальным отклонением; 6-точка пересечения коллимированного ионного пучка и мишени; 7- траектория ионов без азимутального отклонения; 8- точка пересечения ионного пучка без азимутального отклонения и мишени.

Эксперимент

Ускоритель работал на аргоне при давлении в камере $5,1 \times 10^{-2}$ Па. Ускоряющее напряжение во всех экспериментах составляло $U=2,5$ кВ. Питание электромагнитной катушки обеспечивалось источником TES-42 в режиме стабилизации тока. При экспериментах максимальная величина индукции магнитного поля в канале составляла $B=0,13$ Тл.

Отклонение ионного пучка по вертикали (расстояние от точки 7 до точки 6) составило 11 мм вверх (рис. 2а), что соответствует углу азимутального поворота $\alpha=0,055$ рад или $\alpha \approx 3^\circ$. При изменении направления тока в электромагнитной системе и, соответственно, изменении направления магнитного поля в канале ускорителя, ионный пучок, выходящий из щели отклонился вниз (рис. 2б) на расстояние, также равное 11 мм.

а)

б)

Рис. 2. Фотография коллимированного ионного пучка при различной полярности магнитного поля: а) магнитное поле направлено от внутреннего к внешнему полюсу; б) магнитное поле направлено от внешнего к внутреннему полюсу

Обсуждение

Угол азимутального поворота ионов α может быть оценен по формуле, полученной в [2]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{ze}{2Am_p}} \sqrt{\frac{ze}{\varepsilon_i}} \int_{x_1}^{\infty} B_z dx \quad (1)$$

Где, B_z – радиальная составляющая индукции магнитного поля, ε_i – энергия иона, z – заряд иона, A – атомная масса иона, x_1 – координата рождения иона.

Средняя энергия ионов на выходе ускорителя равна $\varepsilon_i = (0,3 \dots 0,5)eU$. Измерение распределения индукции в канале показало, что интеграл в выражении (1) может быть принят равным:

$$\int_{x_1}^{\infty} B_z dx \sim 1,2 \dots 1,4 \times 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м}$$

Тогда, считая все ионы однозарядные, получаем:

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{1}{2 \times 40} \frac{1,6 \times 10^{-19}}{1,67 \times 10^{-27}}} \frac{(1,2 \dots 1,4) \times 10^{-3}}{\sqrt{(0,3 \dots 0,5) \times 2500}} \approx 0,037 \dots 0,056$$

И угол азимутального отклонения ионов α должен лежать в диапазоне:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} (0,037 \dots 0,056) \approx 2 \dots 3^\circ$$

Что соответствует результатам, полученным в эксперименте.

Выводы

Данный эксперимент наглядно демонстрирует явление азимутального отклонения ионов в радиальном магнитном поле в канале ускорителей с анодным слоем.

Теоретическая зависимость величины угла азимутального отклонения ионов магнитным полем хорошо подтверждается экспериментальными измерениями.

Список литературы

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

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. выпуск "Ионно-плазменные технологии".- С. 58-63.

3. Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Жуков А.В., Кириллов Д.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. выпуск "Ионно-плазменные технологии".- С. 35-41.

Experimental demonstration of azimuthal ion deviation effect in engines with anode layer

11, November 2012

DOI: [10.7463/1112.0483882](https://doi.org/10.7463/1112.0483882)

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

Russia, Bauman Moscow State Technical University

freeorion@yandex.ru

duh@power.bmstu.ru

mkm@power.bmstu.ru

evgsparrow@gmail.com

This article considers experimental demonstration of the effect of azimuthal ion deflection in the magnetic field. Deflection of a beam in the magnetic field of opposite polarity was shown. Theoretical dependences for values of an angle of azimuthal deviation obtained in the previous works were confirmed.

Publications with keywords: [magnet field](#), [anode layer thruster](#), [ion stream](#), [azimuthal deviation](#)
Publications with words: [magnet field](#), [anode layer thruster](#), [ion stream](#), [azimuthal deviation](#)

References

1. Grishin S.D., Leskov L.V. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 216 p.
2. Vorob'ev E.V., Dukhopel'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.
3. 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.