

УДК 621.455.4, 537.525, 537.534.74

Потеря тяги в двигателях с анодным слоем за счет азимутальной закрутки ионов

В.С. Булычев, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

С.Г. Ивахненко, аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: Д.В. Духопельников, к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

duh@power.bmstu.ru

Современный этап развития космической техники предполагает расширяющееся применение электроракетных двигателей (ЭРД) в составе двигательных установок для космических аппаратов. От других типов двигателей, ЭРД отличаются высоким значением средней скорости истечения рабочего тела и, соответственно, высоким удельным импульсом. Это повышает эффективность использования рабочего тела, что в ряде задач по коррекции параметров орбиты при больших сроках активного существования космических аппаратов дает заметную экономию массы рабочего тела и, соответственно, увеличивает выводимую полезную нагрузку.

Наибольшие успехи достигнуты в разработке и практическом применении электроракетных двигательных установок на базе ускорителей плазмы с замкнутым дрейфом электронов – холловских двигателей. По сравнению с другими типами ЭРД, холловские двигатели обладают рядом преимуществ. К их числу можно отнести конструктивную простоту, широкий диапазон изменения выходных параметров для выполнения различных задач, хорошие массогабаритные показатели при сравнительно высокой эффективности. Основным рабочим телом в таких двигателях является ксенон, объемы производства и запасы которого ограничены, что служит причиной поиска новых

рабочих веществ, более распространенных и дешевых. Возможно использование неона, криптона, йода, висмута, аргона. Однако использование этих веществ приводит к существенному снижению энергетических характеристик холловских двигателей. Для повышения эффективности двигательных установок нужно искать и устранять причины потери удельного импульса.

В электроракетных двигателях удельный импульс характеризуется тяговым коэффициентом полезного действия (КПД) [1]. Обычно, при рассмотрении динамики движения ионов, их траектории считаются прямыми линиями, параллельными образующим канала. Учет азимутального движения ионов позволяет раскрыть и проанализировать одну из причин потерь удельного импульса. В данной работе рассматривается влияние азимутальной закрутки ионов рабочего вещества в ускорительном канале на снижение тягового КПД в двигателях с анодным слоем.

В двигателях с анодным слоем реализован принцип бездиссипативного ускорения ионов самосогласованным электромагнитным полем [1]. Ускорительным каналом в этих двигателях служит кольцевой зазор между полюсами магнитной системы 3, 4 (рис.1), ограниченный с одной стороны анодом 1. 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 .

Считается, что ионы не испытывают воздействия магнитного поля. На самом деле магнитное поле действует и на ионы, отклоняя их в ту же сторону, что и электроны (рис.1), но ввиду значительной массы иона это отклонение мало. Появление азимутальной составляющей скорости V_y у ионов в большинстве случаев оставалось без рассмотрения. Однако, анализ азимутального отклонения ионов показывает, что это явление может оказывать значительное влияние на форму ионного пучка и энергетические потери.

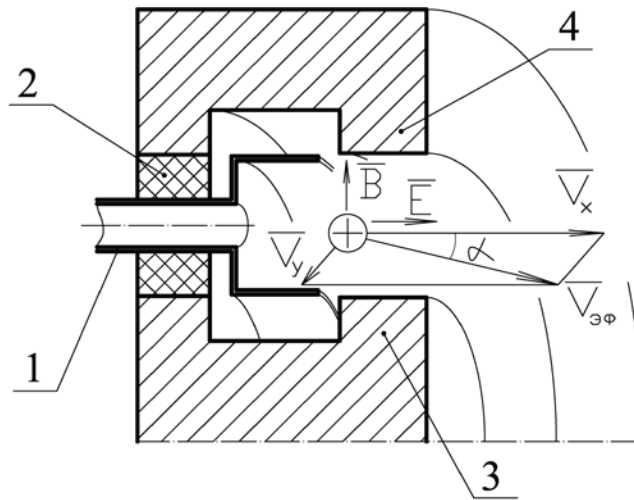


Рис. 1. Схема движения иона в ускорительном канале двигателя с анодным слоем:

1 - анод; 2 – изолятор; 3 – внутренний полюс; 4 – внешний полюс

Потеря тяги двигателя за счет азимутальной закрутки ионов η_α впервые было описано в [1], а ее влияние на работу технологического источника ионов на основе ускорителя с анодным слоем также было отмечено в [2]. В работах [3–7] описано негативное влияние азимутальной закрутки ионов на фокусировку ионного пучка в технологических ускорителях.

Потери тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α определяются соотношением между осевой скоростью V_x , участвующей в создании тяги и эффективной скоростью $V_{эф}$, полученной ионом в электрическом поле.

$$\eta_\alpha = \frac{V_x^2}{V_{эф}^2} = \frac{V_x^2}{V_x^2 + (V_x \sin \alpha)^2} = \frac{1}{1 + (\sin \alpha)^2} \approx \frac{1}{1 + \alpha^2} \quad (1)$$

где: α – угол поворота иона на выходе из ускорительного канала, где электрическое поле E практически равно нулю.

Движение иона в канале ускорителя в скрещенных E и B полях описывается системой уравнений:

$$M \frac{dV_x}{dt} = q(E - V_y B) \quad (2)$$

$$M \frac{dV_y}{dt} = qV_x B \quad (3)$$

Из уравнения (3), меняя переменную дифференцирования, получаем:

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

$$M \frac{dV_y}{dx} = qB \quad (4)$$

Интегрируем (4) при условии $x=0$; $V_y=0$:

$$V_y = \frac{q}{M} \int_0^{\infty} B dx \quad (5)$$

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

$$\alpha = \frac{V_y}{V_{эф}} = \left(\frac{2qU}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{q}{M} \int_0^{\infty} B dx = \left(\frac{q}{2MU} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} B dx \quad (6)$$

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 оценки величины интеграла (5) рассмотрим распределение радиальной составляющей поля B вдоль оси канала ускорителя x (рис.2).

Внутри ускорительного канала будем считать, что величина индукции магнитного поля B практически постоянна и равна значению радиальной составляющей магнитного поля на срезе ускорительного канала B_0 . Как показали численные расчеты и измерения на модельных магнитопроводах, за срезом ускорительного канала вдоль оси x радиальная составляющая поля B спадает по экспоненциальному закону, вид которого от длины канала практически не зависит:

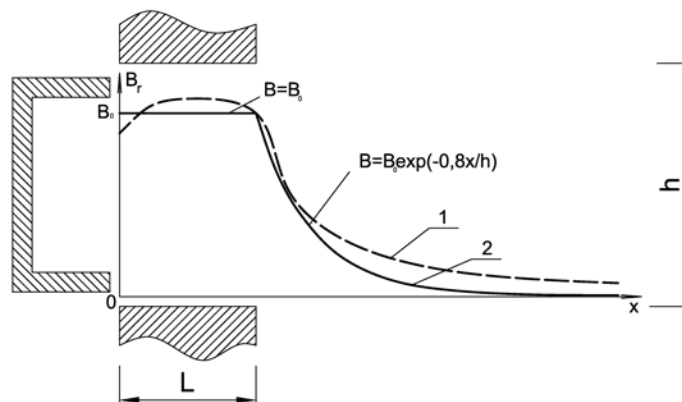


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей поля B вдоль оси ускорительного канала x : 1 – экспериментальное распределение; 2 – аппроксимирующая кривая

$$B = B_0 \exp(-0,8x/h) \quad (7)$$

где: B_0 - величина радиальной составляющей поля на срезе магнитной системы ($x=0$); h – ширина зазора между полюсами магнитной системы.

Тогда величину интеграла (5) можно оценить как:

$$\int_0^{\infty} B dx = B_0 l + \int_l^{\infty} B_0 \exp(-0,8(x-l)/h) dx = B_0(l + 1,25h) \quad (8)$$

Из (1) подставляя (8) и (6) получим выражение для потери тяги двигателя η_α за счет азимутальной закрутки ионов:

$$\eta_\alpha = \frac{1}{1 + \alpha^2} = \frac{1}{1 + (qB_0^2(l + 1,25h)^2 / 2MU)} \quad (9)$$

Как видно из (9) к росту потерь приводит увеличение геометрических размеров магнитопровода, увеличение значения радиальной составляющей магнитного поля B_0 в ускорительном канале, увеличение заряда иона q и снижение массы иона M и ускоряющего напряжения U .

На рис.3 представлены результаты расчета потерь тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α для различных рабочих веществ и ускоряющих напряжениях U . Расчет производился при следующих размерах ускорительного канала (ширина зазора между полюсами магнитной системы $h=15$ мм, длина ускорительного канала $l=10$ мм) и величине радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале $B_0=0,1$ Тл. Считалось, что ион приобретает энергию равную $\varepsilon_i=qU$.

На рис.4–7 представлены результаты расчета потерь тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α для Ar при различных ускоряющих напряжениях U в зависимости от геометрических размеров поперечного сечения магнитопровода, магнитного поля в ускорительном канале, заряда иона и массы иона.

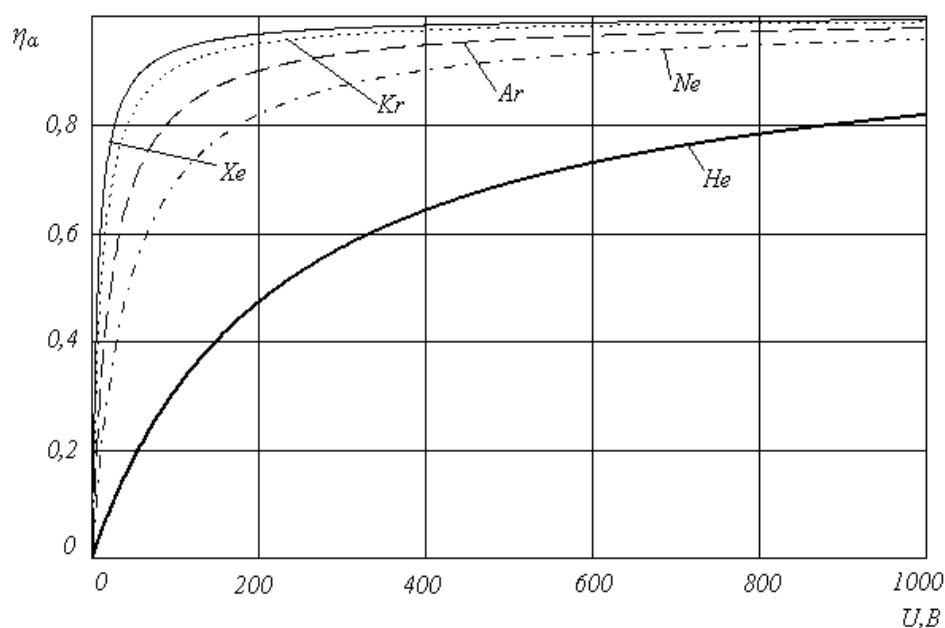


Рис. 3. Потери тяги за счет азимутальной закрутки однозарядных ионов η_α . Длина ускоряющего канала $l=10$ мм, ширина межполюсного зазора $h=15$ мм, величина радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале $B_0=0,15$ Тл.

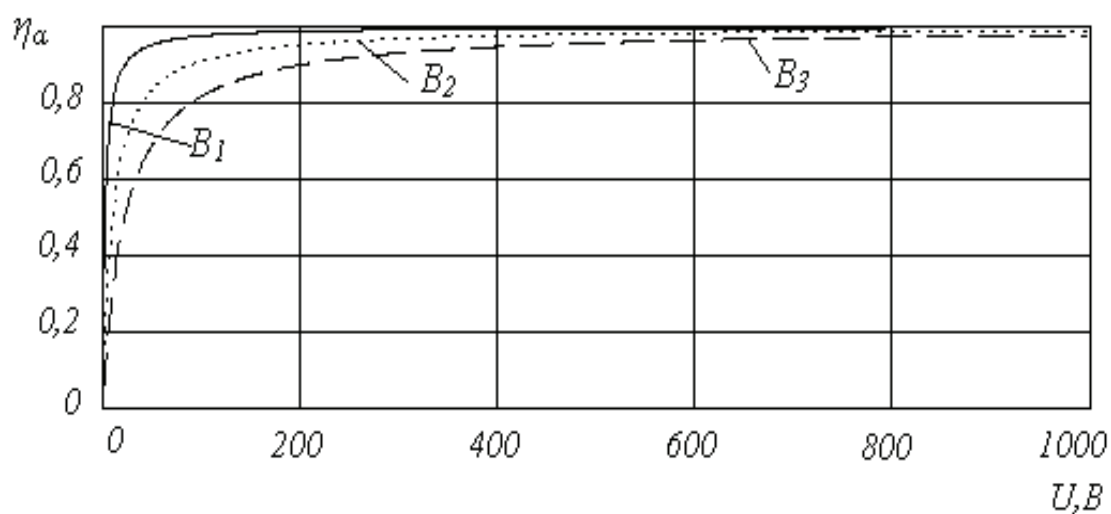


Рис. 4. Потери тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α при различных величинах радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале: $B_1=0,05$ Тл; $B_2=0,1$ Тл; $B_3=0,15$ Тл. Длина ускоряющего канала $l=10$ мм, ширина межполюсного зазора $h=15$ мм

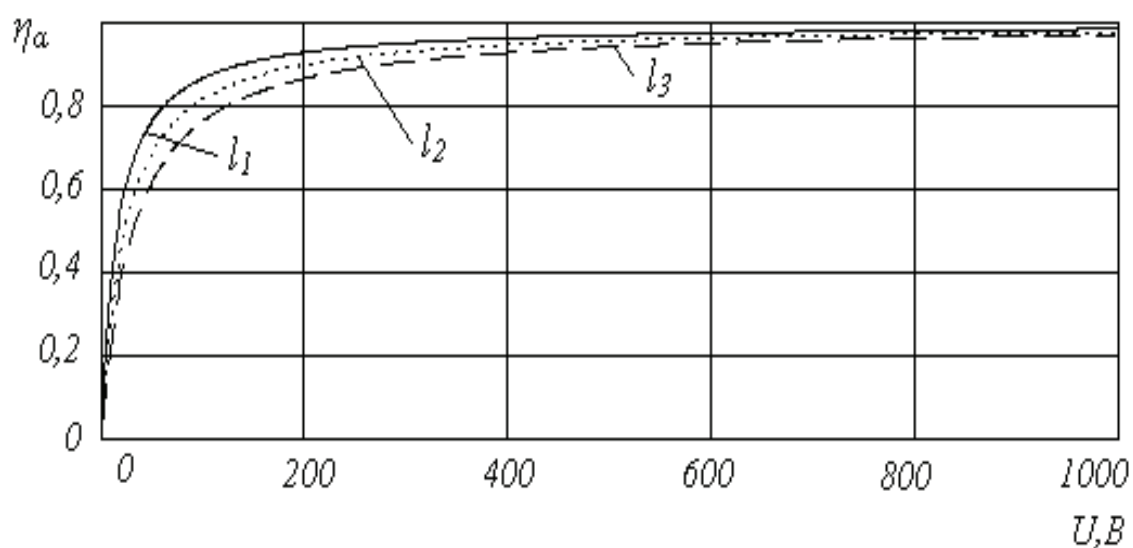


Рис. 5. Потери тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α при различных значениях длины ускоряющего канала: $l_1=5$ мм; $l_2=10$ мм; $l_3=15$ мм. Ширина межполюсного зазора $h=15$ мм, величина радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале $B_0=0,15$ Тл

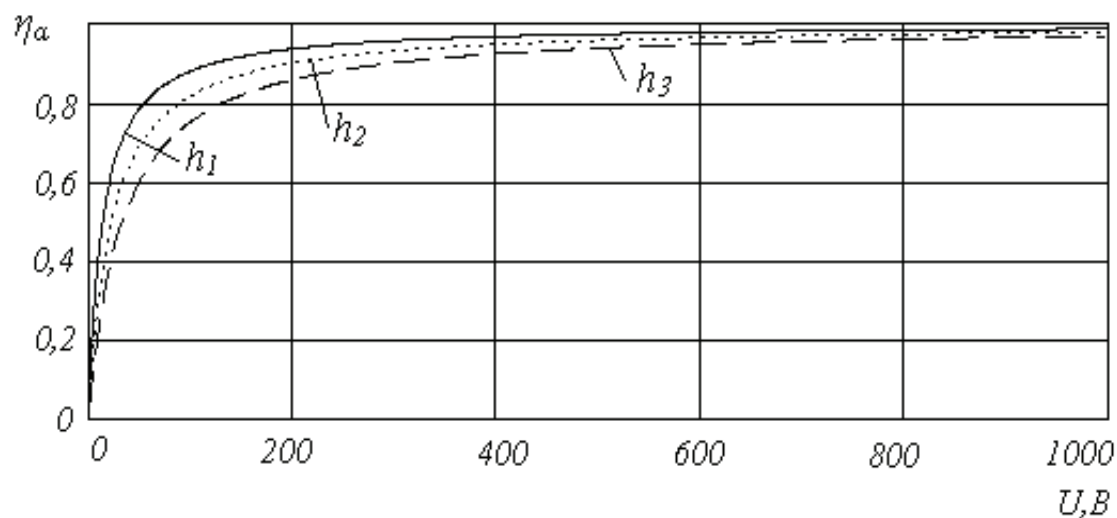


Рис. 6. Потери тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α при различных значениях ширины межполюсного зазора: $h_1=10$ мм; $h_2=15$ мм; $h_3=20$ мм. Длина ускоряющего канала $l=10$ мм, величина радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале $B_0=0,15$ Тл

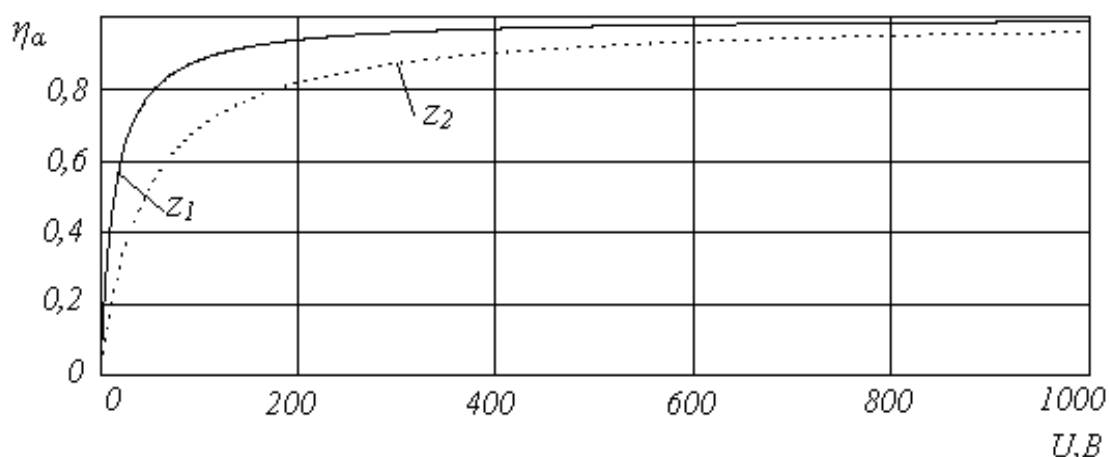


Рис. 7. Потери тяги за счет азимутальной закрутки ионов η_α при различных значениях кратности заряда ионов: $z_1=1$; $z_2=2$. Длина ускоряющего канала $l=10$ мм, ширина межполюсного зазора $h=15$ мм, величина радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале $B_\theta=0,15$ Тл

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что к росту потерь тяги двигателя за счет азимутальной закрутки ионов приводит увеличение геометрических размеров поперечного сечения магнитопровода, увеличение значения магнитного поля в ускорительном канале, увеличение заряда иона, снижение массы иона и снижение ускоряющего напряжения. Для работы на легких газах необходимо снижать геометрические размеры поперечного сечения канала, обеспечивать режим работы при пониженных величинах магнитного поля в канале и повышенных ускоряющих напряжениях.

Список литературы

1. С.Д. Гришин, Л.В. Лесков. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов // – М.: Машиностроение, 1989. – 216 с.
2. В. Ланин, Е. Телеш. Пайка ионным лучом в вакууме // Технологии в электронной промышленности, № 7, 2007 г. 64–68 с.
3. Bizyukov A.A. and others – Hall ion source with ballistic and magnetic beam focusing // problems of atomic science and technology, 2008, № 6. Series: Plasma Physics (14), p. 174–176.
4. Потеря тяги в двигателях с анодным слоем за счет азимутальной закрутки ионов. // С.Г. Ивахненко, [и др.] Вестник Московского государственного технического

- университета им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2011. Специальный выпуск "Ионно-плазменные технологии". – С. 58-63.
5. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов. // Е.В. Воробьев [и др.] Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2011. Специальный выпуск "Ионно-плазменные технологии". – С. 35-41.
 6. Экспериментальная демонстрация эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем // С.Г. Ивахненко [и др.] «Наука и образование», эл. изд., №10, 2012.
 7. Д.В. Духопельников, С.Г. Ивахненко. Анализ влияния азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем // «Наука и образование», эл. изд., №11, 2012.