

## ОПТИМИЗАЦИЯ $E \times B$ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ИОНОВ В СТРУЕ ПЛАЗМЫ ХОЛЛОВСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. А. Майстренко<sup>1,2</sup>, А. А. Шагайда<sup>1</sup>, М. Ю. Селиванов<sup>1</sup>, А. С. Ловцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Россия, 125438, г. Москва, ул. Онежская, 8

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, 117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Электроракетные двигатели находят широкое применение на борту современных космических аппаратов. Для обеспечения эффективного использования таких двигателей особую важность имеют задачи, связанные с диагностикой струи плазмы двигателя. Измерение параметров плазмы струи позволяет как диагностировать работу самого двигателя и определить эффективность его работы, так и рассчитать влияние струи плазмы двигателя на бортовые устройства космических аппаратов. Одной из наиболее важных задач является исследование зарядового состава ионов в плазме струи электроракетных двигателей.

В статье представлено расчетное исследование методики измерения зарядового состава плазмы струи электроракетных двигателей холловского типа. Проведено моделирование работы зондов различной геометрии в струях плазмы холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В, рабочим телом которых является ксенон. С помощью расчетов показаны особенности работы указанной методики и подобрана оптимальная геометрия для исследования доли двухзарядных ионов в струе холловского двигателя.

**Ключевые слова:** электроракетный двигатель, холловский двигатель, диагностика плазмы, зарядовый состав ионов плазмы,  $E \times B$  зонд, моделирование ионных пучков.

**Для цитирования:** Майстренко Д. А., Шагайда А. А., Селиванов М. Ю., Ловцов А. С. Оптимизация  $E \times B$  методики для исследования зарядового состава ионов в струе плазмы холловских двигателей // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 100–107. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-100-107. EDN: CLUOTD.



© Майстренко Д. А., Шагайда А. А., Селиванов М. Ю., Ловцов А. С., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## OPTIMIZATION OF THE $E \times B$ METHOD FOR STUDYING THE CHARGE COMPOSITION OF IONS IN THE PLASMA JET OF HALL EFFECT THRUSTERS

D. A. Maystrenko<sup>1,2</sup>, A. A. Shagayda<sup>1</sup>, M. Yu. Selivanov<sup>1</sup>, A. S. Lovtsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Research Center, Russia, Moscow, Onezhskaya St., 8, 125438

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Russia, Moscow, Kerchenskaya St., 1 A, bld. 1, 117303

Electric propulsion rocket engines are widely used on board modern spacecraft. To ensure the efficient use of such engines, it is important to diagnose the plasma plume of the engine. Measuring the parameters of the plasma plume is used for the determining its efficiency, and calculating the impact of the engine plasma plume on the onboard devices of spacecraft. One of the most important tasks is to study the charge state composition of the ions in the plasma plume of an electric propulsion.

The article presents a computational study of the method for measuring the charge composition of the plasma plume of a Hall effect thruster. The operation of probes of various geometries in plasma plume of the Hall effect thruster with discharge voltages from 100 to 2000 V, the propellant of which is xenon, is simulated. Using calculations, the features of this technique are shown, and the optimal geometry is selected for studying the fraction of two-charge ions in the Hall effect thruster.



### Введение

Электроракетные двигатели (ЭРД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов (КА) [1–3]. Это связано, с одной стороны, с повышением требований к транспортным задачам в космосе, а с другой — с прогрессом в развитии средств бортовой энергетики. Такие достоинства, как высокий удельный импульс, малые массовые и габаритные характеристики, возможность регулирования величины тяги, делают применение ЭРД весьма перспективным.

Для обеспечения эффективного использования таких двигателей особую важность имеют задачи, связанные с диагностикой струи плазмы двигателя. Измерение параметров плазмы струи позволяет как диагностировать работу самого двигателя и определить эффективность его работы, так и рассчитать влияние струи плазмы двигателя на бортовые устройства космических аппаратов [4]. Одной из наиболее важных задач является исследование зарядового состава ионов в плазме струи ЭРД, работающей на ксеноне. Определение доли двух- и трехзарядных ионов позволяет делать вывод об эффективности процессов ионизации в газоразрядной камере ЭРД. Процесс многократной ионизации требует значительных затрат энергии и влечет за собой уменьшение общего КПД двигателя. Измерение доли многозарядных ионов в пучке позволяет объяснить и предсказать эффективность ионизации. Более того, измерение доли каждого типа ионов в струе двигателя позволяет учесть снижение тяги и более точно оценить эрозию распыляющихся элементов двигателя.

Для таких исследований в плазме ЭРД используют так называемый ЕЧВ зонд или фильтр Вина в англоязычной литературе [5]. Данный зонд использует скрещенные электрические и магнитные поля для разделения ионов по заряду. Основным недостатком такой конструкции является крайне слабый сигнал на коллекторе ионов до 100 нА в случае относительно плотной плазмы на расстоянии в нескольких десятках сантиметров от двигателя и порядка 1 нА в случае измерений в более отдаленной области, например, на расстоянии 1–1,5 м. Вторым существенным недостатком является зависимость спектрального разрешения зонда от энергии ионов в плазме.

В статье исследована возможность использования ЕЧВ зонда для измерения зарядового состава ионов в плазме холловских двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В, а также приведены результаты оптимизации геометрии зонда для решения данной задачи.

### Объект исследования

В струе плазмы ЭРД ионы, имеющие разную величину заряда и ускоренные одинаковой разностью

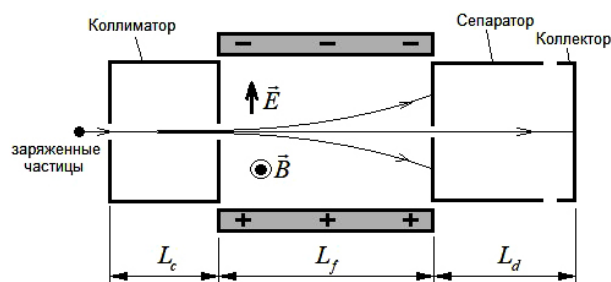


Рис. 1. Схема Е×В зонда  
Fig. 1. Wien filter scheme

потенциалов, имеют кратно разную скорость. Для сепарации ионов, имеющих разную скорость, в ЕЧВ зондах используются ортогональные электрическое и магнитное поля, перпендикулярные потоку влетающих в зонд частиц [6]. Схема зонда показана на рис. 1.

Типичная конструкция зонда включает в себя входную трубку — коллиматор, выходную трубку — сепаратор, и расположенную между ними зону фильтрации, в которой создается электрическое и перпендикулярное ему магнитное поле. Сила Лоренца, действующая на заряженную частицу в фильтре Вина, определяется выражением

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \cdot \vec{B}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  — напряженность электрического поля;  $\vec{B}$  — магнитная индукция;  $\vec{v}$  — скорость частицы;  $q$  — заряд частицы. В случае, когда электрическое и магнитное поля ортогональны, сила, действующая на частицу, движущуюся со скоростью

$$v = |\vec{E}|/|\vec{B}|, \quad (2)$$

равна нулю, и частица движется по прямой. Частицы, движущиеся с другими скоростями, отклоняются в ту или другую сторону. При этом осуществляется разделение ионов разных скоростей и, соответственно, разных зарядов [6].

Обычно магнитное поле создается постоянными магнитами, а электрическое варьируется. В результате измерений получается зависимость тока частиц, собранного коллектором, от электрического напряжения  $U$  между пластинами. В этой вольт-амперной характеристике (ВАХ) группы частиц с разными зарядами проявляются как максимумы тока. Пример получаемой характеристики приведен на рис. 2.

Самый высокий экстремум соответствует однозарядным ионам, следующие по высоте — двух- и трехзарядным. Анализ полученных спектров является непростой задачей, так как в холловских дви-

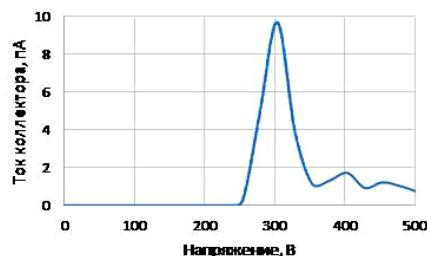


Рис. 2. Типичная вольт-амперная характеристика E×B зонда  
Fig. 2. Typical volt-ampere feature of the E×B probe

гателях (ХД) поток ионов каждой кратности имеет довольно широкое энергетическое распределение. В результате наряду с уширением происходит наложение и частичное перекрытие пиков, определяющих каждый вид ионов. Обычно положение пиков одно- и двухзарядных ионов отличается на несколько десятков вольт [7]. Например, ток, регистрируемый в диапазоне от 340 до 360 В на представленной выше ВАХ, скорее всего, складывается из токов как однозарядных, так и двухзарядных ионов. Подробно методы обработки ВАХ были проанализированы в работе [8].

Существует несколько конструктивных проблем, которые могут значительно влиять на точность и достоверность получаемых данных. Низкий сигнал из-за малой прозрачности зонда может затруднять регистрацию слабых компонентов плазмы, что особенно критично при анализе многозарядных ионов. Это требует либо увеличения времени измерений, либо применения более чувствительных детекторов, что усложняет эксперимент. Краевые эффекты электрического и магнитного полей вносят дополнительные погрешности в траектории ионов, искажая получаемые результаты, что может быть особенно заметно при работе с широкими пучками или при наличии значительной расходимости струи. Высокие требования к юстировке существенно усложняют процесс настройки ЕЧВ зонда. Даже незначительные отклонения оси зонда от направления движения ионов могут привести к смещению пиков в спектре, что требует тщательной калибровки и постоянного контроля положения зонда в ходе измерений. Ограниченное разрешение зонда проявляется в уширении зарядовых спектров, что затрудняет разделение близких по массе и заряду ионов. Это особенно критично при анализе многозарядных ионов, чьи пики могут перекрываться. Изменение магнитного поля при использовании постоянных магнитов из-за нагрева также снижает точность получаемых данных. Шумы и фоновые сигналы (например, от рассеянных частиц) усложняют выделение полезного сигнала, что делает необходимым применение фильтрации и статистических методов обработки данных.

В связи с этим для разработки зонда, предназначенного для исследования зарядового состава ионов в плазме ХД с напряжением разряда от 100 до 2000 В, в исследовании проведено моделирование работы и оптимизация размеров зонда с заданной конечной шириной энергоспектра ионов, учетом распределения электрического и магнитного полей и отклонения направления движения ионов от оси зонда. Учитывая возможности современной измерительной аппаратуры и присутствие высоковольт-

ных источников питания ХД мощностью до 20 кВт, для достижения требуемой точности измерений доли двухзарядных ионов в плазме ХД необходимо было обеспечить уровень сигнала однозарядных ионов больше 50 нА, а уровень сигнала двухзарядных ионов больше 10 нА.

### Методика моделирования

Численное моделирование потоков заряженных частиц внутри зонда проводилось при помощи программного обеспечения IOS-3D [9]. Данная программа предназначена для расчёта стационарных электрических полей и потоков заряженных и нейтральных частиц при заданном внешнем магнитном поле в трёхмерных областях с произвольной формой граничных поверхностей. Самосогласованное электрическое поле вычисляется путём решения уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \phi = -(\rho_i + \rho_e)/\epsilon_0, \quad (3)$$

где  $\phi$  — электрический потенциал;  $\rho_i$  и  $\rho_e$  — плотности заряда ионов и электронов;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная. На граничных поверхностях может быть задано одно из трех граничных условий: условие Дирихле с постоянным потенциалом; условие Неймана с нулевой производной потенциала по нормали к границе; условие трансляционной симметрии, при котором вектор трансляции должен быть параллелен одной из осей координат. Решение уравнения Пуассона выполняется методом конечных разностей на прямоугольной сетке с кусочно-постоянным шагом. Для вычисления объёмного заряда потоков заряженных частиц используется метод трубок тока с центральными траекториями, которые вычисляются с применением схемы Бёриса. Алгоритм извлечения ионов из плазменных источников с подвижной плазменной границей и с учётом концентрации и температуры плазменных электронов описан в работе [10]. Данное программное обеспечение успешно использовалось для решения самосогласованных задач при моделировании ионно-оптических систем ионных двигателей [10, 11] и зондов с задерживающим потенциалом [12].

В ходе моделирования проводится разбиение на элементарные треугольники поверхности расчётной области со стороны поступающего плазменного потока. На каждом треугольнике задаются граничные условия, характеризующие следующие параметры плазменной струи: плотность ионного тока; температуру электронов; распределение ионов по энергии; угол наклона ионного пучка по отношению к оси зонда; долю двухзарядных ионов. Из центра каждого треугольника выпускается группа трубок тока, аппроксимирующая заданные параметры плазменной струи. Внутри зонда задается постоянное магнитное поле. Расчёт электрического поля ведётся с учётом объёмного заряда ионов и плазменных электронов. Ток, приходящий на коллектор зонда, рассчитывается при различных напряжениях между пластинами, и, таким образом, восстанавливается ВАХ зонда.

При попадании ионов на поверхности коллиматора происходит выбивание электронов в результате ионно-электронной эмиссии. При энергиях ионов ксенона до 2000 эВ коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхностей коллиматоров не превышает 0,04 [13]. В проведённом исследовании предполагалось, что при электронных

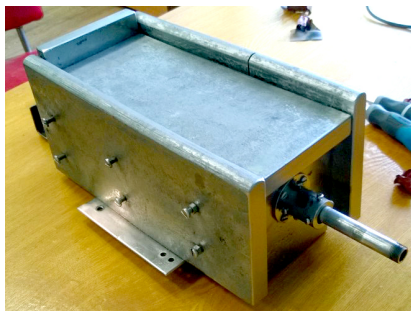


Рис. 3. Зонд для измерения зарядового состава струи ионных двигателей  
Fig. 3. Wien filter of the electric propulsion diagnosis

токах, составляющих несколько процентов от тока ионов, объёмный заряд электронов не оказывает заметного влияния на траектории ионов. Учёт этого влияния предполагается провести при дальнейшем совершенствовании численной модели.

При задании граничных условий со стороны плазмы пучка в модели использовались типичные значения концентрации и температуры электронов в струях холловских двигателей, которые были получены в многочисленных экспериментальных исследованиях с использованием зондов с задерживающим потенциалом, цилиндров Фарадея, зондов Ленгмюра и других средств диагностики плазмы [14, 15].

В качестве отправной точки при численной оптимизации была выбрана конструкция зонда, ко-

торый был ранее разработан в Исследовательском центре имени М. В. Келдыша для диагностики плазменных струй ионных двигателей. Эта конструкция была разработана по методу, описанному в работе Kim [16], с электродами, имеющими форму, предложенную в работе Hofer [8], и адаптирована для измерения доли двухзарядных ионов ионных двигателей с ускоряющим напряжением от 2000 до 4000 В. Внешний вид зонда представлен на рис. 3.

Входная трубка зонда имеет длину 200 мм и диаметр 7 мм; выходная трубка — 100 мм и 7 мм соответственно. Коллиматоры трубок имеют диаметр 2,5 мм; длина и ширина зоны фильтрации — 300 мм и 4 мм соответственно. Магнитное поле создается постоянными магнитами. Индукция на оси зонда в зоне фильтрации равна  $2000 \pm 15$  Гс.

Для верификации численной модели было представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными при использовании этого зонда в ходе диагностики параметров струи ионного двигателя. Измерения были проведены в струе ионного двигателя, у которого энергия однозарядных ионов известна с хорошей точностью и составляет  $2000 \pm 20$  эВ. Согласно данным, полученным при помощи цилиндра Фарадея, плотность ионного тока на входе в зонд была равна  $2,5 \text{ А/м}^2$ . Измеренная доля двухзарядных ионов составила 23 %.

В численной модели в качестве граничных условий были заданы параметры плазменного потока, соответствующего экспериментальным данным, а именно, был задан поток ионов с энергоспектром, имеющим на полувысоте ширину 20 эВ и пиком при

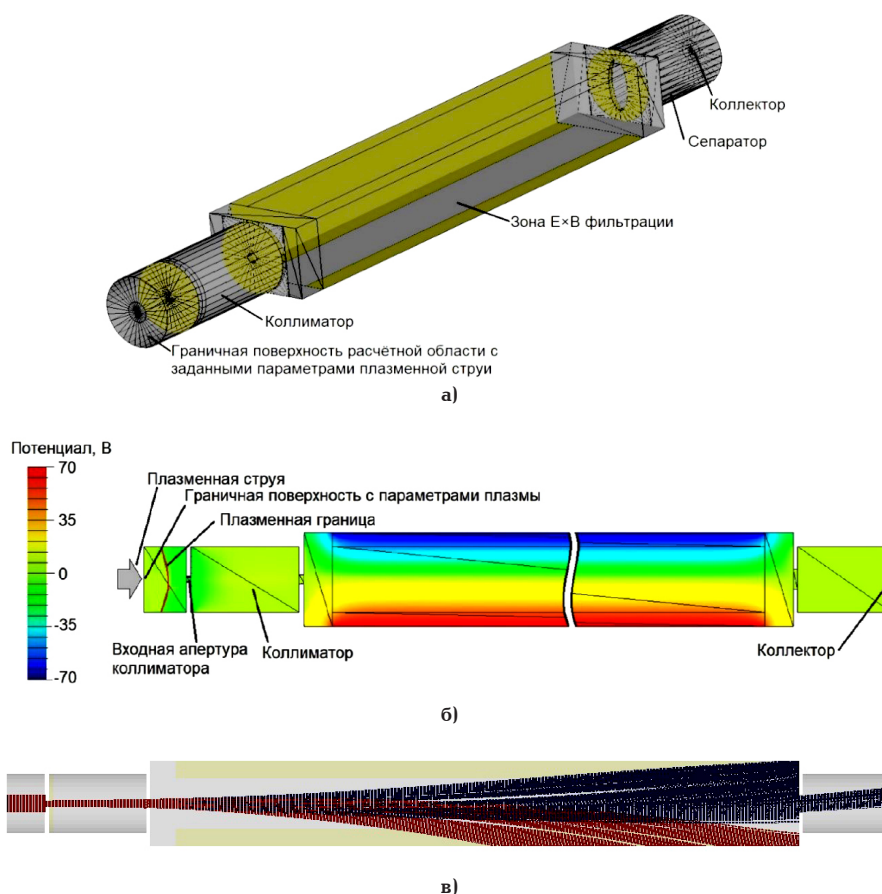


Рис. 4. Результаты моделирования зонда: а — трехмерная модель зонда; б — распределение потенциала; в — траектории двух групп ионов  
Fig. 4. Simulation results:  
a — 3D-model; б — potential distribution; в — trajectories of two ion groups



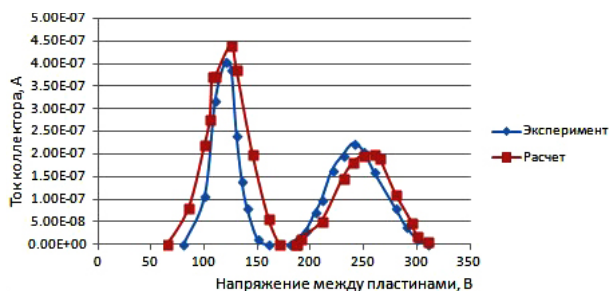


Рис. 5. Экспериментальная и рассчитанная ВАХ в струе ионного двигателя  
Fig. 5. Experimental and calculated Wien filter signal in the ion engine

2000 эВ. Температура плазменных электронов была задана равной 2 эВ, что является типичным значением для плазменных струй ионных двигателей [14, 15]. Изображение модели зонда с примером результатов моделирования показано на рис. 4.

В ходе численного моделирования последовательно изменялись значения напряжения на отклоняющих пластинах зоны фильтрации и рассчитывался ток ионов, поступающий на коллектор. В итоге была получена расчётная ВАХ зонда, представленная на рис. 5 вместе с экспериментально измеренной кривой.

Значения напряжения, при которых были получены максимумы тока одно- и двухзарядных ионов, в расчёте и эксперименте отличались с погрешностью менее 5 %. Доля тока двухзарядных ионов в мо-

дели составила 21 %, что подтвердило корректность расчетных данных. После этого была выполнена серия расчётов с целью оптимизации конструкции зонда для его использования при диагностике плазменных струй холловских двигателей с энергией ионов от 100 до 2000 В.

### Оптимизация конструкции Е×В зонда

Главным параметром, влияющим на разрешающую способность и погрешность зонда, является длина зоны фильтрации. При этом зона фильтрации является конструктивно наиболее сложным элементом зонда, поэтому целесообразно расчетным методом определить ее оптимальные характеристики. Длины входных и выходных трубок, как и диаметры отверстий коллиматоров, были заданы такими же, как и в исходной конструкции, успешно испытанной в струе ионных двигателей. Входная трубка имела длину 200 мм и диаметр 7 мм; выходная трубка — 100 мм и 7 мм соответственно. Диаметры коллиматорных трубок были заданы равными 2,5 мм, а длина зоны фильтрации (зоны скрещенных полей) варьировалась от 40 до 200 мм.

В качестве граничных условий на входе в зонд задавались потоки ионов, имеющих максимум при энергиях в диапазоне от 100 до 2000 эВ, соответствующим напряжению разряда ХД. Для энергоспектров плазменных потоков, измеренных вблизи оси струи на расстояниях от 1 до 2 м от холловского двигателя, характерная ширина на полувысоте составляет 5 % от максимальной энергии [15]. Суммарная плотность тока одно- и двухзарядных ионов

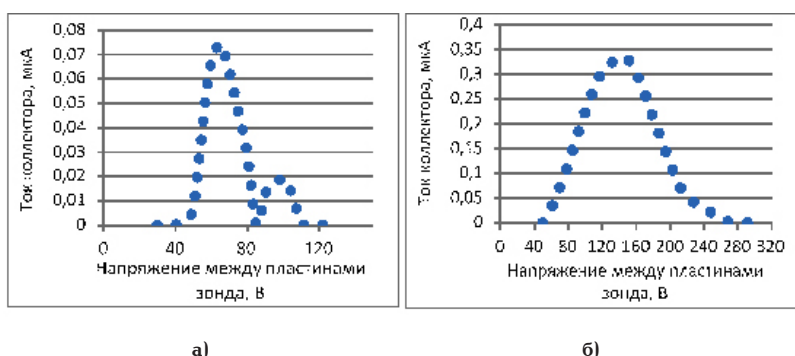


Рис. 6. Расчетная ВАХ зонда с длиной зоны фильтрации 40 мм: а — энергия однозарядных ионов 200 эВ; б — энергия однозарядных ионов 800 эВ  
Fig. 6. Calculated Wien filter signal with filtration zone length of 40mm:  
а — for the singly charged ions with 200 eV energy;  
б — for the double-charged ions with 800 eV energy

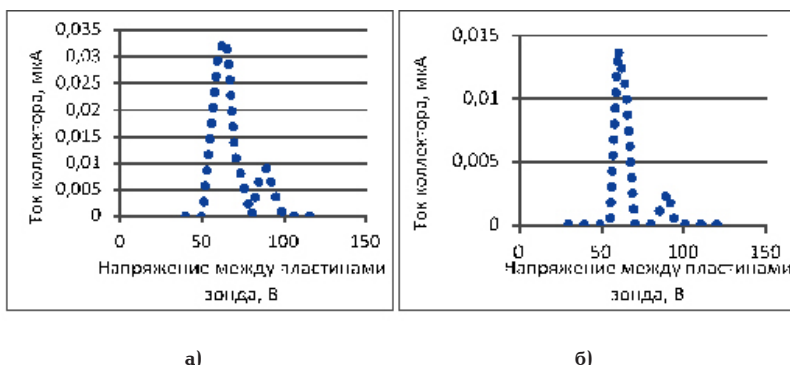


Рис. 7. Расчетная ВАХ при энергии однозарядных ионов 200 эВ с длиной зоны фильтрации: а — 100 мм; б — 200 мм  
Fig. 7. Calculated Wien filter signal for the singly charged ions with 200 eV energy:  
а — for the filtration zone of 100 mm; б — for the filtration zone of 200 mm

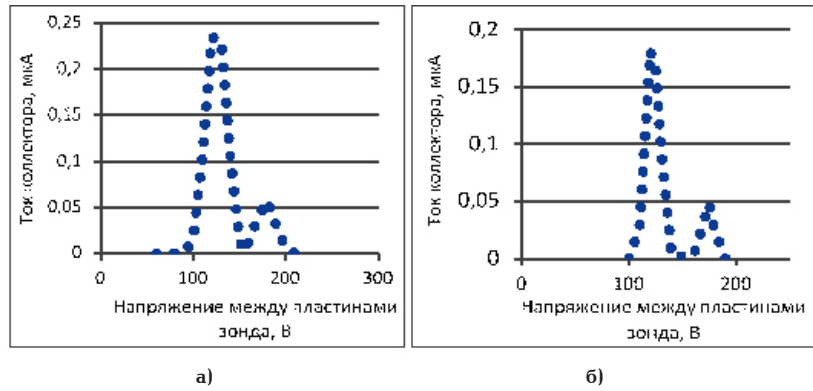


Рис. 8. Расчетная ВАХ при энергии однозарядных ионов 800 эВ с длиной зоны фильтрации: а — 100 мм; б — 200 мм  
Fig. 8. Calculated Wien filter signal for the singly charged ions with 800 eV energy: а — for the filtration zone of 100 mm; б — for the filtration zone of 200 mm

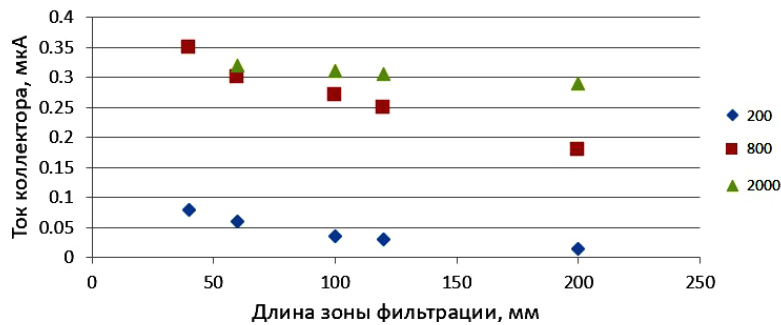


Рис. 9. Зависимость максимального тока однозарядных ионов от длины зоны фильтрации для трех значений энергии однозарядных ионов  
Fig. 9. Dependence of the maximum current of singly charged ions on the length of the filtration zone for three energy values of singly charged ions

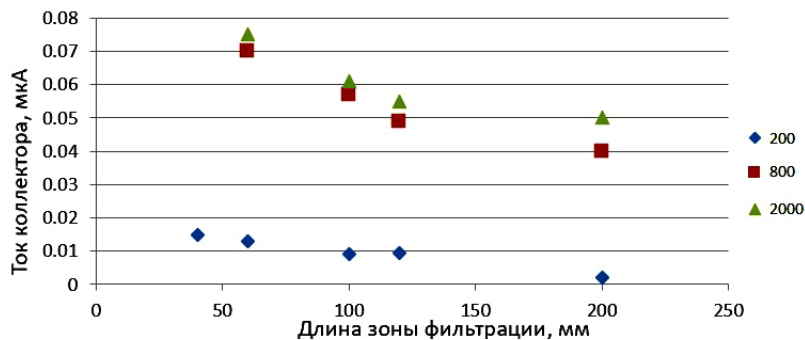


Рис. 10. Зависимость максимального тока двухзарядных ионов от длины зоны фильтрации для трех значений энергии однозарядных ионов  
Fig. 10. Dependence of the maximum current of double charged ions on the length of the filtration zone for three energy values of singly charged ions

задавалась равной  $1 \text{ A/m}^2$ , что соответствует типичным параметрам плазменной струи ХД мощностью 2500 Вт на расстоянии 2 м от двигателя.

Из теоретических соображений следует, что при уменьшении длины зонда растет уровень сигнала на коллекторе, но падает спектральное разрешение зонда. Учитывая указанные выше требования к уровню измеряемого тока, основная задача состояла в том, чтобы найти минимальную длину зоны фильтрации, при которой спектральное разрешение зонда позволит корректно восстановить по ВАХ зонда долю двухзарядных ионов.

Расчет ВАХ зонда был проведен для энергий однозарядных ионов в диапазоне от 100 до 2000 эВ

и для нескольких длин зоны фильтрации от 40 до 200 мм при фиксированной геометрии остальных элементов конструкции. При этом заданная доля двухзарядных ионов составляла 20 % и, соответственно, энергия двухзарядных ионов находилась в диапазоне от 200 до 4000 эВ.

На рис. 6 показаны рассчитанные ВАХ для зонда с длиной зоны фильтрации 40 мм при энергиях однозарядных ионов 200 и 800 эВ и соответствующей энергии двухзарядных ионов 400 и 1600 эВ.

Моделирование показало, что зонд с длиной зоны фильтрации 40 мм работает корректно только при низкой энергии ионов. При энергии однозарядных ионов 800 эВ и энергии двухзарядных ионов

1600 эВ пики ионов этих подгрупп оказались неразличимы. Причиной наложения двух пиков является перекрытие ионных потоков из-за их расходимости под действием объёмного заряда.

На рис. 7 показаны рассчитанные ВАХ для двух зондов с длиной зоны фильтрации 100 и 200 мм при энергии однозарядных ионов 200 эВ и энергии двухзарядных 400 эВ. На рис. 8 показаны рассчитанные ВАХ для двух зондов с длиной зоны фильтрации 100 и 200 мм при энергии однозарядных ионов 800 эВ и энергии двухзарядных 1600 эВ.

Можно видеть четко разделенные пики одно- и двухзарядных ионов при длинах зоны фильтрации и 100 мм, и 200 мм. Однако при энергии 200 эВ максимальный ток двухзарядных ионов более чем в 4 раза выше у зонда с зоной 100 мм, чем у зонда с зоной 200 мм.

На рис. 9 и 10 представлены результаты расчёта зависимости максимальных токов коллектора от длины зоны фильтрации при трёх значениях энергии однозарядных ионов.

Моделирование зондов с различной длиной зоны фильтрации показало, что минимально допустимая длина зоны фильтрации для обеспечения корректного разделения ионных пучков в струях двигателей с напряжением разряда от 100 до 2000 В равна 100 мм. Такая длина обеспечивает ток двухзарядных ионов на коллекторе на уровне 10 нА, что соответствует поставленным требованиям, а спектральное разрешение зонда оказывается достаточным для разделения пиков тока по вольт-амперной характеристике зонда.

### Выводы

Проведено расчетное исследование Е×В методики с учетом пространственного заряда и с заданием реальной плазмы струи холловского двигателя. Также была рассмотрена зависимость спектрального разрешения зонда и уровня измеряемого тока на коллекторе зонда от длины зоны фильтрации и энергии ионов пучка.

Исследование показало, что при увеличении энергии ионов для обеспечения требуемой разрешающей способности зонда необходимо увеличивать длину зоны фильтрации. С другой стороны, при увеличении этой длины происходит расфокусировка ионных пучков под действием пространственного заряда и снижение тока коллектора. Результаты численного моделирования показали, что для получения необходимого спектрального разрешения при напряжениях разряда исследуемого двигателя в диапазоне от 100 до 2000 В необходимо, чтобы длина зоны фильтрации была больше 100 мм. При этом при плотности тока в плазменной струе  $1 \text{ А/м}^2$  и длине зоны фильтрации 200 мм максимальный ток двухзарядных ионов оказывается в 4 раза меньше, чем при длине зоны фильтрации 100 мм, и равен примерно 2 нА, что в реальных испытаниях будет сравнимо с шумом.

В результате в работе с помощью моделирования показана зависимость спектрального разрешения Е×В зонда и уровня сигнала на коллекторе зонда от длины зоны фильтрации. Более того, показано, что для исследования зарядового состава плазмы струи ХД с напряжением разряда от 100 до 2000 эВ целесообразно выбрать длину зоны фильтрации 100 мм. При этом ожидаемый ток однозарядных ионов находится в пределах от 20 до 350 нА, а ожидаемый ток двухзарядных ионов составляет около 10 нА.

### Список источников / References

1. Lev D., Myers R. M., Lemmer K. M. [et al.]. The technological and commercial expansion of electric propulsion. *Acta Astronaut.* 2019. Vol. 159. P. 213–227. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.058.
2. Levchenko I., Xu S., Mazouffre S. [et al.]. Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion. *Physics of Plasmas.* 2020. Vol. 27. P. 020601. DOI: 10.1063/1.5109141.
3. Колганов И. В. Обзор электрических ракетных двигателей для двигательных установок малых космических аппаратов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 94–103. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-94-103. EDN: URYXIV.
4. Kolganov I. V. Obzor elektricheskikh raketnykh dvigateley dlya dvigatel'nykh ustanovok malyykh kosmicheskikh apparatov [Review of electric rocket engines for small spacecraft propulsion systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering.* 2025. Vol. 9, no. 2. P. 94–103. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-94-103. EDN: URYXIV. (In Russ.).
5. Gorshkov O. A., Shagayda A. A. Determining the efficiency of a plasma thruster with closed electron drift. *Technical Physics Letters.* 2008. Vol. 34. P. 153–155. DOI: 10.1134/S106378500802020X.
6. King L. B. Transport-property and mass spectral measurements in the plasma exhaust plume of a Hall-effect space propulsion system: Ph. D. Dissertation. University of Michigan, 1998. 262 p.
7. Hofer R. R., Gallimore A. D. Ion species fractions in the far-field plume of a high-specific impulse Hall thruster. *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.* 2003. DOI: 10.2514/6.2003-5001.
8. Кожевников В. В., Смирнов А. А., Смирнов П. Е., Черный И. А. Автоматизированная система диагностики параметров выходного пучка радиочастотного ионного двигателя // Труды МАИ. 2014. № 75. С. 11. EDN: SHCHMN.
9. Kozhevnikov V. V., Smirnov A. A., Smirnov P. E., Chernyy I. A. Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki parametrov vykhodnogo puchka radiochastotnogo ionnogo dvigatelya [Automated diagnostic system for parameters of the output beam of a radio frequency ion engine]. *Trudy MAI.* 2014. No. 75. P. 11. EDN: SHCHMN. (In Russ.).
10. Shastry R., Hofer R. R., Reid B. M., Gallimore A. D. Method for analyzing probe spectra from Hall thruster plumes. *The Review of Scientific Instruments.* 2009. Vol. 80. P. 063502. DOI: 10.1063/1.3152218.
11. Моделирование потоков заряженных частиц в ионно-оптических системах ионных двигателей (IOS-3D): программа для ЭВМ / Шарайда А. А. Москва: ФИПС, 2014. № 2014612703.
12. Modelirovaniye potokov zaryazhennykh chastits v ionno-opticheskikh sistemakh ionnykh dvigateley (IOS-3D): programma dlya EVM [Simulation of charged particle fluxes in ion-optical systems of ion engines (IOS-3D): computer program] / Shagayda A. A. Moscow, 2014. No. 2014612703. (In Russ.).
13. Shagayda A. A., Nikitin V., Tomilin D. A. Three-dimensional analysis of ion optics with misalignments of apertures. *Vacuum.* 2016. Vol. 123. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.vacuum.2015.10.030.
14. Shagayda A. A., Madeev S. Performance limits of ion extraction systems with non-circular apertures. *The Review of Scientific Instruments.* 2016. Vol. 87. P. 043301. DOI: 10.1063/1.4945565.
15. Maystrenko D. A., Shagayda A. A., Kravchenko D. A., Tomilin D. A. [et al.]. High dynamic range retarding potential analyzer operation verification. *Plasma Physics Reports.* 2024. Vol. 50. P. 1142–1157. DOI: 10.1134/S1063780X24601135.
16. Abroyan I. A., Ereemeev M. A., Petrov N. N. Excitation of electrons in solids by relatively slow atomic particles. *Soviet*

*Physics Uspekhi*. 1967. Vol. 10. P. 332–367. DOI: 10.3367/UFNr.0092.196705e.0105.

14. Yassir A. Experimental and theoretical characterization of a Hall thruster plume: Ph. D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2007. 231 p.

15. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of electric propulsion: Ion and Hall Thrusters. *JPL Space Science and Technology Series*. 2008. Vol. 493. DOI: 10.1002/9780470436448.

16. Sang-Wook K. Experimental investigations of plasma parameters and species-dependent ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a hall thruster: Ph. D. Dissertation. University of Michigan, 1999. 241 p.

**МАЙСТРЕНКО Дмитрий Александрович**, соискатель, научный сотрудник Исследовательского центра имени М. В. Келдыша, г. Москва; ассистент кафедры «Общая физика» Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Москва.

SPIN-код: 1964-5400

ORCID: 0000-0002-6434-6479

Адрес для переписки: maystrenko.da@phystech.edu

**ШАГАЙДА Андрей Александрович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Исследовательского центра имени М. В. Келдыша, г. Москва.

SPIN-код: 9025-3431

AuthorID (РИНЦ): 476323

ORCID: 0000-0002-3188-2195

ResearcherID: B-4816-2014

Адрес для переписки: shagayda@gmail.com

**СЕЛИВАНОВ Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, начальник отдела 120 Исследовательского центра имени М. В. Келдыша, г. Москва.

SPIN-код: 7024-4036

AuthorID (РИНЦ): 784220

ORCID: 0000-0001-9363-4376

Адрес для переписки: selivanov@kerc.msc.ru

**ЛОВЦОВ Александр Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора по космическим аппаратам и энергетике Исследовательского центра имени М. В. Келдыша, г. Москва.

SPIN-код: 6120-4207

AuthorID (РИНЦ): 369460

ORCID: 0000-0001-6047-7378

ResearcherID: B-2701-2014

Адрес для переписки: lovtsov@kerc.msk.ru

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 10.11.2025.

**MAYSTRENKO Dmitry Alexandrovich**, Applicant, Researcher, Keldysh Research Centre, Moscow; Assistant at the General Physics Department, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow.

SPIN-code: 1964-5400

ORCID: 0000-0002-6434-6479

Correspondence address: maystrenko.da@phystech.edu

**SHAGAYDA Andrey Alexandrovich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Keldysh Research Centre, Moscow.

SPIN-code: 9025-3431

AuthorID (RSCI): 476323

ORCID: 0000-0002-3188-2195

ResearcherID: B-4816-2014

Correspondence address: shagayda@gmail.com

**SELIVANOV Michael Yurievich**, Candidate of Technical Sciences, Head of the 120 Department, Keldysh Research Centre, Moscow.

SPIN-code: 7024-4036

AuthorID (RSCI): 784220

ORCID: 0000-0001-9363-4376

Correspondence address: selivanov@kerc.msc.ru

**LOVTSOV Alexander Sergeevich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director General for Spacecraft and Energy, Keldysh Research Centre, Moscow.

SPIN-code: 6120-4207

AuthorID (RSCI): 369460

ORCID: 0000-0001-6047-7378

ResearcherID: B-2701-2014

Correspondence address: lovtsov@kerc.msk.ru

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 18.08.2025; approved after reviewing 06.11.2025; accepted for publication 10.11.2025.