2030770

УДК 621.455.4, 537.525, 537.534.74
На правах рукописи

Ивахненко Сергей Геннадьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА АЗИМУТАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ИОНОВ В ДВИГАТЕЛЯХ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА – 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор, М.К. Марахтанов
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор, В.П. Ким
	кандидат технических наук, Твердохлебова Е.М.
Ведущая организация	ОАО РКК «Энергия» (г. Королев)

Защита состоится "__16__" _октября___2013 г. в __16-00__ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.08 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1, корп. «Энергомашиностроение».
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1. МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.08.

Автореферат разослан ___ _____20__ г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2030770
Иванченко С.Г. Исследовані

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Двигатели с азимутальным дрейфом электронов широко используются для коррекции орбиты спутников, а также для маршевых операций по изменению высоты и формы орбиты. Характерной чертой таких устройств является азимутальное отклонение ионов от оси ускорительного канала при движении ионов в поперечном магнитном поле. Азимутальное отклонение ионов порождает несколько технических проблем в двигателях с замкнутым дрейфом электронов:

— снижение тяговой эффективности вследствие расхождения ионного пучка, которая будет существенной для двигателей с низкой плотностью ионного пучка, в том числе микродвигателей для исследовательских космических аппаратов;

— возникновение момента вращения космического аппарата.

Величина азимутального отклонения определяется массой иона, распределением электрического и магнитного полей, а также параметрами плазмы в канале двигателя. Сказанное дает возможность использовать эффект азимутального отклонения ионов для разработки новых способов диагностики двигателей с разрядом в E×B полях. Ранее использование этого эффекта для диагностики плазмы двигателей с азимутальным дрейфом не упоминалось. Основным преимуществом таких методов будет являться то, что диагностическое оборудование не будет влиять на физические процессы в разряде, в отличие от зондовых методов.

Цель работы:

— теоретическое и экспериментальное исследование азимутального отклонения ионов в двигателях с замкнутым дрейфом электронов, оценка влияния азимутального отклонения ионов в двигателе с замкнутым дрейфом на баллистику космического аппарата.

Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются:

— получение теоретических зависимостей для оценки азимутального отклонения ионов в двигателях с замкнутым дрейфом электронов;

— определение максимальных углов азимутального отклонения ионов на выходе из ускорительного канала для различных рабочих веществ, напряжений разряда и индукции магнитного поля;

— проведение экспериментальных измерений азимутального отклонения ионов на выходе из ускорительного канала;

— проведение экспериментальных измерений функции распределения ионов электростатическим многосеточным зондом;

— проведение экспериментальных измерений наиболее вероятной энергии ионов в пучке путем определения углового распределения азимутального отклонения ионов.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспечивается использованием адекватных физико-математических моделей

М Г Т У
им Н Э Баумана
Библиотека

и сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными. Достоверность экспериментальных исследований гарантируется применением современных и хорошо апробированных методом и методик.

Научная новизна:

1) впервые предложена теоретическая модель азимутального отклонения ионов в двигателях с азимутальным дрейфом электронов с низкой плотностью ионного потока с учетом распределения параметров плазмы в ускорительном канале;

2) впервые проведен анализ углов азимутального отклонения ионного потока в двигателе для веществ с диапазоном атомных масс от 4 а.е.м. (гелий) от 131 а.е.м. (ксенон);

3) разработан и реализован новый метод измерения азимутального отклонения ионов в двигателях с замкнутым дрейфом;

4) впервые показано, что эффект азимутального отклонения ионов может влиять на баллистику космического аппарата;

5) впервые выявлен эффект углового разложения пучка ионов двигателя с замкнутым дрейфом при прохождении тонкой щели;

6) разработана новая методика наиболее вероятной энергии ионов в пучке по измеренному распределению угла азимутального отклонения на срезе ускорительного канала;

7) разработана новая методика определения распределения потенциала плазмы в разрядном промежутке по измеренному распределению угла азимутального отклонения на срезе ускорительного канала;

8) разработана новая методика определения положения анодного слоя в канале двигателя по измеренному распределению угла азимутального отклонения на срезе ускорительного канала.

Практическая значимость результатов работы:

— получен новый метод диагностики параметров газового разряда в скрещенных E×B полях, не вносящий возмущения в разрядный промежуток;

— полученные теоретические результаты могут быть использованы при проектировании новых двигателей с замкнутым дрейфом электронов;

— полученные соотношения позволят оценивать влияние азимутального отклонения ионов на собственное вращение космического аппарата и тяговую эффективность двигателя.

Личное участие автора

Представленные результаты получены автором лично или при его участии. Автором проведены все описанные в работе эксперименты: измерение азимутального отклонения ионов, измерение функции распределения ионов по энергиям, демонстрация эффекта азимутального отклонения ионов, измерение удельного магнитного потока. Автором работы проведены теоретические исследования связи распределения удельного магнитного потока с распределением потенциала плазмы в канале, теоретические исследования величины угла азимутального отклонения, разработаны теоретические основы методик диагностики разряда в

скрещенных E×B полях, не вносящей возмущения в разрядный промежуток.

На защиту выносятся:

1) результаты теоретических исследований азимутального отклонения ионов в двигателях с замкнутым дрейфом с низкой плотностью ионного потока;

2) результаты теоретических исследований зависимости распределения потенциала плазмы от распределения удельного магнитного потока в канале двигателя;

3) результаты экспериментальных исследований азимутального отклонения ионов;

4) результаты экспериментальных исследований функции распределения ионов по энергиям электростатическим многосеточным зондом на срезе ускорительного канала;

5) основы методики экспериментальных исследований наиболее вероятной энергии ионов в пучке по угловому распределению азимутального отклонения ионов в ускорительном канале.

6) методика определения распределения потенциала плазмы в разрядном промежутке по измеренному распределению угла азимутального отклонения на срезе ускорительного канала;

7) методика определения положения анодного слоя в канале двигателя по измеренному распределению угла азимутального отклонения на срезе ускорительного канала.

Апробация работы

Основные результаты и положения докладывались:

1. 6-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2011г.
2. Международный научно-технический семинар «Электровакуумная техника и технология», Москва, 2012 г.

Результаты проведенных исследований опубликованы в 6-ти печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов, содержит 158 стр. текста, 8 таблиц и 101 рисунок. Список литературы включает 129 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрена история создания двигателей с замкнутым дрейфом различных типов. Приведено описание основных методик диагностики двигателей и их недостатки. Описан один из недостатков двигателя – эффект азимутального отклонения ионов при движении в ускорительном канале в поперечном магнитном поле. Отмечена недостаточная

изученность этого явления и его прикладного значения. Показано, что на величину угла азимутального отклонения оказывают влияние атомная масса рабочего вещества, скорость истечения, индукция магнитного поля и заряд ионов.

Отмечено, что угол отклонения иона определяется характеристиками разряда в точке его рождения, поэтому измерение угла азимутального отклонения ионов за срезом ускорительного канала позволяет оценить параметры разряда в точке ионизации. При этом основным преимуществом такой методики будет отсутствие влияния диагностического оборудования на характеристики разряда. Описана схема эксперимента, позволяющего оценить действие азимутального отклонения на форму пучка двигателя и представлены его результаты.

Показано, что к увеличению угла азимутального отклонения ионов в двигателях с замкнутым дрейфом может привести переход на альтернативные рабочие вещества с меньшей атомной массой, а также использование рабочих режимов с низкими скоростями истечения (напряжениями разряда) или повышенными значениями индукции магнитного поля. Обозначены схемы двигателей с замкнутым дрейфом, в которых эффект азимутального отклонения будет существенно влиять на формирование ионного пучка:

1. Микродвигатели с низкой плотностью ионного пучка, предназначенные для автоматических космических аппаратов (исследования гравитационного и магнитного поля, моделирование физических процессов в условиях невесомости, получение сверхчистых материалов).

2. Технологические ускорители ионов на основе схемы двигателя с замкнутым дрейфом.

В **главе 2** приведен анализ динамики движения иона в скрещенных электрическом и магнитном полях. Было показано, что угол азимутального отклонения иона α определяется следующим выражением:

$$\alpha \approx tg\alpha = 6{,}9 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{z}{\varepsilon A}} \int_{x_1}^{\infty} B_z dx = 6{,}9 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{z}{\varepsilon A}} \Omega \qquad (1)$$

где: ε – энергия иона, эВ; z – кратность заряда иона; A – масса иона, а.е.м.

Предложена величина удельного магнитного потока Ω, которая имеет размерность Тл·м и является площадью под графиком распределения радиальной составляющей индукции магнитного поля B_z вдоль ускорительного канала (рис. 3).

Из полученного соотношения следует, что угол азимутального отклонения зависит от массы и заряда иона, а также от удельного магнитного потока и потенциала плазмы относительно катода в точке его рождения.

Показано, что моноэнергетический кольцевой ионный пучок низкой плотности будет иметь за срезом двигателя форму однополостного гиперболоида, ось которого совпадает с осью двигателя, а величина «расхождения» определяется углом α_{mid} азимутального отклонения.

Показано, что из-за наличия азимутального отклонения, часть силы тяги F, создаваемой двигателем, будет создавать вращательный момент M_K на среднем диаметре ускорительного канала D. При этом угловое ускорение φ_a аппарата можно оценить из выражения:

$$\varphi_a = \frac{FD}{M_a R_a^2} \sin\alpha ,$$

где M_a и R_a – масса и радиус космического аппарата.

Центростремительное ускорение на периферии космического аппарата, которое сообщается ему азимутальной закруткой пучка, будет равно:

$$a_n = \frac{10^{14}}{R_a^3} \left(\frac{FDt}{M_a} \frac{\Omega_{mid}}{A\, I_{sp}} \right)^2$$

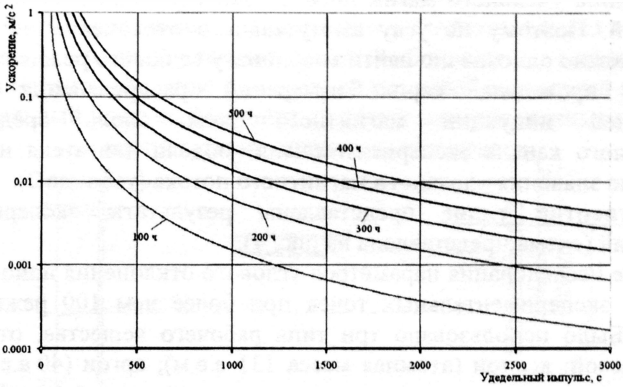


Рис. 1. Зависимость центростремительного ускорения космического аппарата от удельного импульса для различных времен работ двигателя; рабочее вещество – ксенон; тяга двигателя – 10 мН M_a=1 т; и R_a=1 м.

В **третьей главе** показано, что величина удельного магнитного потока может быть определена как отношение полного магнитного потока Ф, генерируемого магнитной системой к длине средней линии (длине окружности) ускорительного канала. Однако при своем движении ион пересекает только часть магнитного потока, генерируемого магнитной системой:

$$\Omega(x) = \int_x^\infty B_z dx = \frac{\Phi_x(x)}{\pi D},$$

где x – координата точки рождения частицы.

Автором предложены четыре контрольных значения $\Omega(x)$ (таблица 1), которые определяются только конструкцией двигателя и геометрией канала.

Таблица 1.

Контрольные значения удельного магнитного потока

Полный уд. магн. поток (рис. 3а)	Максимальный уд. магн. поток (рис. 3б)	Средний уд. магн. поток (рис. 3в)	Минимальный уд. магн. поток (рис. 3г)
$\Omega_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{\infty} B_z dx \approx \approx \frac{\Phi}{\pi D}$	$\Omega_{max} = \int_{x_a}^{\infty} B_z dx$, где x_a – координата анода.	$\Omega_{mid} = \int_{L/2}^{\infty} B_z dx \approx \frac{\Phi_{\Sigma}}{2\pi D}$ где L – длина ускорительного канала	$\Omega_{min} = \int_{L}^{\infty} B_z dx \approx B_{cp}\Delta$, где B_{cp} – индукция магнитного поля на срезе двигателя, Δ – ширина канала

Величина удельного магнитного потока $\Omega(x)$ однозначно определяется координатой. Поэтому по углу азимутального отклонения иона за срезом двигателя можно однозначно найти координату точки его рождения.

Была проведена серия измерений распределения радиальной составляющей индукции магнитного поля вдоль средней линии ускорительного канала экспериментальной модели двигателя и рассчитаны контрольные значения удельного магнитного потока (таблица 2).

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований (схема представлена на рис. 4).

В ходе исследования параметров углового отклонения ионов было снято более 2000 экспериментальных точек при более чем 100 режимах работы двигателя. Было использовано три типа рабочего вещества, отличающихся атомной массой: ксенон (атомная масса 131 а.е.м); аргон (40 а.е.м); гелий (4 а.е.м). Ток в магнитных катушках двигателя изменялся от 1,5 до 4,5 А с шагом 0,5 А, что соответствует максимальной индукции магнитного поля от 79 до 194 мТл. Напряжение разряда от 500 до 3000 В с шагом 500 В. Для каждого режима измерялись: функция распределения ионов по энергиям в пучке, распределение ионного тока по 10 зондам датчика.

Таблица 2.

Результаты экспериментального измерения удельных потоков $\Omega(x)$

№	I, A	$\Omega_{max} \times 10^{-3}, Тл \cdot м$	$\Omega_{mid} \times 10^{-3}, Тл \cdot м$	$\Omega_{min} \times 10^{-3}, Тл \cdot м$
1	4,5	2,07	1,47	1,00
2	4,0	1,90	1,32	0,90
3	3,5	1,70	1,17	0,80
4	3,0	1,50	1,01	0,70
5	2,5	1,30	0,85	0,58
6	2,0	1,05	0,68	0,46
7	1,5	0,75	0,50	0,31

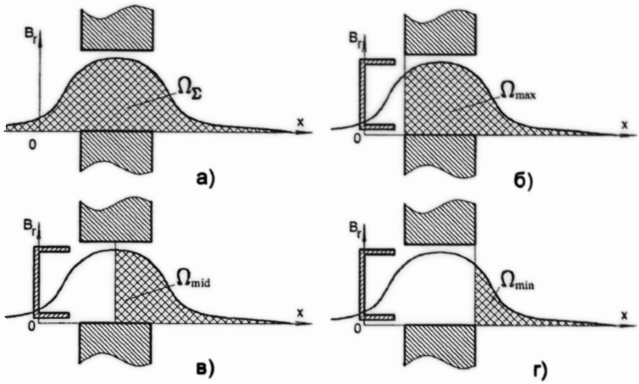


Рис. 3. Схемы составляющих удельного магнитного потока в канале двигателя: *а* — полный удельный магнитный поток; *б* — максимальный удельный магнитный поток; *в* — средний удельный магнитный поток; *г* — минимальный удельный магнитный поток; заштрихованные площади соответствуют значениям интегралов

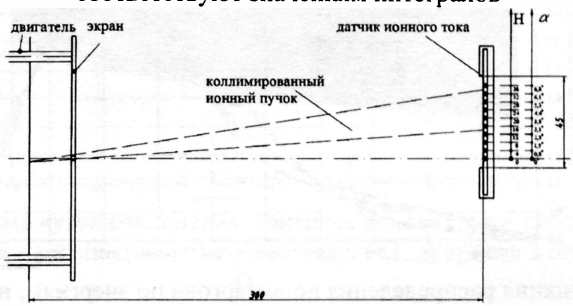


Рис. 4. Схема измерения углового отклонения пробного ионного пучка

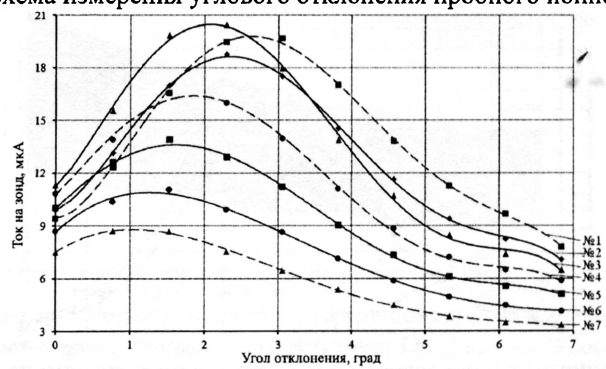


Рис. 5. Зависимости углового распределения ионного тока на зондах Фарадея при ускоряющем напряжении 3 000 В и токах электромагнитной катушки от 1,5 до 4,5 А; рабочее вещество – аргон

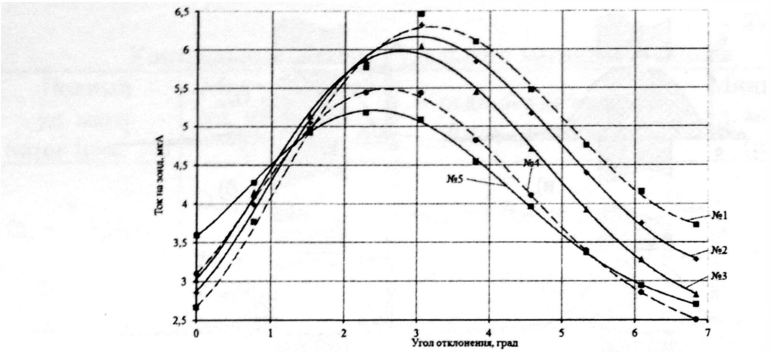


Рис. 6. Зависимости углового распределения ионного тока на зондах Фарадея при ускоряющем напряжении 1 500 В и токах электромагнитной катушки от 2,0 до 4,5 А; рабочее вещество – аргон

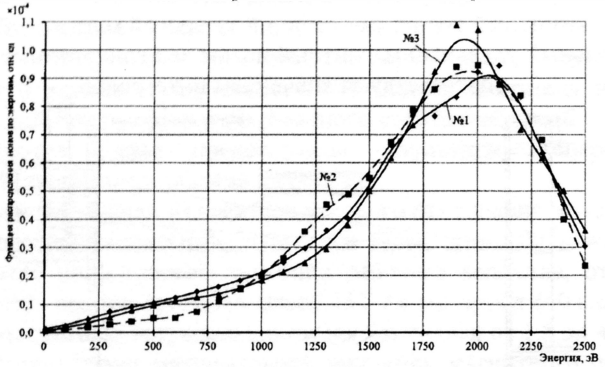


Рис. 7. Функция распределения ионов аргона по энергиям; напряжение разряда 3 000 В; ток в магнитной катушке изменяется от 3,5 до 4,5 А

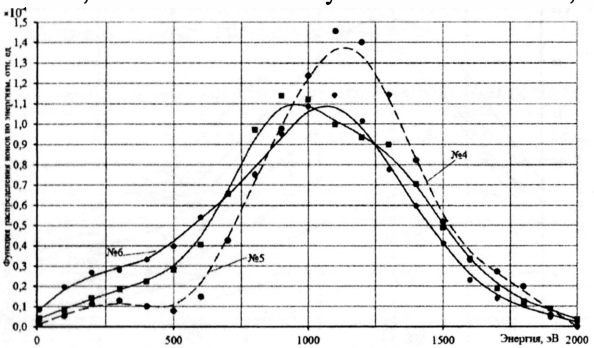


Рис. 8. Функция распределения ионов аргона по энергиям; напряжение разряда 1 500 В; ток в магнитной катушке изменяется от 1,5 до 3,0 А

Для интерпретации результатов эксперимента автором были предложены специальные «диаграммы отклонений» (рис. 9–11). Они

представляют собой графики, у которых по оси ординат отложено угловое отклонение ионов, выраженное в градусах, а по оси абсцисс – энергия ионов, выраженная в эВ. На эти графики были нанесены кривые предельного углового отклонения ионов для значений Ω_{max} и Ω_{min}, соответствующие выражению:

$$\alpha(\varepsilon) = arctg\left(\frac{6{,}9\cdot 10^3\Omega}{\sqrt{\varepsilon A}}\right)$$

Верхний график $\alpha(\varepsilon)=f(\varepsilon,\Omega)$ соответствует Ω_{max} и показывает, на какой угол будут отклоняться ионы, рожденные у анода. Нижний график $\alpha(\varepsilon)=f(\varepsilon,\Omega)$ соответствует Ω_{min} и показывает, на какой угол будут отклоняться ионы, рожденные на срезе канала. Если ион рождается в промежутке между анодом и срезом канала, то точка, соответствующая энергии и углу отклонения этого иона на диаграмме будет лежать в промежутке между этими двумя графиками.

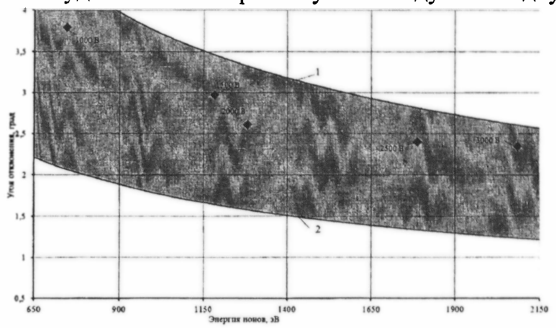


Рис. 9. Диаграмма «угол отклонения – энергия ионов», ток в катушке – 4 А; рабочее вещество – аргон; кривая 1 соответствует Ω_{max}; кривая 2 соответствует Ω_{min}

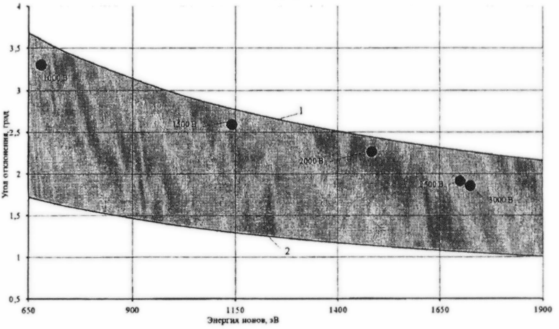


Рис. 10. Диаграмма «угол отклонения – энергия ионов», ток в катушке – 3 А; рабочее вещество – аргон; кривая 1 соответствует Ω_{max}; кривая 2 соответствует Ω_{min}

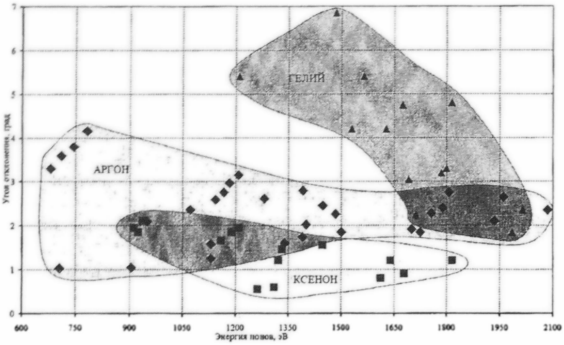


Рис. 11. Обобщающая диаграмма «угол отклонения – энергия» для аргона (◆), ксенона (■), гелия (▲)

На данных диаграммах были отложены точки, соответствующие максимумам распределения ионного тока и функции распределения по энергиям. Если такая точка попадает на кривую, соответствующую Ω_{max}, то это означает, что пик ионизации, а, следовательно, и анодный слой, максимально приближен к аноду. Если же точка располагается в области кривой, соответствующей Ω_{min}, то это означает, что анодный слой расположен около среза двигателя.

В **пятой главе** на основе интегрирования обобщенного закона Ома было получено соотношение, связывающее распределение потенциала плазмы с распределением удельного магнитного потока:

$$\varphi(x) = \varphi_0 \left(\left(\frac{\Omega(x) - \Omega_{fr}}{\Omega_0} + 1 \right)^2 - 1 \right), \qquad (2)$$

где введены параметры:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{4\varphi_0 m_e t \delta}{e}}\ ; \qquad t = \left(\frac{1}{ba} - 1 \right); \qquad \varphi_0 = \frac{3I}{ba},$$

здесь a, δ, b – коэффициенты пропорциональности, I – потенциал ионизации.

На основе полученных выражений автором были предложены методики диагностики параметров разряда в скрещенных полях путем измерения угла азимутального отклонения ионного потока.

1. Методика определения наиболее вероятной энергии ионов в пучке.

При установке щелевого экрана, ионный пучок, проходящий через него, расслаивается по углам в соответствии с энергетическим спектром. Этот эффект позволяет использовать его для диагностики энергетических параметров ионного пучка двигателя.

Было получено соотношение, связывающее наиболее вероятную энергию ионов с максимальным углом азимутального отклонения:

$$\varepsilon_{вер} = \frac{e}{2 m_p A} \left(\frac{\Omega_{AC}}{tg\alpha_{вер}} \right)^2,$$

где Ω_{AC} – средний удельный магнитный поток в области, занятой анодным слоем, $\alpha_{вер}$ – угол отклонения, соответствующий наибольшему ионному току, $\varepsilon_{вер}$ – энергия соответствующая наибольшему ионному току.

Алгоритм определения наиболее вероятной энергии ионов $\varepsilon_{вер}$ представлен на рис. 13. После установки датчика ионного тока, содержащего десять зондов, и щелевого экрана измеряются ионные токи на каждый зонд. По распределению ионного тока между датчиками определяется значение угла, соответствующее максимуму ионного тока. Затем вычисляется значение $\varepsilon_{вер}$ наиболее вероятной энергии ионов.

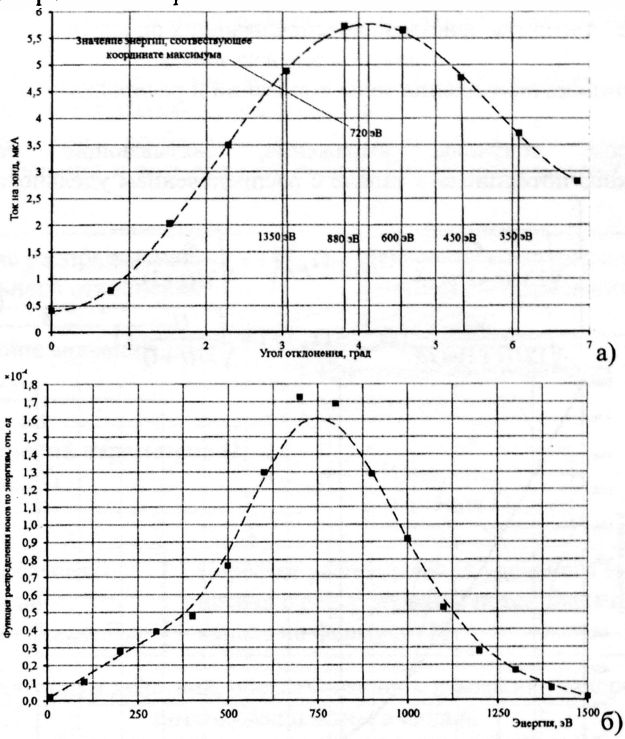


Рис. 12. Соответствие углов отклонений энергии ионов; рабочее вещество – аргон; напряжение разряда – 1000 В; ток в электромагнитной катушке – 4,5 А (№ 1); а) распределение ионного тока по зондам; б) функция распределения ионов по энергиям

Возможности предложенного метода не ограничиваются определением наиболее вероятного значения энергии ионов. Он может быть использован для определения функции распределения ионов по энергиям при дальнейшей модернизации диагностической оснастки и метода обработки результатов эксперимента (учет электронного тока, вторичной эмиссии и т.д.).



Рис. 13. Алгоритм действий, обеспечивающих определение наиболее вероятной энергии ионов

2. Методика нахождения зоны ионизации и распределения потенциала в канале.

Автором получены выражения, связывающие распределение электрического потенциала в канале с распределением удельного магнитного потока:

$$\begin{cases} \sqrt{\dfrac{e}{12I(t+1)m_e t\delta}}\left(\Omega_{kont}-\Omega_{fr}\right)+1=\sqrt{\dfrac{\varepsilon_{kont}}{3I(t+1)}+1} \\ \sqrt{\dfrac{e}{12I(t+1)m_e t\delta}}\left(\Omega_{\max}-\Omega_{fr}\right)+1=\sqrt{\dfrac{U}{3I(t+1)}+1} \end{cases}, \qquad (3)$$

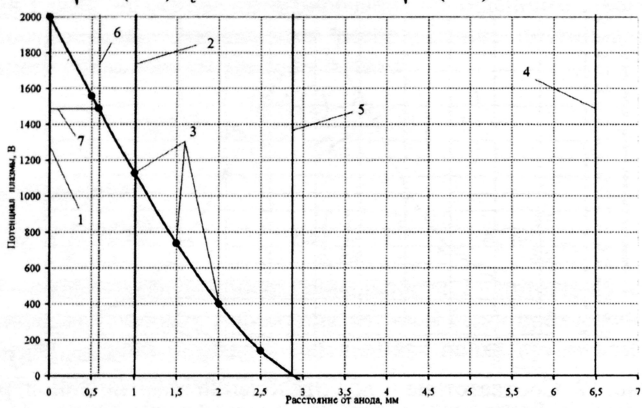


Рис. 14. Экспериментальная зависимость изменения потенциала плазмы в канале двигателя; ток в магнитной катушке – 3 А, напряжение разряда – 2000 В; рабочее вещество – аргон; *1* – положение анода; *2* – левая граница магнитных полюсов; *3* – измеренные значения потенциала; *4* – срез двигателя (правая граница полюсов); *5* – низковольтная граница разряда; *6* – зона максимума ионизации; *7* – контрольное значение энергии

После получения углового распределения ионного тока и функции распределения ионов по энергиям определяется значение угла, соответствующее максимуму ионного тока, а также соответствующие ему

значения энергии ε_{kont} и Ω_{kont}. После измерения распределения удельного магнитного потока находится значение Ω_{max}. Затем по зависимостям (3) определяются значения параметров Ω_{fr} (значение удельного магнитного потока на низковольтной границе слоя) и t. Затем осуществляется пересчет распределения удельного магнитного потока в распределение потенциала плазмы в канале по формуле (2).

Предложенные методики диагностики энергетических параметров пучка и нахождения зоны ионизации и распределения потенциала в канале обладают следующими достоинствами:

— диагностическое оборудование не оказывает влияние на параметры газового разряда;

— простота конструкции диагностического оборудования;

— простота математического аппарата;

— отсутствие необходимости в использовании высоковольтных источников питания и возможность работы без дополнительных источников питания.

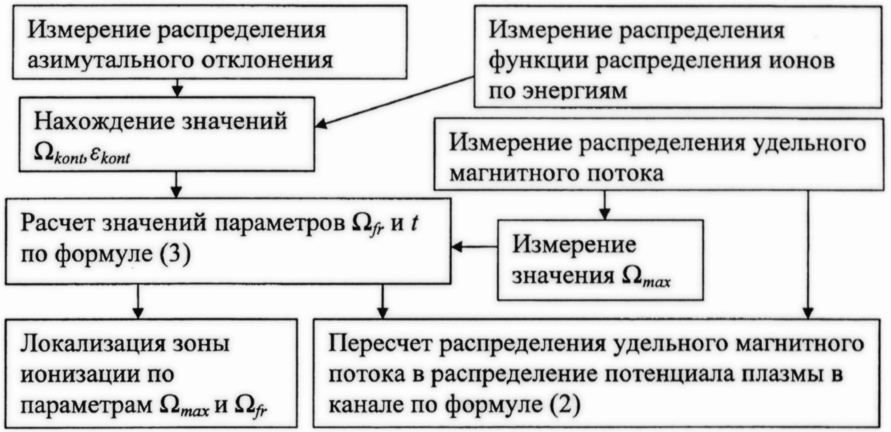


Рис. 15 Алгоритм действий, обеспечивающих измерение распределения потенциала плазмы в канале

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе получены теоретические зависимости, показывающие, что азимутальное отклонение иона определяется удельным магнитным потоком в канале, приложенным напряжением и физическими свойствами рабочего вещества;

2. Были получены зависимости, связывающие распределение потенциала электрического поля в канале с распределением удельного магнитного потока;

3. Предложена методика измерения азимутального отклонения ионов в дрейфовом промежутке;

4. Показано, что при прохождении через тонкую щель ионный пучок расслаивается на потоки с разными энергиями;

5. Предложена и опробована методика определения наиболее вероятной энергии ионов в пучке по распределению угла азимутального отклонения ионов на срезе ускорительного канала;

6. Предложена и опробована методика определения распределения потенциала плазмы в разрядном промежутке по распределению угла азимутального отклонения ионов на срезе ускорительного канала;

7. Предложена и опробована методика определения положения анодного слоя в канале двигателя по распределению угла азимутального отклонения ионов на срезе ускорительного канала.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих печатных изданиях:

1. 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. Машиностроение. 2011. Специальный выпуск Ионно-плазменные технологии. С. 58-63.

2. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов /С.Г. Ивахненко [и др.]// Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2011. Специальный выпуск Ионно-плазменные технологии. С. 35-41.

3. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200. Наука и образование, эл. изд. 2011. № 10. (http://technomag.edu.ru/doc/230165.html)

4. Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем / С.Г. Ивахненко [и др.]. Наука и образование, эл. изд. 2012. № 11.
(http://technomag.edu.ru/doc/483882.html)

5. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г. Влияние азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем Наука и образование, эл. изд. 2012. № 10.
(http://technomag.edu.ru/doc/483832.html)

6. Влияние азимутального отклонения ионов плазменной струи на тяговый КПД двигателя с анодным слоем. / С.Г. Ивахненко [и др.]. Наука и образование, эл. изд. 2012. № 12.
(http://technomag.edu.ru/doc/483944.html)