

УДК 533.9

ВЕРИФИКАЦИЯ РАБОТЫ АПЕРТУРНОГО ЗОНДА С ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2024 г. Д. А. Майстренко^{a, b, *}, А. А. Шагайда^a, Д. А. Томилин^a,
Д. А. Кравченко^a, М. Ю. Селиванов^a

^aГосударственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»,
Москва, Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

*e-mail: maystrenko.da@phystech.edu

Поступила в редакцию 11.06.2024 г.

После доработки 01.07.2024 г.

Принята к публикации 15.07.2024 г.

Рассматривается зондовая диагностика распределения ионов по энергиям и плотности ионного тока в струе плазмы электроракетных двигателей. Приводится подробное сравнение нового зонда с задерживающим потенциалом другой конструкции с традиционным зондом многосеточной конструкции на примере численного моделирования и реальных испытаний при различных параметрах струи холловского двигателя. С помощью моделирования наглядно продемонстрированы недостатки многосеточной конструкции зонда с задерживающим потенциалом и преимущества апертурной. На основании расчетов также подробно исследованы особенности использования нового зонда и сделаны предварительные выводы относительно точности зонда. В заключительной части статьи продемонстрированы результаты совместных испытаний двух зондов при таких параметрах плазмы, при которых трехсеточный зонд работает наиболее точно, с подтвержденной максимальной погрешностью в 5%.

Ключевые слова: электротяга, двигатель Холла, диагностика плазмы, распределение энергии ионов, анализатор потенциала торможения

DOI: 10.31857/S0367292124090066, **EDN:** DVCFKS

1. ВВЕДЕНИЕ

Электроракетные двигатели (ЭРД) в настоящее время используются как для корректировки орбит спутников, так и для дальних полетов, и задачи, связанные с диагностикой таких двигателей, приобретают всё большую актуальность [1–4]. Одной из важнейших задач является измерение энергетического спектра ионов и плотности ионного тока в плазме ЭРД. Информацию об энергетических спектрах ионов на разных углах к оси ЭРД используют для анализа эффективности работы двигателя и для определения влияния струи плазмы двигателя на бортовые устройства космических аппаратов [5]. В настоящее время наиболее популярным устройством для такой диагностики

является многосеточный зонд с задерживающим потенциалом, основными достоинствами которого являются простота конструкции вместе с небольшими габаритами и массой. Такие зонды в настоящее время используются как в лабораториях, так и непосредственно на космических аппаратах [6].

Традиционный зонд с задерживающим потенциалом имеет многосеточную конструкцию [7], геометрические параметры которой выбираются в соответствии с ожидаемым радиусом Дебая исследуемой плазмы. Точно подобранная геометрия позволяет корректно измерить энергетический спектр ионов в плазме с определенными параметрами. В настоящее время разработано множество модификаций зондов с задерживающим потен-

циалом для измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока как в ЭРД [8–10], так и в других источниках плазмы [11]. Помимо базовой конструкции с тремя сетками [7], существуют зонды с большим количеством сеток [12] и без сеток [13]. Была предложена и протестирована геометрия с переменной прозрачностью [11], для которой больше нет экспериментальных данных для оценки области применимости конструкции в открытых источниках.

В этой работе представлен новый зонд с задерживающим потенциалом, в дальнейшем называемый апертурным, который может корректно работать независимо от радиуса Дебая плазмы ЭРД. Этот зонд теоретически способен измерять энергетический спектр ионов и плотность ионного тока в диапазоне плотностей токов от 10^{-4} до 100 А/м^2 и энергиях ионов до 2500 эВ с погрешностью определения энергетического пика меньшей 2%.

Ранее, в первой работе посвященной разработке апертурного зонда [14], были указаны и теоретически обоснованы недостатки многосеточной конструкции: неконтролируемая зависимость погрешности и эффективной прозрачности многосеточного зонда для ионов от параметров исследуемой плазмы. Эти обстоятельства приводят к тому, что использование зонда многосеточной конструкции для измерения плотности ионного тока и распределения ионов по энергиям с контролируемой и предсказуемой погрешностью возможно только в узком рабочем диапазоне параметров плазмы, что создает существенные сложности при диагностике струи ЭРД на различных углах к оси двигателя. Для решения этой проблемы был разработан зонд апертурной конструкции [14]. Первые испытания показали адекватность работы зонда. Моделирование показало, что апертурная конструкция может работать в диапазоне плотностей токов до 100 А/м^2 и энергий ионов до 2500 эВ без существенной потери точности, а испытания, проведенные совместно с трехсеточным зондом, показали, что спектры, получаемые с нового зонда, соответствуют ожиданиям, а для определения погрешности зонда требуются дальнейшие испытания.

Данная статья посвящена верификации работы апертурного зонда и обоснованию реальных преимуществ апертурной конструкции перед многосеточной. В разд. 2 описана конструкция апертурного зонда и объяснены основные особен-

ности его работы. В разд. 3 показаны результаты сравнительного численного моделирования зондов двух типов: трехсеточного и апертурного, в разд. 4 рассказано про экспериментальную верификацию результатов моделирования, а в разд. 5 показаны результаты совместных испытаний трехсеточного и апертурного зондов и в заключении сделан вывод о преимуществах и точности апертурного зонда.

2. ПРИНЦИП И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АПЕРТУРНОГО ЗОНДА

Основная идея, заложенная в конструкцию апертурного зонда, состоит в том, чтобы организовать сепарацию ионов и электронов так же, как это происходит в ионно-оптических системах ионных двигателей [15]. Это означает, что отверстия в сетках должны быть соосны, а приложенные к сеткам потенциалы должны обеспечивать формирование вблизи эмиссионного электрода плазменной границы, с которой извлекаются отдельные ионные пучки. Такая конструкция позволяет использовать сетки с отверстиями большого диаметра, намного превышающего радиус Дебая, и обеспечивает высокую прозрачность зонда. В результате появляется возможность проводить измерения как в плотной плазме на небольших расстояниях от двигателя, так и вдали от двигателя, на периферии плазменной струи. Схематически зонд изображен на рис. 1. Сетки разделены керамическими изоляторами, которые защищены от ионного распыления металлическими пластинами. На рисунке показано только общее представление о конструкции, размеры указаны не в масштабе.

Зонд включает в себя экранирующий электрод, отсечной электрод и коллектор. Экранирующий и отсечной электроды представляют собой пластины с круглыми соосными апертурами, расположенными в узлах гексагональной решетки. Экранирующий электрод заземлен. На отсечной электрод, который является аналогом ускоряющего электрода в ИОС ионных двигателей, подается большой отрицательный потенциал (до 2000 В по модулю), который обеспечивает формирование плазменной границы вблизи апертуры экранирующего электрода. На этой границе происходит отсечение электронов. На коллектор подается положительный потенциал, который определяет граничную энергию регистрируемых ионов. На коллекторе имеются углубления в форме

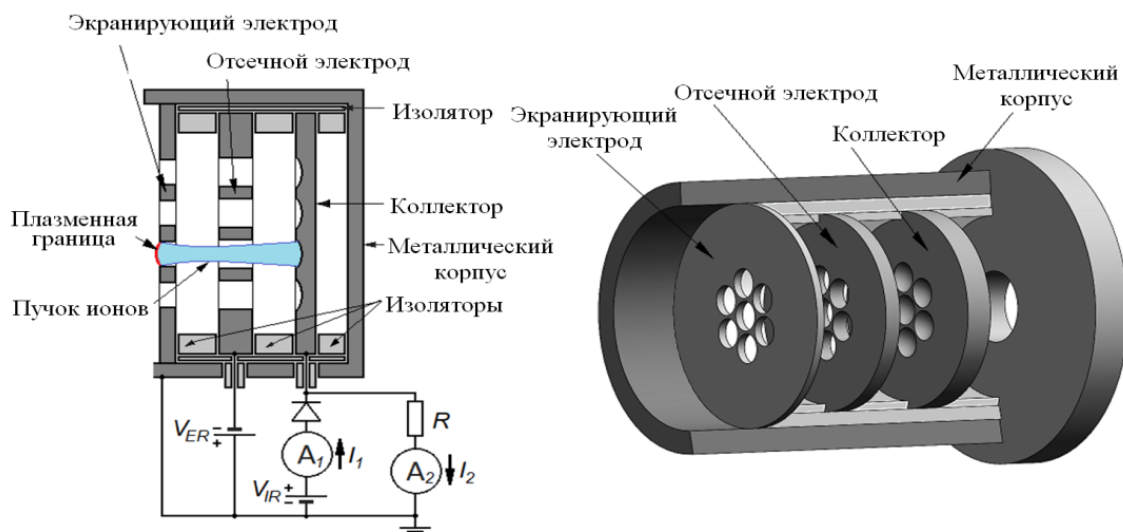


Рис. 1. Схема апертурного зонда.

сферических сегментов, которые служат для снижения систематической погрешности измерений. В том случае, если внутри зонда обеспечена фокусировка ионного пучка без попадания ионов на отсечной электрод, эффективная прозрачность зонда для ионов близка к геометрической прозрачности экранирующего электрода. Это позволяет использовать зонд вместо цилиндра Фарадея для измерений абсолютных значений плотности тока. Важно также отметить, что ионное распыление наружной поверхности экранирующего электрода практически не изменяет эффективную прозрачность зонда, так как эта прозрачность определена прозрачностью отсечного электрода, который не распыляется благодаря фокусировке ионов. Более подробное описание конструкции и принципа работы зонда приведено в работе [14].

3. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АПЕРТУРНОГО И МНОГОСЕТОЧНОГО ЗОНДОВ

3.1. Расчетное исследование многосеточного зонда

Моделирование работы зондов проводилось с помощью программного пакета IOS-3D [17]. Этот программный пакет предназначен для решения самосогласованных задач расчета стационарных электрических полей и потоков заряженных и нейтральных частиц в трехмерных областях произвольной формы и был апробирован при разработке и исследовании различных типов

ионно-оптических систем ионных двигателей. Например, при извлечении ионного пучка из плазмы (как в ионных двигателях) ионный поток задается так, что ионы движутся навстречу плазменной границы со скоростью Бома. На каждой итерации отрицательный объемный заряд, создаваемый электронами, добавляется к объемному заряду, создаваемому ионами, плотность которых распределена в соответствии с распределением Больцмана с заданной электронной температурой. Программный пакет был апробирован при разработке различных типов ионно-оптических систем ионных двигателей. Расчетная сетка при этом имеет шаг меньший радиуса Дебая моделируемой плазмы. При моделировании зонда, на входе в зонд задан поток ионов с известным распределением ионов по энергиям с шагом в 5 В, что определяет абсолютную ошибку моделирования.

При моделировании и в ходе испытаний в качестве многосеточного зонда использовался трехсеточный зонд, разработанный в АО ГНЦ «Центр Келдыша», схема которого показана на рис. 2. Данный зонд не использует четвертую сетку для подавления вторичной электронной эмиссии, для улучшения прозрачности зонда и тока коллектора на периферии струи.

Данный трехсеточный зонд был разработан так, чтобы наиболее точно работать в плазме плотностью примерно 0.5 А/м^2 и диапазоне энергий ионов 100–1000 эВ. При таких параметрах плазмы зонд способен работать наиболее корректно [7, 17]. Этот зонд успешно использовался для изме-

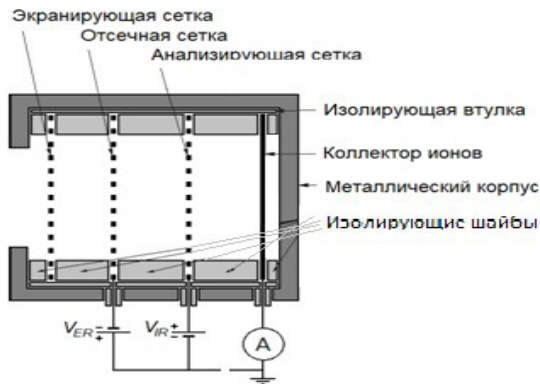


Рис. 2. Схема трехсеточного зонда.

рения параметров струи холловского двигателя ранее и с помощью этих измерений рассчитывали коэффициенты эффективности двигателя [5].

В качестве численной модели трехсеточного зонда была задана трехмерная геометрия (рис. 3) одной входной ячейки трехсеточного зонда, с геометрическими размерами, в точности повторяющими геометрические размеры зонда используемого в АО ГНЦ «Центр Келдыша», схема которого была показана на рис. 2. В данной модели предполагается, что отверстия экранирующей и анализирующей сетки соосны, а отверстия отсекающей сетки расположены симметрично относительно оси отверстий двух других сеток.

Расчет проведен для двух различных заданных распределений ионов по энергиям, представленных на рис. 4 оранжевой кривой. Моделирование проводилось при отсутствии влияния пространственного заряда, при заметном влиянии пространственного заряда и при максимально возможном влиянии пространственного заряда в условиях плазмы струи ЭРД. Данные ситуации возможны соответственно на периферии струи ЭРД с плотностью тока 10^{-4} – 10^{-3} А/м², на небольших углах к оси двигателя и непосредственно на оси струи либо вблизи двигателя, где плотность

тока может достигать 100 А/м². Результаты моделирования показаны на рис. 4.

На приведенных рисунках можно заметить две особенности: сдвиг энергоспектра в сторону меньших энергий при достаточно большой плотности тока и сдвиг в сторону больших энергий при достаточно низкой плотности тока. Демонстрацию этих эффектов можно увидеть на рис. 5 и 6. Численное моделирование траекторий ионов показало, что при слишком большой плотности тока, между отсекающей и анализирующей сеткой образуется пространственный заряд, достаточный для отражения ионов с энергией изначально достаточной для достижения коллектора¹⁴. Этот эффект виден на рис. 5. На рис. 5а изображены траектории ионов с энергией в диапазоне от 350 до 400 эВ в зонде при плотности ионного тока 50 А/м², при потенциале отсекающей сетки –50 В и при потенциале анализирующей сетки 350 В. Данная группа ионов отражается из-за наличия пространственного заряда, который создает потенциал между отсекающей и анализирующей сеткой величиной в 450 В при заданной плотности тока. Распределение потенциала в этом случае представлено на рис. 5б синей кривой, где пространственный заряд создает потенциальный барьер в 450 В еще до анализирующей сетки. При этом если влиянием пространственного заряда можно пренебречь, распределение потенциала в зонде будет линейным (красная кривая). Подробнее об этом рассказано в статье [14].

В другой ситуации, когда плотность тока низкая, пространственный заряд незначителен, имеет место другой негативный эффект. Из-за уменьшения потенциала в центре отверстия анализирующей сетки существует часть ионов, которая проходит сквозь отверстия сетки несмотря на то, что их начальная энергия недостаточна для преодоления заданного потенциала сетки. Этот эффект

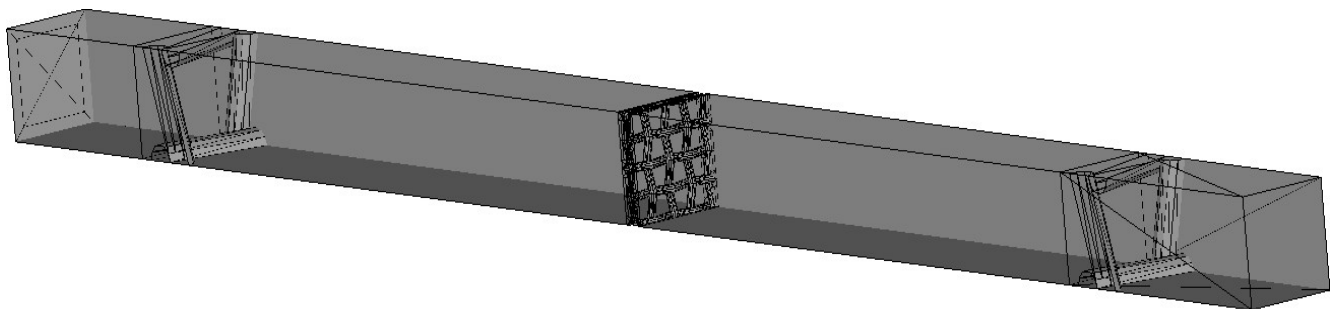


Рис. 3. Модель трехсеточного зонда.

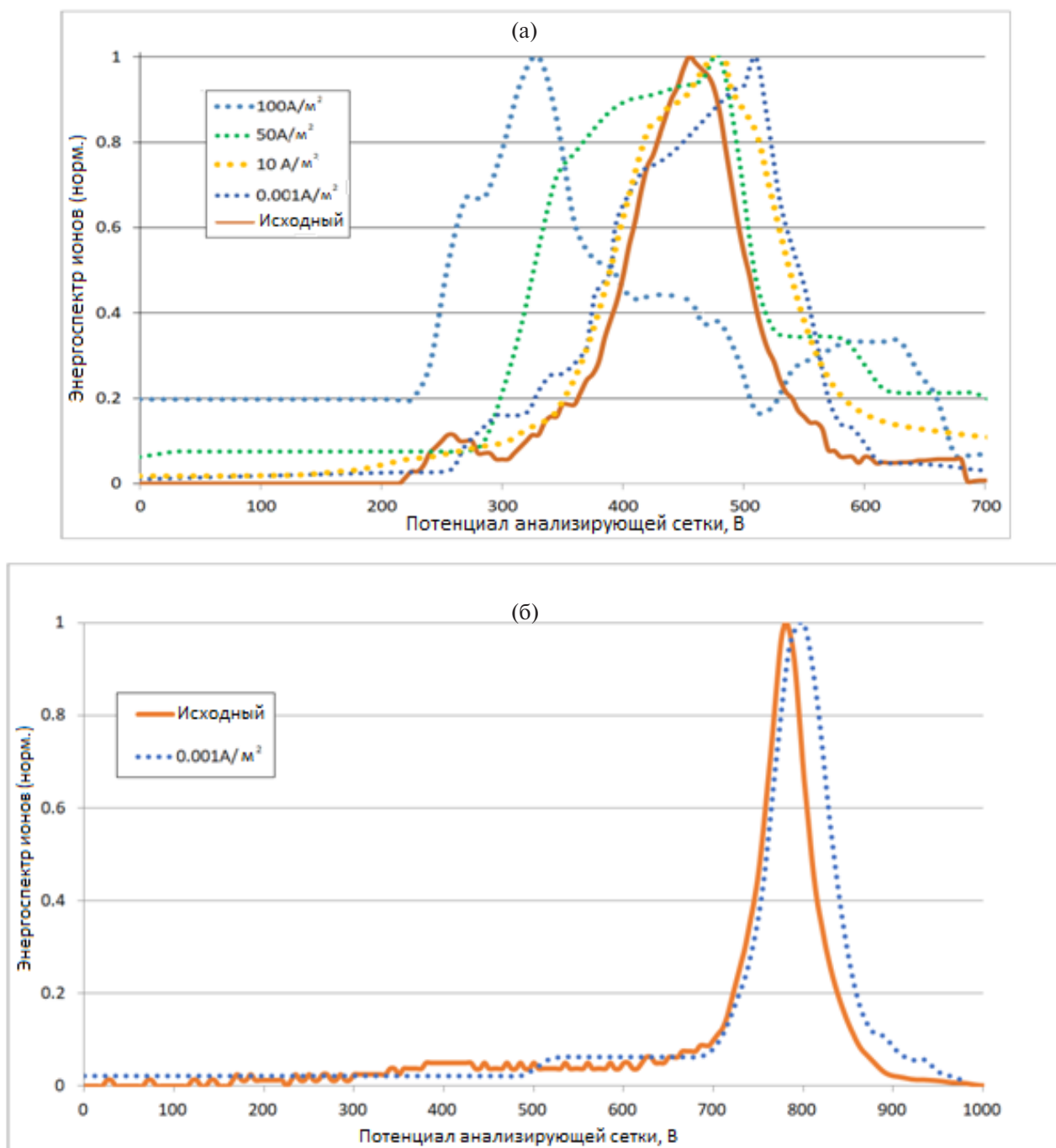


Рис. 4. Результаты моделирования работы трехсеточного зонда в плазме ХД с наиболее вероятной энергией ионов: 470 эВ (а), 810 эВ (б).

фект виден на рис. 6. На рис. 6а показаны траектории ионов с энергией в диапазоне 308–315 эВ и плотностью тока 0.01 А/м² при потенциале анализирующей сетки в 320 В. На рис. 6б и 6в продемонстрировано падение потенциала в отверстии анализирующей сетки, с 320 до 308 В.

Подводя итоги, моделирование подтверждает то, что зонд многосеточной конструкции не может

работать в широком диапазоне плотностей токов с достаточной точностью. Обе указанные выше проблемы можно решить, уменьшая отверстия сеток, но это сильно усложнит работу зонда в струях с низкой плотностью тока из-за неизбежного снижения суммарной прозрачности зонда.

Дополнительно стоит отметить, что в трехсеточном зонде вторичная ион-электронная эмис-

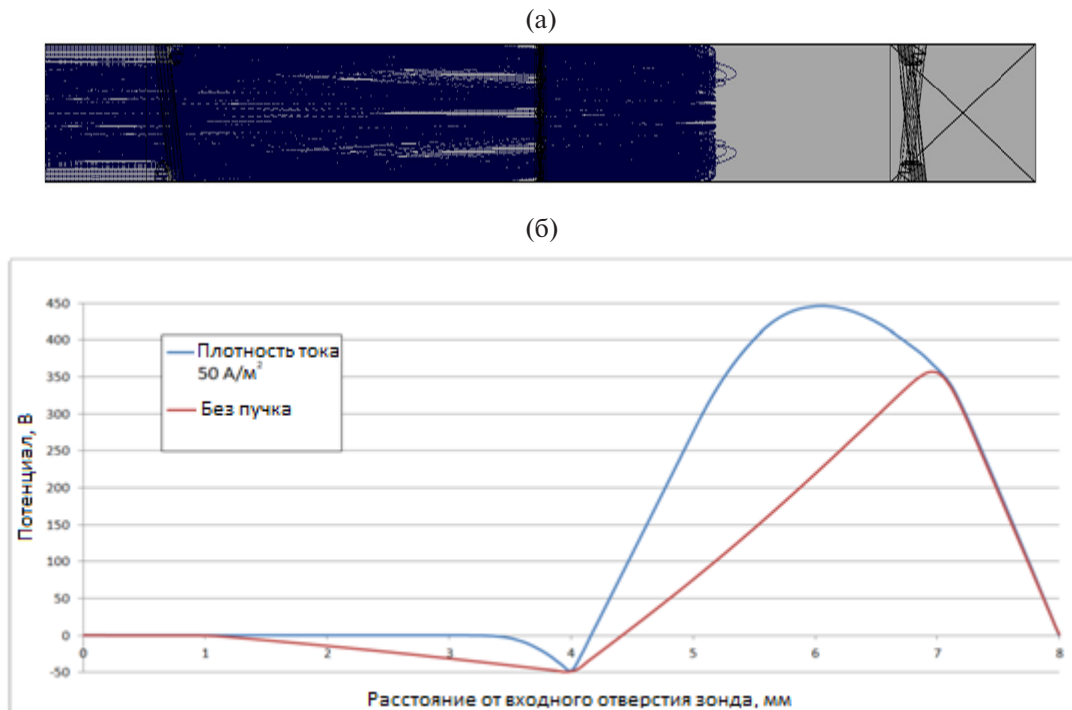


Рис. 5. Иллюстрация влияния пространственного заряда: траектории ионов (а); распределение потенциала в зонде при влиянии пространственного заряда и при отсутствии пространственного заряда (б).

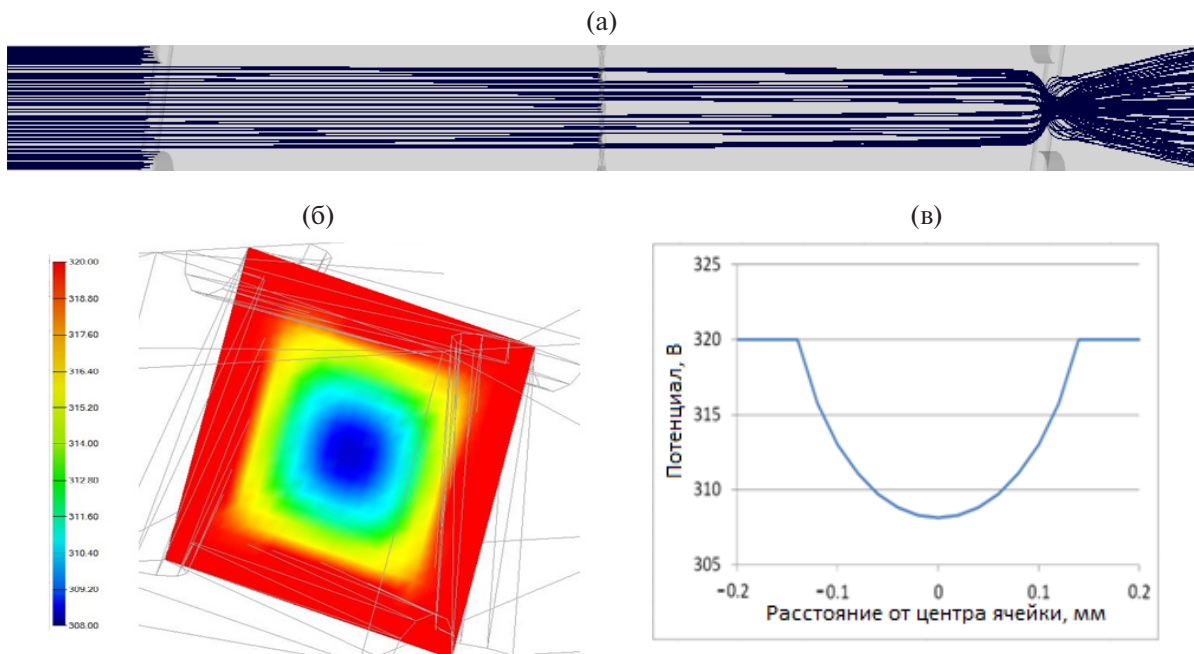


Рис. 6. Иллюстрация некорректной работы зонда в струе с низкой плотностью тока: траектории ионов (а), распределение потенциала в ячейки сетки (б) и (в).

сия с коллектора приводит к неконтролируемому завышению измеряемого тока с коллектора и сдвигу энергетического спектра в сторону больших энергий. При работе трехсеточного зонда имеет место выбивание электронов с поверхности

коллектора и движение электронов с коллектора в сторону анализирующей сетки (рис. 7).

Влияние данного эффекта на измерения зависит от коэффициента вторичной электронной эмиссии, который при энергиях ионов ксенона

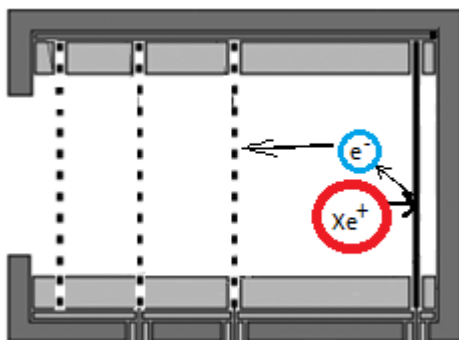


Рис. 7. Иллюстрация вторичной электронной эмиссии в трехсеточном зонде.

в диапазоне от 100 до 2000 эВ находится в диапазоне от 0.05 до 0.15. Более того, абсолютное значение электронного тока с коллектора зависит от потенциала анализирующей сетки, так как при меньших потенциалах сетки больше ионов долетает до коллектора и электронный ток с коллектора соответственно больше. При больших потенциалах меньше ионов долетает до коллектора и ток вторичных электронов также меньше, поэтому падение измеряемого тока на коллектор происходит резче, чем падение ионного тока на коллектор. Также следует отметить, что при измерениях, поднимая потенциал сетки, мы отсекаем сначала ионы низкой энергии, которые вносят меньший вклад во вторичную электронную эмиссию, а далее при увеличении потенциала сетки отсекаются высокоэнергетичные ионы, играющие большую роль во вторичной электронной эмиссии. Таким образом, вторичная электронная эмиссия в трехсеточном зонде двигает энергетический спектр в сторону больших энергий и сужает его. Данную проблему можно решить, добавив еще одну сетку, поддерживаемую под отрицательным потенциалом, которая заблокирует вторичную электронную эмиссию, но это решение уменьшит прозрачность зонда и усложнит работу зонда при исследовании энергетических спектров ионов на периферии, где плотность ионного тока может быть 0.01 А/м^2 и меньше.

3.2. Расчетное исследование апертурного зонда

Перейдем теперь к анализу работы апертурного зонда. Для начала приведем здесь результаты моделирования из предыдущей работы [14] при параметрах пучка с энергией ионов в диапазоне от 100 до 1000 эВ и плотностью ионного тока до 100 А/м^2 (рис. 8). Согласно моделированию, апер-

турный зонд с ионно-оптической системой теоретически способен восстанавливать энергетический спектр ионов с погрешностью менее 1% во всем интересующем диапазоне плотностей токов и энергий ионов.

Как уже было сказано ранее, важная особенность апертурного зонда, которая позволяет ему работать в широком диапазоне параметров плазмы — это высокий ускоряющий потенциал, который формирует плазменную границу во входной апертуре экранирующего электрода и фокусирует ионный пучок. В этом случае плазменная граница находится вблизи нулевой эквипотенциали, которая, в свою очередь, рассчитывается в ходе моделирования. Для того чтобы фокусировка была оптимальной, необходим определенный, оптимальный ускоряющий потенциал. Ускоряющий потенциал называется оптимальным, когда, во-первых, все ионы фокусируются и не сталкиваются с ускоряющим электродом, а во-вторых, не происходит слишком сильной фокусировки ионного пучка, при которой возможно отражение от лунок коллектора ионов с начальной энергией, достаточной для преодоления потенциала коллектора. Необходимость использования сферических лунок вместо плоского коллектора обоснована в предыдущей работе [14]. Случай оптимальной и неоптимальной фокусировки показан на 9. Представлен расчет зонда в пучке ионов с энергией ровно 300 эВ, плотностью тока 10 А/м^2 при потенциале коллектора зонда 295 В. Рисунок 9а отражает оптимальную фокусировку ионного пучка, когда все ионы не соударяются с ускоряющим электродом и долетают до коллектора, не отражаясь. На рис. 9б имеет место перефокусировка пучка, когда ускоряющий потенциал слишком высокий и часть ионов отражается от коллектора из-за ненулевого угла падения. Рисунок 9в демонстрирует недостаточный ускоряющий потенциал, при котором ионный пучок слишком сильно расходится и снова из-за ненулевого угла падения часть ионов отражается от коллектора.

Минимальный оптимальный потенциал для параметров плазмы в диапазоне энергий ионов от 100 до 2000 эВ и плотностей токов до 100 А/м^2 рассчитан с помощью численного моделирования и была получена зависимость этого потенциала от плотности ионного тока и энергии ионов. Для примера, эта зависимость представлена на рис. 10 для четырех моноэнергетичных пучков с энергией

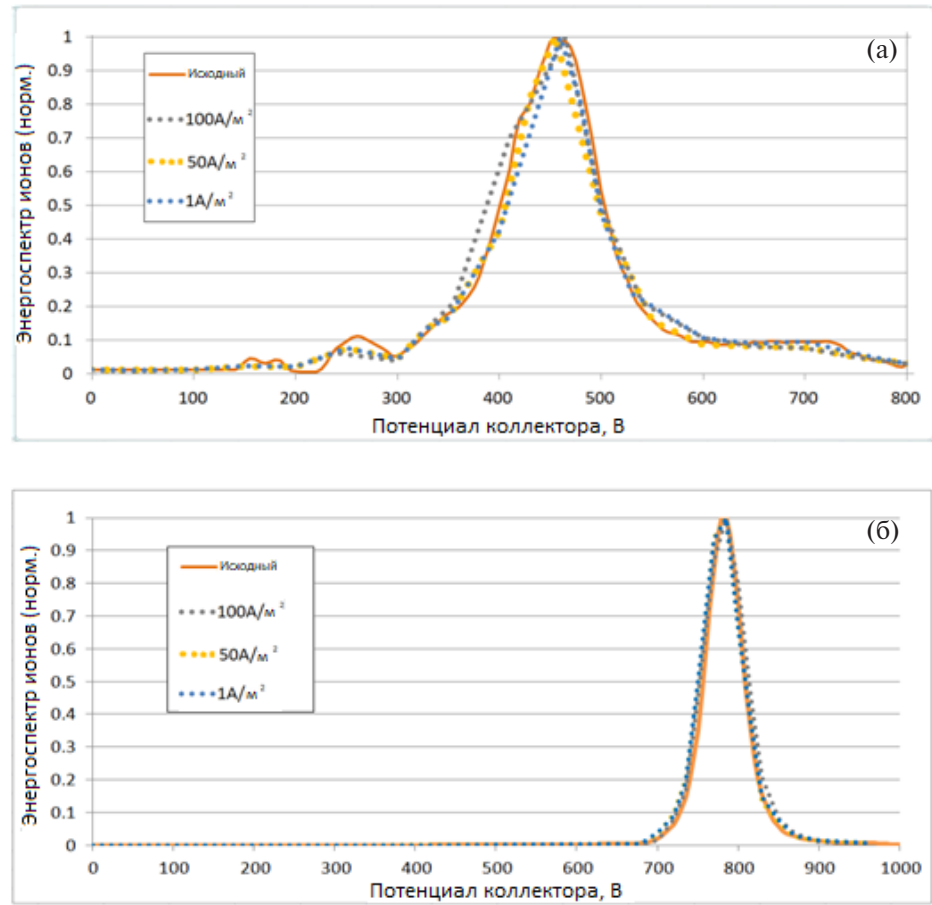


Рис. 8. Результаты моделирования работы апертурного зонда.

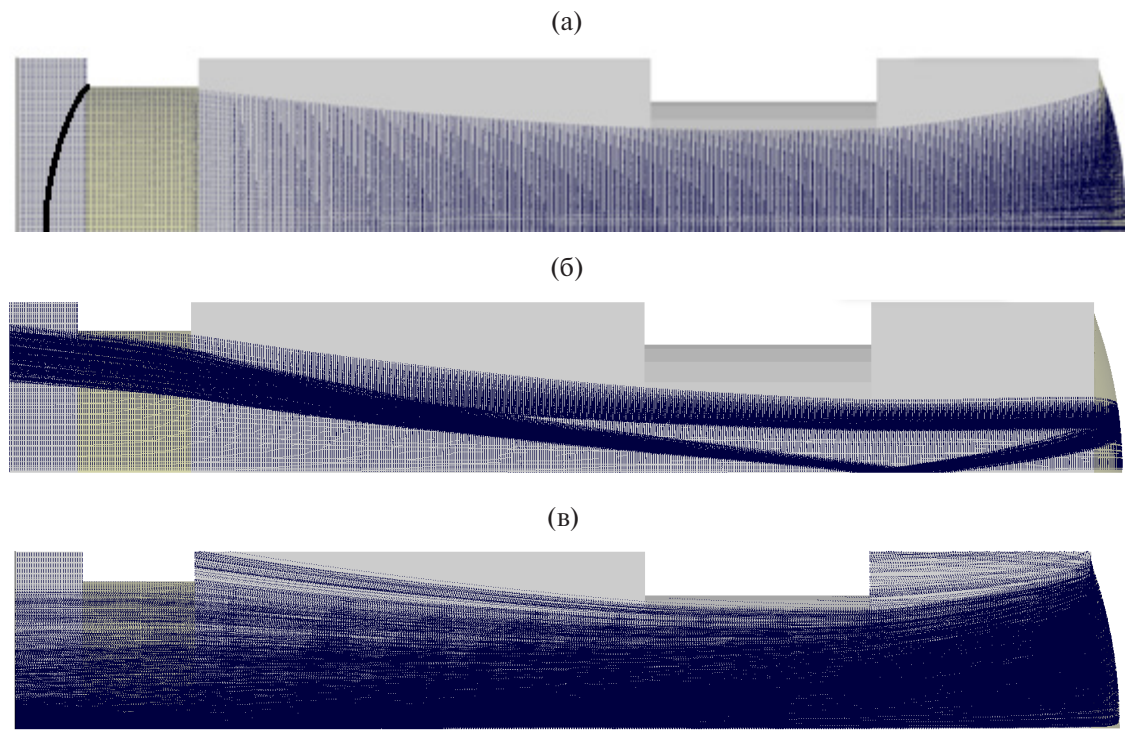


Рис. 9. Оптимальная фокусировка(а), слишком сильная (б) и слишком слабая фокусировка (в).

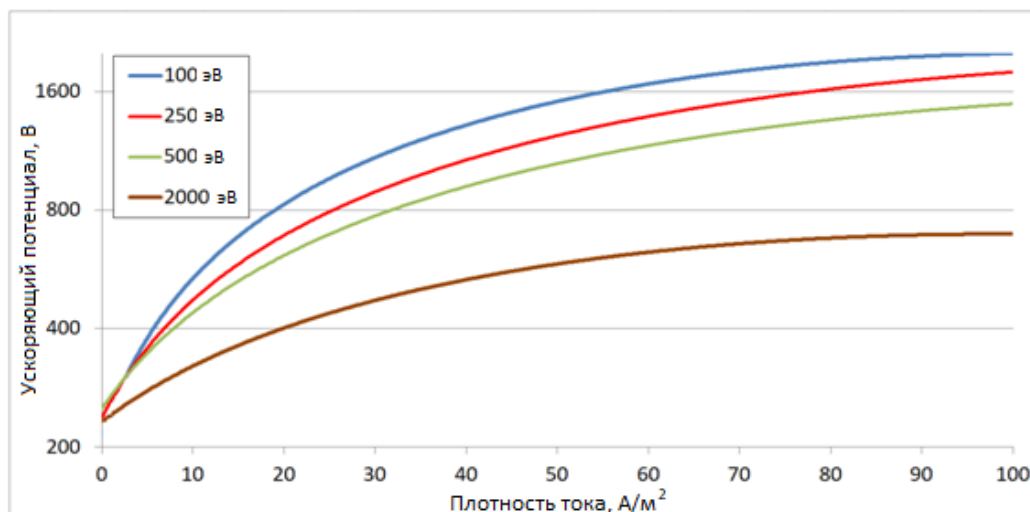


Рис. 10. Оптимальный ускоряющий потенциал в зависимости от плотности тока для разных энергий ионов.

ионов 100, 250, 500 и 2000 эВ. Например, при работе зонда в пучке с энергией ионов 500 эВ и плотности ионного тока 30 А/м^2 оптимальным потенциалом будет -700 В .

Следует также отметить, что, согласно проведенному нами моделированию, оптимальная фокусировка ионного пучка имеет место в некоторой окрестности ускоряющего потенциала. Не углубляясь в детали, выделим несколько диапазонов параметров пучка и укажем для них оптимальный ускоряющий потенциал в табл. 1.

Чтобы предсказать точность апертурного зонда, необходимо проанализировать эффекты, которые могут повлиять на его работу. Основным таким эффектом является явление вторичной электронной эмиссии. Учитывая тот факт, что ускоряющий электрод удерживается под высоким ускоряющим потенциалом, вторичная элект-

ронная эмиссия с поверхности этого электрода на стороне коллектора возможна, когда ионы, отраженные от коллектора, сталкиваются с поверхностью ускоряющего электрода (рис. 11). Эти электроны достигают коллектора под действием ускоряющего напряжения между электродом и коллектором и уменьшают измеряемый ток. Относительная величина занижения тока нелинейно зависит от качества фокусировки ионного пучка и потенциала коллектора. Следовательно, этот эффект трудно оценить при измерении энергетического спектра, и его следует рассматривать как основной отрицательный эффект, приводящий к погрешности апертурного зонда. Величина данного эффекта может быть оценена численным моделированием, путем расчета тока ионов на правую сторону ускоряющего электрода и учета коэффициента вторичной электронной эмиссии.

Таблица 1. Оптимальные ускоряющие потенциалы для разных параметров плазмы. J — плотность ионного тока в А/м^2 , E — энергия ионов.

Диапазон	$J < 10$, $E = [0, 2000]$	$J = [10, 50]$ $E = [0, 500]$	$J = [10, 50]$ $E = [500, 2000]$	$J = [50, 100]$ $E = [500, 2000]$	$J = [50, 100]$ $E = [0, 500]$
Ускоряющий потенциал	-500	-1200	-700	-1200	-1800

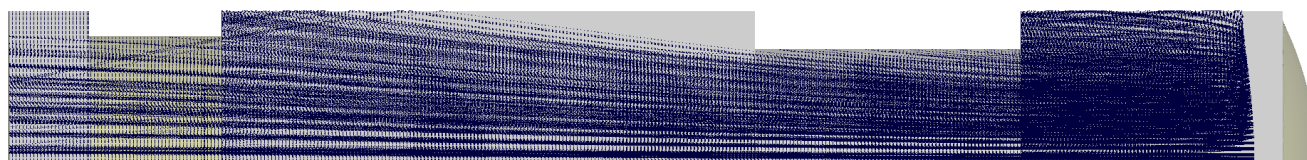


Рис. 11. Расфокусировка отраженных ионов.

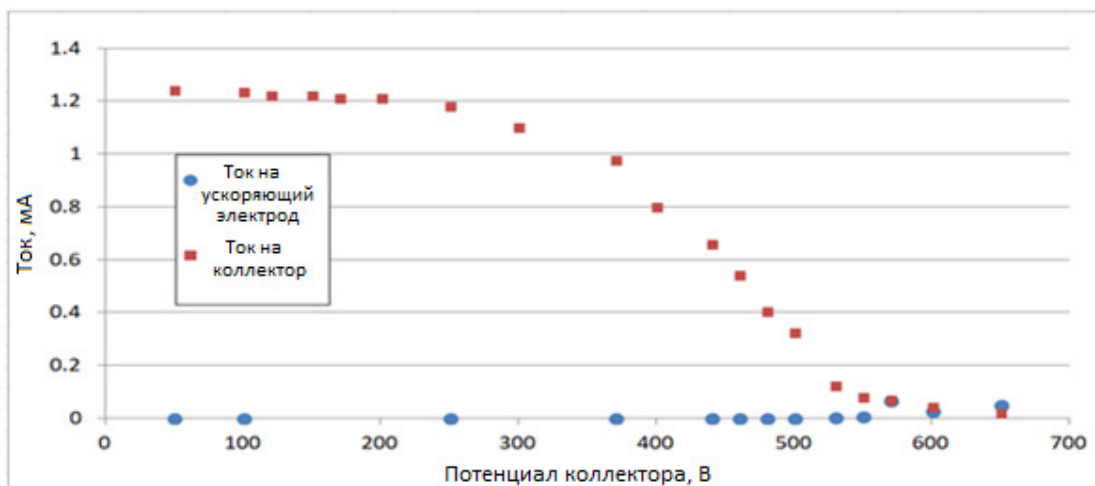


Рис. 12. Зависимость токов коллектора и электрода от потенциала коллектора в апертурном зонде.

Для определения максимальной погрешности, которую вносит эффект вторичной электронной эмиссии, необходимо смоделировать работу зонда в плазме с высокой плотностью тока и низкой энергией ионов, когда расфокусировка пучка наиболее значительна. На графике (рис. 12) показаны зависимости токов ионов на коллектор и на ускоряющий электрод от потенциала коллектора при заданной энергии пучка 100 эВ и плотности ионного тока 100 А/м². Видно, что максимальный ток на ускоряющий электрод составляет примерно 4% максимального тока на коллектор. Учитывая коэффициент вторичной электронной эмиссии, который для титанового электрода при энергиях ионов в диапазоне от 100 до 2000 эВ лежит в диапазоне от 0.05 до 0.15, максимальный ток вторичных электронов составляет 0.5% максимального тока на коллектор. Следовательно, погрешность в определении энергетического пика лежит в пределах 1%. Учитывая это, данным эффектом можно пренебречь. При этом, величина данного эффекта также может быть подтверждена экспериментально, и использована для дальнейшего уменьшения погрешности зонда, о чем будет сказано в следующем разделе.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АПЕРТУРНОГО ЗОНДА

4.1. Верификация оптимального ускоряющего потенциала

В этом и следующем разделе показаны результаты испытаний зондов в струе холловского двигателя. Используемый в данных экспериментах

двигатель похож на КМ-2Т5 [18] и может стабильно работать на напряжениях разряда от 300 до 900 В. Двигатель устанавливался в вакуумную камеру объемом 90 м³, и система вакуумных насосов состояла из нескольких криогенных установок со скоростью откачки более 10 мг/с.

Как уже было сказано ранее, для корректной работы апертурного зонда важно правильно установить ускоряющий потенциал. Для экспериментального поиска оптимального ускоряющего потенциала необходимо поддерживать коллектор под потенциалом 0 В для того, чтобы всем ионам изначально хватало энергии для достижения коллектора и, плавно увеличивая потенциал ускоряющего электрода, измерять зависимость тока коллектора от ускоряющего потенциала. Оптимальным будет минимальный потенциал, начиная с которого ток на коллектор перестанет зависеть от ускоряющего потенциала. В предыдущем разделе на рис. 10 можно заметить, что для ионного пучка со средней энергией ионов 250 В и плотностью ионного тока 15 А/м², оптимальный ускоряющий потенциал, полученный расчетным путем, равняется примерно 600 В. Для экспериментального подтверждения этого значения приведем зависимость тока коллектора от ускоряющего потенциала при напряжении разряда 302 В, токе разряда 3 А и потенциале катода –18 В (рис. 13).

Измеренная плотность тока оказалась равна 16 А/м². Согласно полученной зависимости, можно утверждать, что оптимальный ускоряющий потенциал в данном случае равен 630 В, что согласуется с результатами моделирования. Подоб-

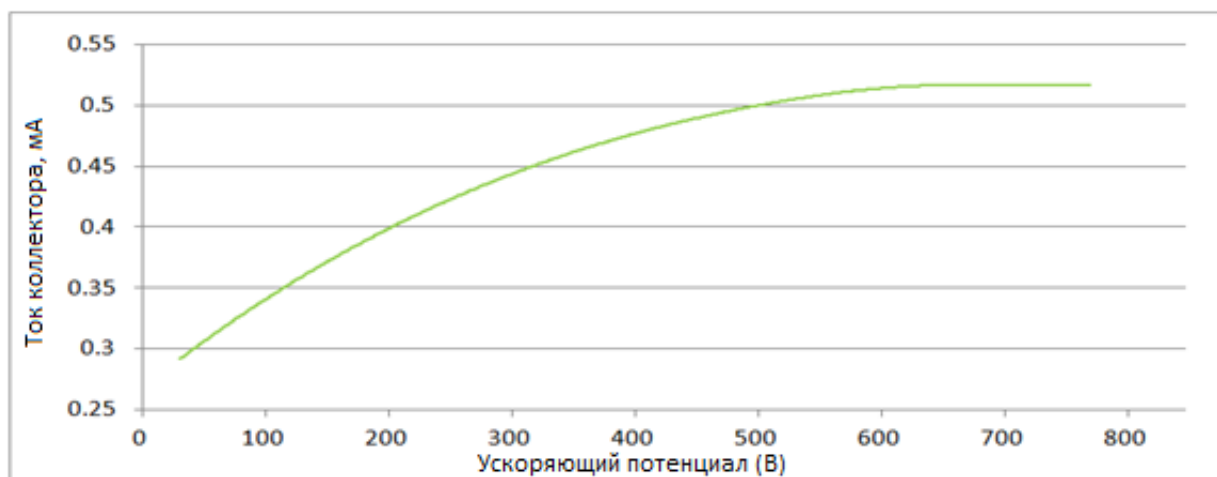


Рис. 13. Зависимость тока коллектора от ускоряющего потенциала.

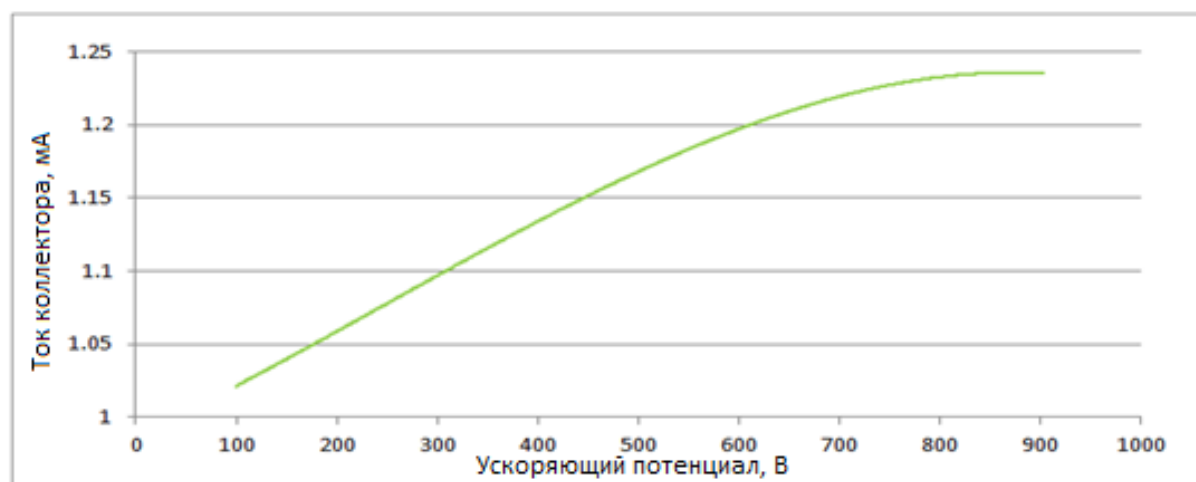


Рис. 14. Зависимость тока коллектора от ускоряющего потенциала.

ный эксперимент был проведен для пучка с напряжением разряда 302 В, потенциалом катода –18 В и током разряда 5 А. Результаты измерения представлены на рис. 14. Измеренная плотность тока оказалась 30 A/m^2 , а определенный экспериментально оптимальный ускоряющий потенциал оказался равен примерно 800 В. При этом рассчитанный с помощью моделирования потенциал равен также примерно 800 В (рис. 10).

Приведем далее результаты измерения энергетических спектров ионов апертурным зондом встроуе холловского двигателя с напряжением разряда 302 В, потенциалом катода –18 В и током разряда 2.4 А. Измерения проводились при двух ускоряющих потенциалах: оптимальном, в –600 В, и завышенном, –900 В. Также стоит отметить, что согласно моделированию, при те-

кущих параметрах плазмы, ускоряющий потенциал в –900 В не приводит к ситуации показанной на рис. 8б и зонд может работать корректно.

При различных ускоряющих потенциалах измеренные энергетические спектры практически совпадают, что означает достаточность потенциала в –600 В для оптимальной фокусировки и корректной работы зонда.

4.2. Исследование влияния вторичной электронной эмиссии

Для проверки работы нового зонда и определения влияния вторичной электронной эмиссии на результаты был измерен максимальный ток вторичных электронов на коллектор при различных рабочих параметрах измеряемой плазмы. Ток вторичных электронов на коллектор можно

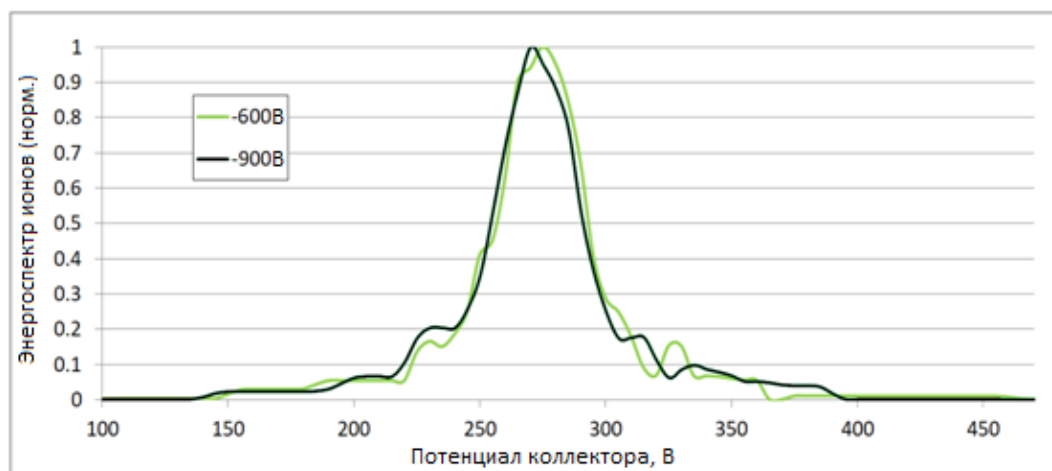


Рис. 15. Энергетический спектр, полученный апертурным зондом при разных ускоряющих потенциалах.

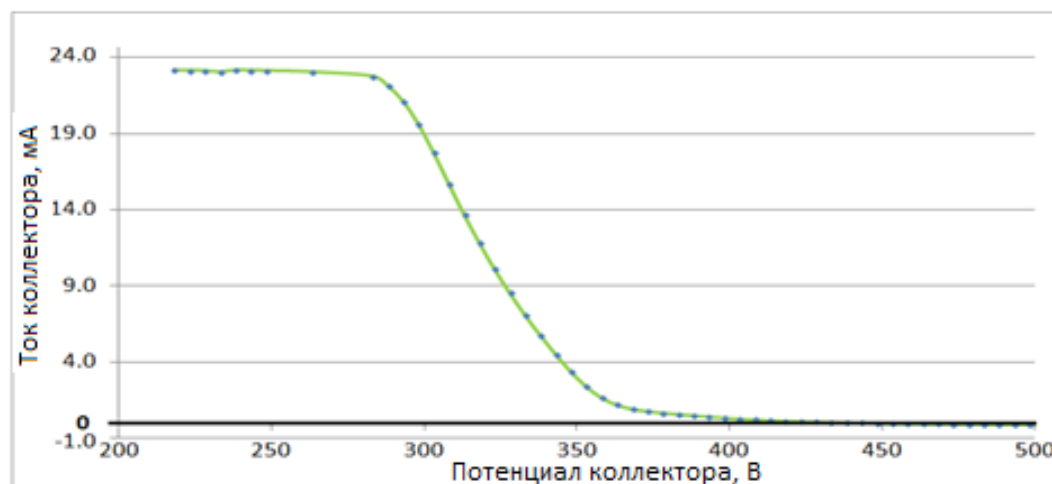


Рис. 16. Зависимость тока на коллекторе от потенциала коллектора с измерением отрицательных токов.

измерить только когда на коллектор заведомо могут лететь только электроны, а это происходит при потенциалах коллектора на 200–300 В больших напряжения разряда ХД. В этом случае, ионы в зонде будут двигаться так, как показано на рис. 11. Из-за столкновения ионов с ускоряющим электродом со стороны коллектора, образуются электроны, летящие на коллектор с ускоряющего электрода, и ток этих электронов мы можем измерять. Величина этого тока показывает максимальное значение вторичной электронной эмиссии, так как при реальных измерениях энергетического спектра потенциал коллектора меньше и количество электронов, долетающих до коллектора также меньше. В качестве примера, на рис. 16 показана зависимость тока коллектора от потенциала коллектора при на-

пряжении разряда двигателя 320 В и входной плотности тока 20 А/м^2 .

При потенциале коллектора в 500 В, измеряемый электронный ток оказался равен -130 нА . Это составляет 0.4% максимального тока на коллектор и, соответственно, может давать погрешность в определении энергетического пика до 1%. Подобные измерения были проведены для различных входных плотностей токов и показали, что максимальный вклад эффекта вторичной электронной эмиссии в работу зонда равен 2% и достигается только при плотностях ионного тока больших 60 А/м^2 . Данные измерения коррелируют с расчетами, и доказывают, что при измерении энергетических спектров ионов в струе электро-ракетного двигателя при помощи апертурного зонда влиянием вторичной электронной эмиссии можно пренебречь.

5. СОВМЕСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АПЕРТУРНОГО И МНОГОСЕТОЧНОГО ЗОНДОВ

5.1. Постановка эксперимента и измерение плотности тока

Оба зонда устанавливались на расстоянии 1.5 м от двигателя и имели возможность перемещаться по дуге для проведения измерений на всех углах к оси двигателя (рис. 17).

Каждый зонд был установлен так, что при любом положении зонда на дуге, ось зонда смотрела точно в центр двигателя. При этом погрешность установки зондов составила менее 0.5° . Оба зонда подключаются к автоматической системе питания и сбора данных, в которых подача и измерение задерживающего потенциала производится с погрешностью до 1 В, а измерение тока производится с погрешностью в 0.1 мкА в диапазоне до 20 мкА и с погрешностью 0.05 мкА в диапазоне от 20 до 100 мкА. Первыми совместными испытаниями были измерения зависимости плотности тока от угла к оси двигателя (рис. 18). Измеренная максимальная плотность тока апертурным зондом оказалась равна 2.31 А/м^2 , а трехсеточным зондом 2.33 А/м^2 . Учитывая геометрические размеры трехсеточного зонда и радиус Дебая исследуемой плазмы, этот зонд может наиболее корректно работать в диапазоне углов от -30 до 30° к оси и его прозрачность близка к геометрической. Учитывая полученные результаты, можно

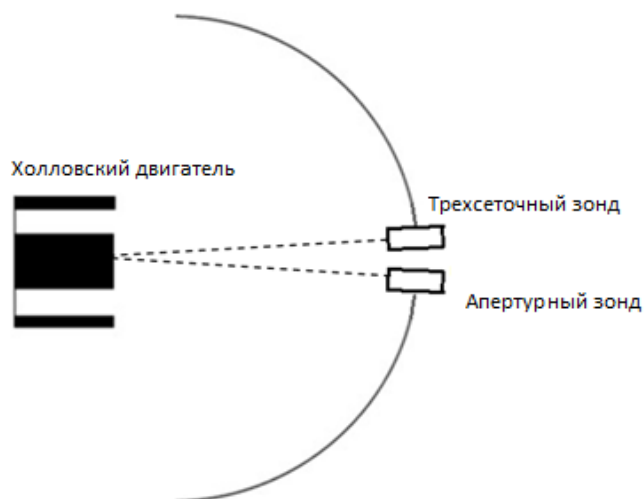


Рис. 17. Постановка эксперимента.

утверждать, что погрешность апертурного зонда не превышает погрешность трехсеточного зонда, которая составляет 5%.

Оба зонда корректно отобразили центр струи, где плотность тока, измеренная апертурным зондом, оказалась на 2% меньше, чем плотности тока полученной трехсеточным зондом. Провал плотности тока с двумя неодинаковыми пиками на $+4^\circ$ и -4° типичен для холловского двигателя, и его размер зависит от параметров разряда и расстояния до двигателя [19, 20]. Оба зонда показали этот провал, при этом апертурный зонд подчеркнул этот провал сильнее.

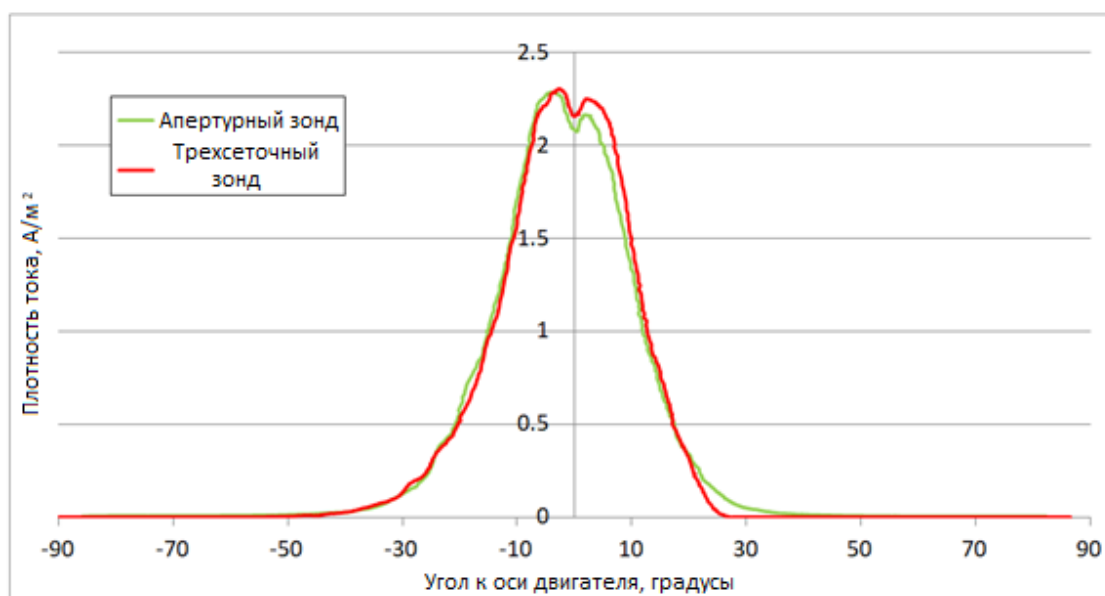


Рис. 18. Распределение плотности тока в струе.

Плотность тока, измеренная многосеточным зондом, получена с использованием геометрической прозрачности зонда, которая была 14% при производстве зонда. При этом, начиная с 20° , плотность тока, измеренная многосеточным зондом, оказалась ниже, чем плотность тока, измеренная апертурным зондом. Это может быть объяснено вторичной электронной эмиссией с коллектора многосеточного зонда. Ближе к центру струи существует большая часть высокоэнергетичных ионов, для которых коэффициент вторичной электронной эмиссии выше и сам эффект вторичной электронной эмиссии с коллектора заметнее завышает измеряемый ток. У апертурного зонда такого эффекта нет, поскольку отрицательный потенциал ускоряющего электрода блокирует вторичные электроны с коллектора. Отсутствие различий в измерениях на левой ветви распределения, возможно, является следствием того, что неточность в установке зондов и ненулевой угол падения компенсирует завышение тока многосеточным зондом.

5.2. Измерения энергетических спектров в центре струи

Измерения энергетических спектров проводились при двух разных режимах двигателя: с напряжением разряда 900 и 300 В. При этом ускоряющее напряжение для ионов было 875 и 278 В, учитывая потенциал катода -25 и -22 В соответственно.

Представим сначала результаты измерений на 0 и 15° к оси двигателя. Измеренные распределения

ионов по энергиям представлены на рис. 19 и 20. При обоих режимах работы двигателя в проведенных измерениях можно отметить три важных наблюдения. Первое, трехсеточный зонд сдвигает спектр относительно апертурного в сторону больших энергий на величину порядка $10\text{--}15$ эВ. Учитывая, что при данных измерениях плотность тока лежит около 1 А/м^2 , влияние пространственного заряда невелико, то, согласно моделированию, данный эффект можно объяснить тем, что из-за падения потенциала в отверстиях ячеек сеток трехсеточный зонд действительно сдвигает спектр в сторону больших энергий на величину до 11 эВ. Второе, спектр, измеренный апертурным зондом, шире на величину порядка 10 эВ. Уширение и сужение спектров в апертурном и трехсеточном зондах связано с эффектом вторичной электронной эмиссии. При этом, как было сказано в разд. 4, испытания доказали, что в апертурном зонде эффект вторичной электронной эмиссии может влиять на энергоспектр на величину до 1% , а влияние эффекта вторичной электронной эмиссии с коллектора в трехсеточном зонде было объяснено в разд. 3. Третье, оба зонда на большем угле к оси двигателя показывают рост ионов с более низкой энергией, что корректно и характерно для струи плазмы холловского двигателя.

5.3. Измерения энергетических спектров на периферии струи

Перейдем далее к измерению спектров на 45 и 60° к оси двигателя (рис. 21 и 22). Измерения обоими зондами показали преобладание в пучке

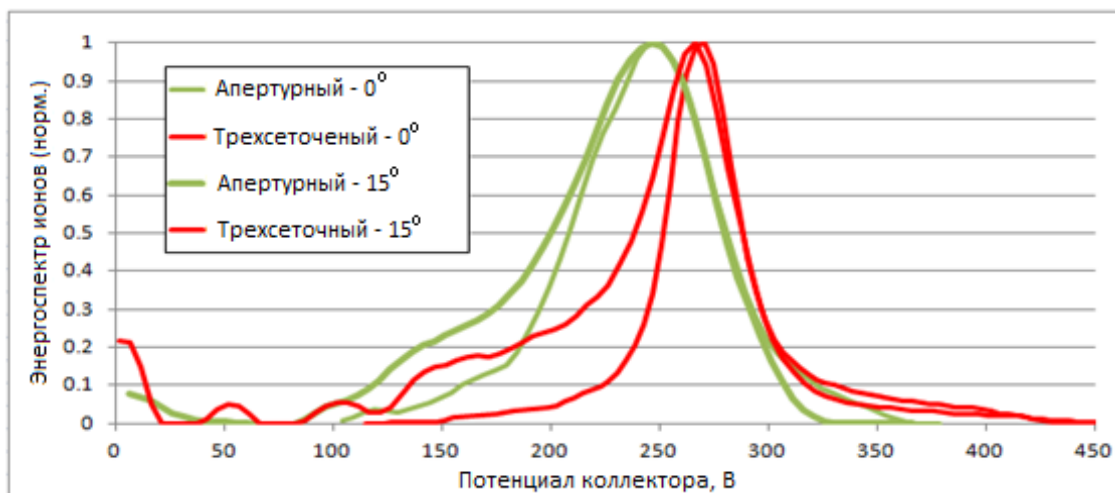


Рис. 19. Энергетические спектры в центре струи при напряжении разряда 300 В на углах 0 и 15° к оси двигателя.

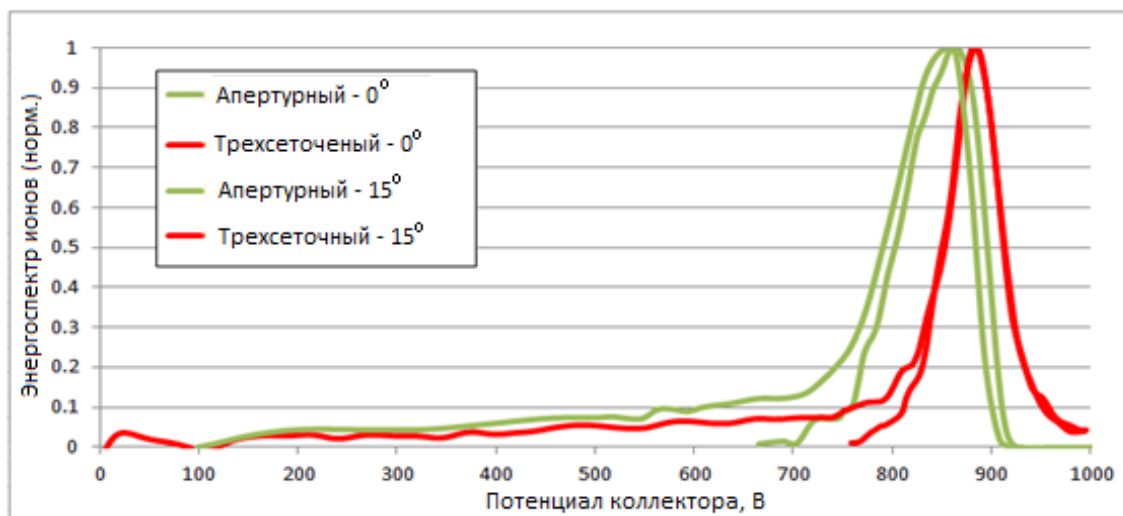


Рис. 20. Энергетические спектры в центре струи при напряжении разряда 900 В на углах 0 и 15° к оси двигателя.

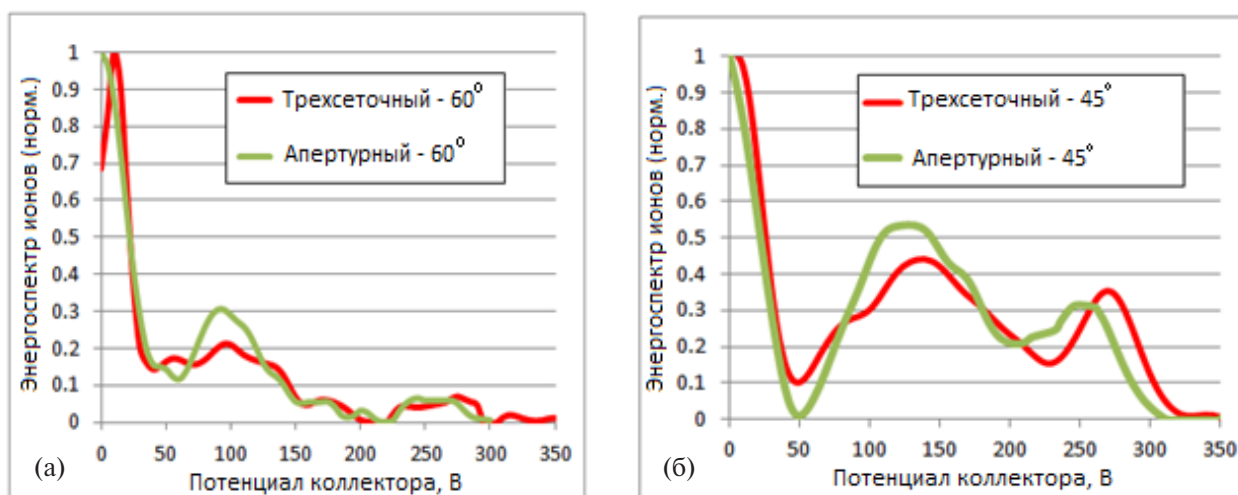


Рис. 21. Измерения при напряжении разряда 300 В, 45 и 60° к оси.

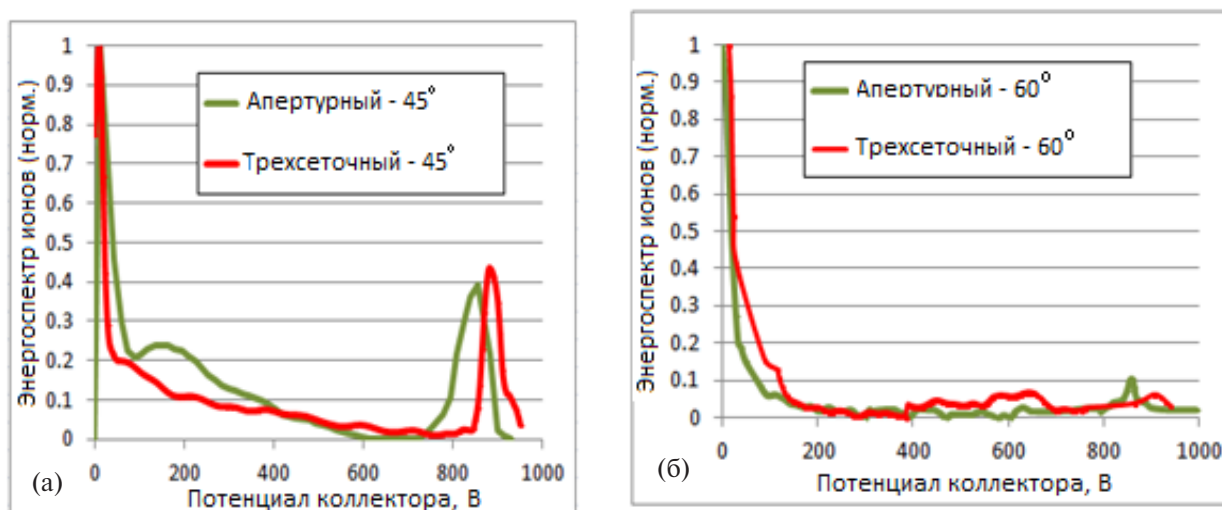


Рис. 22. Измеренные энергетические спектры при напряжении разряда 900 В на углах в 45 и 60° к оси.

ионов низкой энергии, что характерно для параметров плазменной струи на таких углах. При увеличении угла оба зонда показали уменьшение доли высокоэнергетичных ионов и увеличение доли низкоэнергетичных, что также корректно и характерно струи ХД. Учитывая погрешность измерений, оба зонда показали схожие результаты, отличия в определении энергетических пиков лежат в пределах погрешности трехсеточного зонда. В энергоспектрах, полученных на 60° оси двигателя, заметен более высокий уровень шумов у трехсеточного зонда, в сравнении с апертурным.

Для напряжения разряда 900 В и положении зондов на 60° к оси двигателя энергетические спектры, полученные обоими зондами, также адекватны. При этом апертурный зонд зафиксировал присутствие большей доли высокоэнергетичных ионов в струе, чем трехсеточный, что показывает большую устойчивость апертурного зонда к ненулевому углу падения ионного пучка на зонд (на периферии, несмотря на точность юстировки зондов, в любом случае существенная доля ионов имеет ненулевой угол падения на зонд).

Также обоими зондами измерен спектр на 80° к оси двигателя. Сначала следует обратить внимание на зависимость тока коллектора от задерживающего потенциала (рис. 23). При измерениях трехсеточным зондом ток коллектора изменялся от -0.1 до -1.3 мкА, а ток коллектора апертурного зонда менялся от 0.5 до 0 мкА. Из этого можно заключить, что в работу многосеточного зонда

вмешивалась вторичная электронная эмиссия с сеток на коллектор.

Восстановленные с данных измерений спектры (рис. 24) качественно отражали одинаковые распределения ионов по энергиям, показывали присутствие в струе значительной доли низкоэнергетичных ионов, учитывая очень слабый сигнал, но полученный трехсеточным зондом спектр оказался сильно зашумлен. Также спектр, восстановленный трехсеточным зондом, оказался уже, что может быть связано и с низкой прозрачностью зонда, и с утечками, и с вторичными электронами.

5.4. Измерения в плазме с высокой плотностью тока

Апертурный зонд также протестирован в струе холлового двигателя на расстоянии 0.5 м от двигателя с напряжением разряда 300 В. Измеренная плотность тока оказалась равна 40 А/м² и измеренный энергетический спектр корректны, учитывая режим работы двигателя (рис. 25). Также стоит отметить, что используемый трехсеточный зонд не предназначен для работы при плотностях токов больших 10 А/м², поэтому в этих режимах совместные испытания не проводились.

Подводя итоги испытаний, можно утверждать, что зонд апертурной конструкции работает корректно при энергиях ионов до 1000 эВ и плотностях токов до 40 А/м². В экспериментах, проведенных совместно с многосеточным зондом, были обнаружены различия в измеренных распределениях ионов по энергиям, которые объясняются

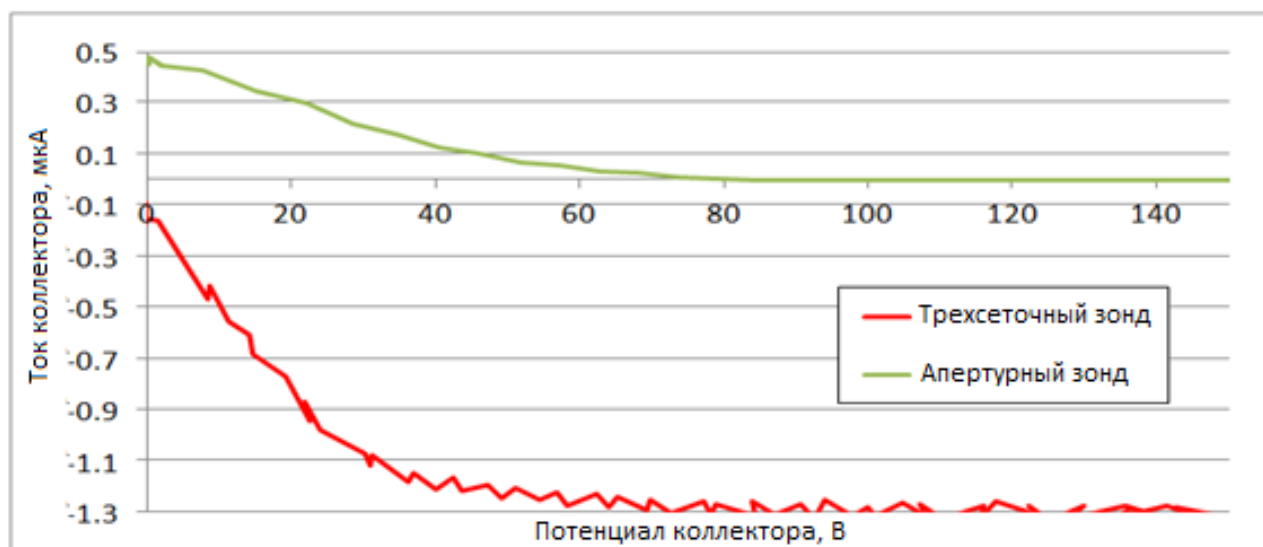


Рис. 23. Зависимости токов на коллекторе для многосеточного (снизу) и апертурного зондов (сверху).

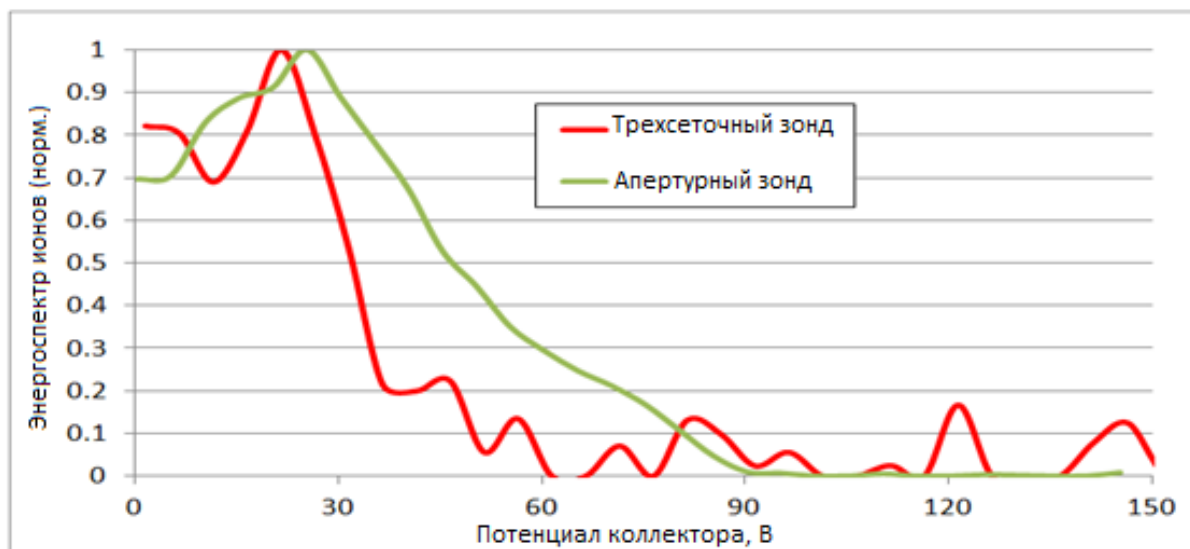


Рис. 24. Энергоспектры на 80°.

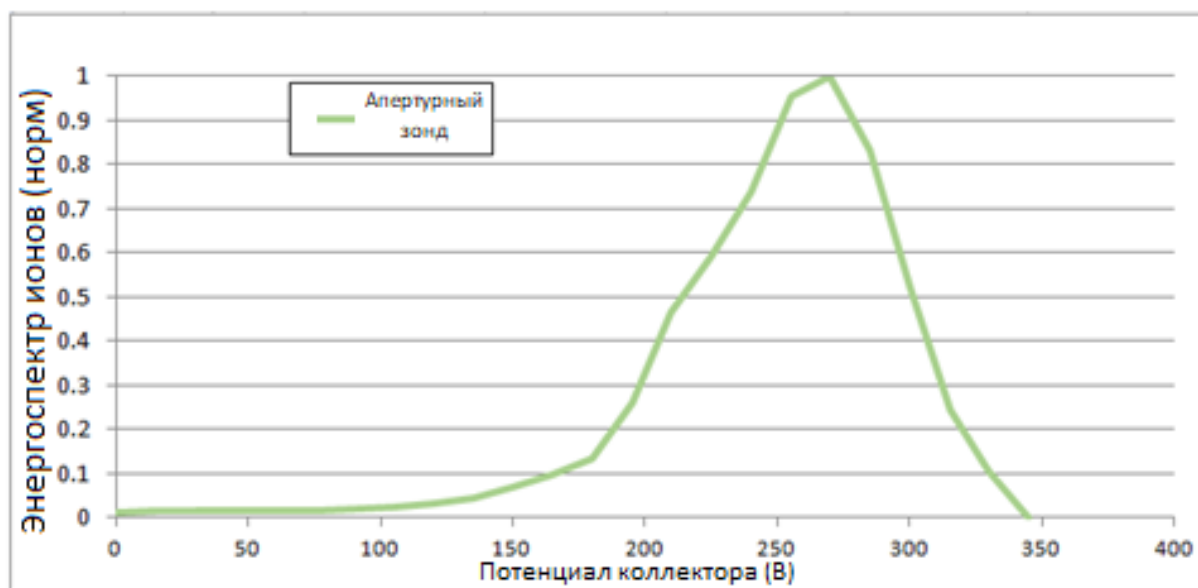


Рис. 25. Измеренные энергетические спектры при напряжении разряда 300 В и расстоянии 0.5 м до двигателя.

физическими явлениями внутри многосеточного зонда и подтверждаются моделированием. Отличия в измеренных спектрах оказались минимальными при экспериментах на углах в 45 и 60°, что соответствует диапазону плотностей токов от 0.05 до 0.5 А/м². При больших плотностях токов начинает влиять пространственный заряд и ухудшать работу многосеточного зонда, при меньших плотностях токов слишком низкий сигнал и слишком высокий разброс ионов по углу падения на зонд, что приводит к зашумленному

спектру и значительным сложностям в интерпретации результатов. При этом, апертурный зонд не имеет этих недостатков, что было показано как теоретически, так и моделированием. Следовательно, можно сделать вывод, что измеренные энергоспектры действительно отражают распределения ионов по энергиям для ионов с энергией до 1000 эВ с погрешностью меньше 2% для обоих зондов при плотностях токов до 10 А/м² и при плотности тока до 40 А/м² для апертурного зонда.

6. ВЫВОДЫ

Проведен подробный анализ преимуществ и недостатков нового апертурного зонда, разработанного для измерения энергетического спектра ионов и плотности ионного тока. Моделирование продемонстрировало существенные недостатки многосеточной конструкции зонда с задерживающим потенциалом при использовании в плазме с диапазоном плотностей токов от 10^{-4} до 100 А/м^2 . Многосеточный зонд, разработанный под плазму с определенным радиусом Дебая, не может работать корректно в плазме с радиусом Дебая отличающимся более, чем на порядок. При этом новый апертурный зонд теоретически способен работать при плотностях токов до 100 А/м^2 с погрешностью восстановления энергетического пика меньшей 2%. Корректность моделирования косвенно подтверждена экспериментальным определением оптимального ускоряющего потенциала зонда и расчетом величины вторичной электронной эмиссии. Апертурный и трехсеточный зонды протестированы совместно и выявленные отличия объясняются физическими эффектами, происходящими в трехсеточном зонде. Учитывая представленные в данной и предыдущей статьях результаты, можно сделать вывод, что апертурный зонд работает со стабильной погрешностью и прозрачностью в диапазоне плотностей токов от 10^{-4} до 50 А/м^2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lev D., Myers R.M., Lemmer K.M., Kolbeck J., Koizumi H., Polzin K. // *Acta Astronaut.* 2019. V. 159. P. 213.
2. Levchenko I., Xu S., Mazouffre S., Lev D., Pedrini D., Goebel D., Garrigues L., Taccogna F., Bazaka K. // *Phys. Plasmas.* 2020. V. 27. P. 020601.
3. Gong S., Li J. // *Sci. China Phys., Mechanics Astron.* 2014. V. 57. P. 521531.
4. Dale E., Jorns B., Gallimore A. // *Aerospace.* 2020. V. 7. P. 120.
5. Gorshkov O.A., Shagayda A.A. // *Tech. Phys. Lett.* 2008. V. 34. P. 153.
6. Trottenberg T., Bansemer F., Böttcher S., Feili D., Henkel H., Hesse M., Kersten H., Krüger T., Laube J., Lazurenko A., Sailer D., Schuster B., Seimetz L., Spethmann A., Weis S., Wimmer-Schweingruber R.F. // *EPJ Techniques and Instrumentation.* 2021. V. 8. P. 16.
7. Hutchinson H. *Principles of Plasma Diagnostics.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987.
8. Ya-li M., Fu-jun T., Yu-xiong X., Yi-feng C., Xin G., Yi W., Kai T., Ze-dong Y. // *Int. J. Mech., Aerosp., Ind., Mechatron. Manuf. Eng.* 2012. V. 6. P. 11.
9. Heubel E.V. *Enhancing Retarding Potential Analyzer Energy Measurements with Micro-Aligned Electrodes.* Massachusetts Institute of Technology, 2021.
10. Zhang Z., Tang H., Zhang Z., Wang J., Cao Sh. // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 123510.
11. Lemmer K.M., Gallimore A.D., Smith T.B., Austin D.R. // *IEPC-2007-161, 30th Internat. Electric Propulsion Confer.,* 2007.
12. Harmann H., Koch N., Kornfeld G. // *IEPC-2007-119, Internat. Electric Propulsion Confer.,* 2007.
13. Hey F.G., Vaupel M., Groll C., Braxmaier C., Tajmar M., Sell A., Eckert K., Weise D., Saks N., Johann U. // *IEPC-2017-271, 35th Internat. Electric Propulsion Confer.,* Atlanta, GA, 2017.
14. Maystrenko D., Shagayda A., Kravchenko D., Lovtsov A. // *Rev. Sci. Instrum.* 2022. V. 93. P. 073504.
15. Goebel D.M., Katz I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters.* Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008.
16. Shagayda A., Nikitin V., Tomilin D. // *Vacuum.* 2016. V. 123. P. 140.
17. Goebel D. M., Becatti G. // *Rev. Sci. Instrum.* 2021. V. 92. P. 013511.
18. Tomilin D., Lovtsov A. // *Electric Propulsion Confer., University of Vienna, Vienna, Austria September 15–20, 2019. IEPC-2019-342.*
19. Walker M.L.R., Hofer R.R., Gallimore A.D. // *J. Propulsion Power.* 2016. V. 22. P. 205.
20. Azziz Y., Martinez-Sanchez M. *Experimental and Theoretical Characterization of a Hall Thruster Plume.* Massachusetts Institute of Technology, 2007.

HIGH DYNAMIC RANGE RETARDING POTENTIAL ANALYZER OPERATION VERIFICATION

**D. A. Maystrenko^{a,b,*}, A. A. Shagayda^a, D. A. Kravchenko^a,
D. A. Tomilin^a, and M. Yu. Selivanov^a**

^a*Keldysh Research Center, Moscow, 125438 Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, 141701 Russia*

**e-mail: maystrenko.da@phystech.edu*

Probe diagnostics of ion energy distribution and ion current density in the plasma plume of electric propulsion is considered. A detailed numerical and experimental comparison is presented of a new, highdynamic range retarding potential analyzer (HDR RPA) and a conventional gridded RPA probe applied to a plume of a hall effect thruster (HET) operating in different modes. Simulations show the disadvantages of the gridded retarding potential analyzer design and the advantages of the HDR RPA. By means of numerical modeling, the peculiarities of using the HDR RPA are also investigated in detail and preliminary conclusions regarding the probe accuracy are drawn. The final part of the paper shows the results of joint tests of the two probes at those plasma parameters where the gridded probe works most accurately, with a confirmed maximum error of 5%.

Keywords: electric propulsion, hall thruster, plasma diagnosis, ion energy distribution, retarding potential, Analyzer