

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Высшая инженерно-физическая школа

**Методы регистрации и моделирования физических процессов в ионно-
плазменных и оптических модулях космических аппаратов**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Выполнил аспирант гр. 3460301/60401

Дюбо Д.Б.

Направление: 03.06.01- физика и астрономия

Направленность 03.06.01_04 Физическая электроника

Руководитель

д.ф.-м.н., профессор

Цыбин О.Ю.

Санкт-Петербург

2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВИФШ:

– Журихина В.В.

д.ф.-м.н., доцент

Научный руководитель:

– Цыбин О.Ю.

д.ф.-м.н., профессор

Рецензент:

– Гончаров П.С.,

к.ф.-м.н., начальник отдела

(научно-исследовательского)

военного института (научно-

исследовательского) ВКА им.

Можайского.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Актуальными являются выполненные в данной работе физические исследования и методические разработки, направленные на создание электроракетных двигателей в комплексе с бортовой автоматизированной и телекоммуникационной системой управления для космических аппаратов нового поколения.

Цель и задачи исследования

Цель данной работы: методическое обеспечение исследований оптических, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов для разработки электроракетных двигателей космических аппаратов нового поколения.

Задачи работы:

1. Сравнительный анализ и выбор компьютерных программных пакетов для исследований оптических, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов.
2. Тестирование пакетов компьютерных программ COMSOL и CST Studio для исследований в семействе выбранных лабораторных образцов.
3. Адаптация и применение пакетов компьютерных программ COMSOL и CST Studio для исследований оптических, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов в семействе выбранных лабораторных образцов в соответствии с целью работы.
4. Целевое получение экспериментальных и аналитических теоретических результатов для выбранных лабораторных образцов, и верификация на этой основе проводимых компьютерных исследований.
5. Формирование обобщенной методики исследований оптических, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов для разработки электроракетных двигателей космических аппаратов нового поколения.

6. Рекомендации по применению развитой методики для исследований физических процессов в перспективных разработках электроракетных двигателей нового поколения.

Научная новизна

Обобщенная методика исследований оптических, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов для разработки электроракетных двигателей космических аппаратов нового поколения;

Способы применения развитой методики для исследований физических процессов в перспективных разработках электроракетных двигателей нового поколения.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическую и практическую значимость имеют рекомендации по применению развитой методики для исследований физических процессов в перспективных разработках электроракетных двигателей нового поколения.

Апробация работы

Доклады на конференциях:

1. The 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems NEW2AN 2017, <http://www.new2an.org/>, August 28 - 30, 2017, St. Petersburg, Russia, NANO COMMUNICATION DEVICE WITH AN EMBEDDED MOLECULAR FILM: ELECTROMAGNETIC SIGNALS INTEGRATION WITH DYNAMIC OPERATION PHOTODETECTOR
2. The 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced, Networks and Systems NEW2AN 2018, <http://www.new2an.org/>, August 29 - 31, 2018, St. Petersburg, Russia, Nanocommunication System with a Laser Activated Molecular Film
3. 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, 2018, PIN Diode-Triode with Embedded Gate-Control Potential Barrier: Surface Charge Effects
4. 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 2019, Semiconductor Sensor with Embedded Gate-control Potential Barriers
5. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2020) which took place in Saint Petersburg (Russia) from July 10 to July 11, 2020, Plasma thrusters for in space propulsion; new trends and physical limitations

Теоретические результаты использованы при подготовке лабораторных образцов и проведении их экспериментальных исследований в ВКА им. Можайского в 2019 году.

Представление научного доклада: основные положения

В соответствии с целью работы развиты методы регистрации и моделирования физических процессов в ионно-плазменных и оптических модулях космических аппаратов:

1. Разработанный метод компьютерного моделирования с помощью адаптированного пакета COMSOL может быть обоснованно и эффективно использован для исследования электронно-физических процессов в бортовых фотосенсорах на основе полупроводниковых пин диодов.
2. Адаптация пакета CST состоит в его совмещении с разработанным алгоритмом вычисления механических параметров, процессов нейтрализации и фоторегистрации в ионных двигателях.
3. Разработанный метод компьютерного моделирования с помощью адаптированного пакета CST может быть обоснованно и эффективно использован для исследования фотосенсорных, электронных, ионных и ионно-плазменных процессов в ионных двигателях космических аппаратов.
4. Обобщенный метод компьютерного моделирования с помощью разработанных адаптированных пакетов CST и COMSOL может быть обоснованно и эффективно использован при разработке ионных двигателей космических аппаратов нового поколения, в том числе с альтернативными РТ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты и методы исследования

1. Натурные, экспериментальные, в больших вакуумных установках

Одна из целей данной работы – построить электродинамический алгоритм, определяющий механические параметры и объединенный с компьютерным моделированием в пакете CST, для установления указанных выше связей. Кроме того, стояла задача применения разработанного аппарата для исследований физических процессов в ионных и ионно-плазменных ЭРД. Для реализации новой разработки требуется большой объем экспериментальных исследований, проводимых в наземных лабораториях. Важное место в таких исследованиях должны занимать поверхностная ионизация в сочетании с реализацией и диагностикой комплекса ионно-плазменных процессов.

Наземные испытания образцов ЭРД космических аппаратов в процессе их разработки осуществляются в вакуумных установках большого объема с высокой скоростью откачки. К ним относится установка ВУ-М с вакуумным объемом $2,4 \text{ м}^3$ ($1 \cdot 10^{-3}$ Па) в ВКА имени А.Ф. Можайского [1] [2]. С использованием этой установки проведен цикл совместных исследований рабочей группой организаций ВКА имени А.Ф. Можайского – СПбПУ Петра Великого. Выполнены измерения характеристик и теоретический анализ, в том числе методом компьютерного моделирования, физических процессов, а также рабочих параметров лабораторных образцов ионных и ионно-плазменных ускорителей для электрических ракетных двигателей космических аппаратов. В вакуумной камере обеспечены необходимые процессы, методы и средства измерений, параметры и режимы работы ионных ускорителей. Определено, что реализованные и тестируемые ионно-физические характеристики лабораторных образцов с контактной ионизацией могут соответствовать задачам разработки перспективных электрических ракетных двигателей. Моделирование отрабатывалось на примере конкретной

практической модели, разработанной в лаборатории и прошедшей практическое тестирование в вакуумной камере на исследовательском стенде.

На Рис. 1. показано фотографическое изображение, полученное и опубликованное в [3], тестируемого простого двухэлектродного экспериментального образца, соответствующего схеме на Рис. 2. Обозначены: 1 – электрод с микропористым газовым распределителем-ионизатором, 2 – ионно-плазменный поток, 3 – электрод-формирователь электрического поля.

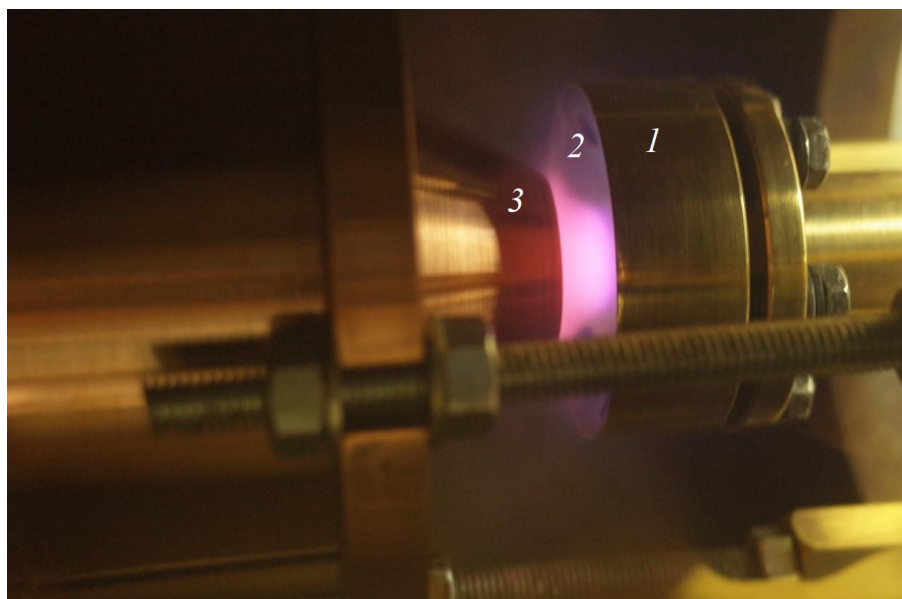


Рис. 1. Фотографическое изображение тестируемого простого двухэлектродного экспериментального образца [3]. Обозначены: 1 – электрод с микропористым газовым распределителем-ионизатором, 2 – ионно-плазменный поток, 3 – электрод-формирователь электрического поля.

Конструкция тестируемого прибора основана на поверхностной, или контактной, ионизации в модуле инжекции потока ионов в ускорительную секцию. Ионизация с образованием положительно или отрицательно заряженных частиц происходит за счет туннелирования электрона от нейтральной частицы к поверхности или в обратном направлении. В экспериментальном образце использован структурированный микропористый газовый распределитель-ионизатор с плоской электропроводящей поверхностью (1, Рис. 1), изготовленный в соответствии с [4]. Инжектор ионов, с поверхности которого инжектируется излучающий видимый свет

ионный поток, на рисунке расположен справа. Кроме эффективной генерации ионного потока и плазмы, такая форма пространственно-развитой поверхности ионизатора позволила реализовать фокусировку ионного потока в электростатическом поле ускорителя. Электроды 1 и 3 изготовлены из меди. Диаметр газового распределителя-ионизатора составлял 25 мм, межэлектродный зазор между электродами 1 и 3 (Рис. 1.) устанавливали в пределах 2-20 мм.

Измеряемые значения параметров экспериментального образца сравнивали с полученными результатами компьютерного моделирования, а также с известными типичными значениями для лучших современных устройств.

Блок-схема лабораторного образца ионного двигателя включает камеру с запасенным рабочим телом, ионизатор рабочего тела и ионный инжектор, электронно-механический ускоритель, и нейтрализатор.

Типовая блок-схема одноступенчатого линейного ускорителя прямого действия и электрическая схема измерений представлены на Рис. 2. Ионизованный газовый поток РТ инжектируется через ионизатор 1 в ускорительный зазор 4. В нем формируется дрейфовый ток 5 ускоряемых ионов. Ионы притягиваются кулоновской силой к зарядам, индуцированным на сетках 1 и 2. За счет этого создаются ускорение ионов и сила тяги. Ускоренные ионы нейтрализуются в нейтрализаторе 7, после чего эти частицы силу тяги больше не создают и расширяются в вакуумный объем в виде факела 8. Мощность источника 10 вкладывается в ионный поток в зазоре 4, и затем в виде потока кинетической энергии уносится факелом нейтральных частиц.

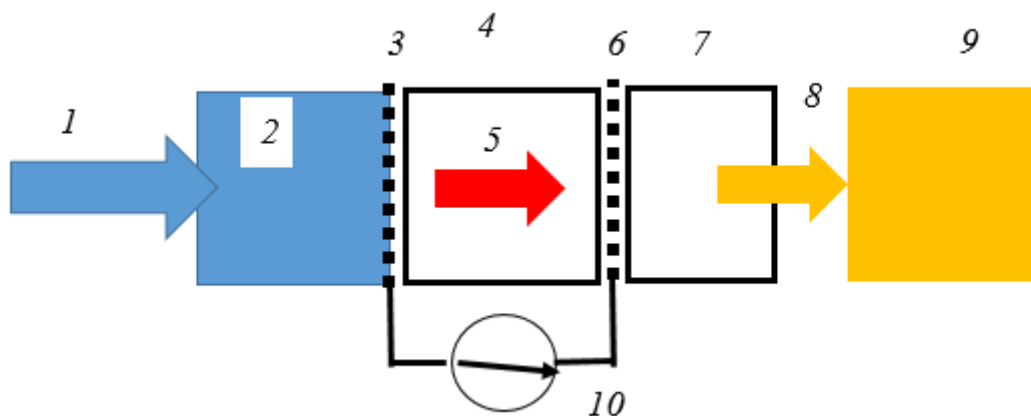


Рис. 2. Упрощенная блок-схема экспериментального образца и электрическая схема измерений (при получении катионов). Обозначены: 1- газовый поток РТ; 2- ионизатор; 3-сетка 1 инжектора ионов; 4- ускорительный зазор; 5- дрейфовый ток ионов в ускорительном зазоре; 6 - выходная сетка 2 (диафрагма); 7 – нейтрализатор; 8 – факел нейтральных частиц; 9- измеритель импульса факела; 10- источник ЭДС. [3]

В ускорителе создается механическая тяга за счет кулоновского взаимодействия движущихся ускоряемых ионов с поверхностными зарядами на электродах. В нейтрализаторе создается облако электронов в виде виртуального катода, компенсирующее заряд ионов, что предотвращает зарядку корпуса летательного аппарата. Факел нейтрализованных частиц выбрасывается в окружающее пространство с высокими скоростями до десятков км/с, что позволяет экономить топливо.

2. Компьютерное моделирование ионного двигателя

Заданная исходная модель ионного двигателя, разработанного в лаборатории состоит из следующих элементов:

- Поверхностный ионизатор с развитой площадью на основе новых физических принципов и техники. В предварительных экспериментальных исследованиях на альтернативных видах рабочего тела обеспечивал плотность ионного тока до 0.5 A/cm^2 .

- Секционированный ионный электронно-механический ускоритель, разработанный в лаборатории на основе новых теоретических представлений о формировании силы тяги и процессов нейтрализации.

- Электронный нейтрализатор ускоренных катионов, впервые построенный по принципу вложенных пучков и виртуального катода, позволял исключить массивный энергоемкий источник магнитного поля.

Требовалось найти условия, при которых электронный поток создает потенциальную яму для ионов. Время нейтрализации с учетом кулоновского взаимодействия должно превышать пролетное время жизни иона в этой потенциальной яме.

Предварительно было определено, что выбранный для выполнения данной работы CST пакет имеет ряд преимуществ перед другими известными.

Принципиальное достоинство CST состоит в том, что она позволяет анализировать потоки частиц в ионных источниках с учетом поля объемного заряда. В данной работе методика состояла в получении траекторных изображений и характеристик физических процессов: распределения скоростей частиц, полей и потенциалов, зарядов и токов, с учетом собственного поля. В компьютерной CST-модели, объединенной с электродинамическим алгоритмом, мы прежде всего проанализировали ионные траектории в однокаскадных и многокаскадных ускорителях прямого действия в неоднородных полях, с учетом зарядов поляризации и объемного заряда, который образуется в ходе движения потока заряженных частиц. Программный пакет трехмерного моделирования, разработанный компанией “Computer Simulation Technology” (CST, www.cst.com), позволяет эффективно осуществлять траекторный анализ различных электронных и ионных устройств с учетом собственного электрического поля объемного заряда [5] [6]. Однако в известных источниках не представлено применение CST-кодов для исследования и проектирования ионных и ионно-плазменных ЭРД. Несмотря на большое значение комплекса микроскопических силовых характеристик, электродинамические модели и расчеты механических процессов в ускорителях недостаточно развиты, что сдерживает проектирование новых устройств. В известных источниках не представлено описания зависимостей силы тяги от координат, от формы электродов и

режимов работы ускорителя, а также от других параметров. Обычно принимают упрощенно, безотносительно к элементам конструкции, что сила тяги может быть выражена через параметры факела в виде

$$F_f = v_{in}(dm_w/dt) \quad (1),$$

где dm_w/dt – поток массы рабочего тела m_w в нейтрализованном факеле, t – время; v_{in} – скорость нейтральной частицы в факеле.

При этом значения величин dm_w/dt не являются измеряемыми. Результирующую силу тяги F_f электростатического ионного и ионно-плазменного двигателя записывают через ток I и напряжение U_d для ионов массой μ и зарядом q в ускорительном зазоре:

$$F_f = I[2U_d(\mu/q)]^{1/2} \quad (2).$$

Принимается, что поле ионов на выходе из ускорителя равно нулю, поток и скорость частиц в факеле равны таким же величинам в ускорителе и не изменяются в нейтрализаторе; принимается, что нейтрализация имеет 100%-ю эффективность, в камере ускорения отсутствуют частицы с зарядом противоположного знака, ионы не имеют поперечных компонентов скоростей, отсутствуют потери ионов, столкновения и перезарядка и т. п.

При таком упрощении неточно учитываются ионно-оптические свойства инжектора, ускорителя и нейтрализатора, и связанные с ними микроскопические процессы генерации механических сил. В общем, точность приведенных выше формул требует изучения и оценок.

Подобно методу Монте-Карло и некоторым другим аналогичным пакетам компьютерных программ, в пакете CST не могут быть выявлены связи механических сил, действующих в ионных ускорителях, с внутренними микроскопическими процессами.

Одна из целей данной работы – построить электродинамический алгоритм, определяющий механические параметры и объединенный с компьютерным моделированием в пакете CST, для установления указанных выше связей. Кроме того, стояла задача применения разработанного аппарата для исследований физических процессов в ионных и ионно-плазменных ЭРД.

Кроме того, стояла задача применения разработанного аппарата для исследований физических процессов в ионных и ионно-плазменных ЭРД.

3. Экспериментальная установка с фотодетектором

Экспериментальная установка состояла из светозащищенного термостата, в котором установлен термопарный детектор с тепловым контактом с диодом. Время самопереключения диод измерялся с помощью программируемой компьютером микроэлектронной схемы, и контролируется цифровым осциллографом Tektronix TDS684 одновременно, чтобы избежать влияние температуры контура. Короткий импульс прямого смещения при переключении с обратного смещения создает прямой ток после существенной задержки времени τ_{trig} в микросекундах-миллисекундах. Задержка по времени τ_{trig} зависит от поглощенного излучения. Согласно предложенной модели постоянный ток включается при определенном количестве электронов N_{crit} , накопленных под затвором в зоне барьера [7] [8]. Время задержки определяется следующим образом: $\tau_{trig} = N_{crit} (G + G_{dark} \lambda)$. G - коэффициент, пропорциональный поглощенной мощности света, G_{dark} - коэффициент самогенерации или темнового тока. Зависимость обратного времени срабатывания $1/\tau_{trig}$ от мощности падающего света, согласно такой оценке, является линейной функцией. Критическим параметром, имеющим принципиальное значение, является температурная зависимость самозапуска, вызванная только темновым током [9], в отсутствие света. Темновой ток формируется за счет тепловой генерации электронно-дырочных пар в подложке ($I_{thermal}$) и утечка катода на анод.

Результаты и их обсуждение

1. Результаты моделирования двигателей

На начальном этапе производилась верификация методики моделирования.

Верификация путем сопоставления:

- с данными в литературных источниках

- аналитическими вычислениями, например, в плоской геометрии электродов, и др.; (Осуществляли контрольные вычисления в тех случаях, когда можно применить аналитику, например, ток насыщения с законом $3/2$ и затем в других различных сопоставимых моделях.)
- с параллельными независимыми вычислениями в CST;
- с данными экспериментов, в которых испытывается подобный прибор.

CST, как и другие существующие пакеты компьютерных программ, не позволяет определять ионно-электронные процессы непосредственно в модулях ионных двигателей, в том числе в ускорителях, нейтрализаторах, а также вычислять тяговые характеристики.

Разработанная в лаборатории теория определяла требования к компьютерной модели для построения алгоритма тяги и алгоритма нейтрализации.

Для реализации алгоритмов определения силы тяги и нейтрализации, определения $E(z)$ и $dQ(z)$, в области потоков ионов и электронов устанавливали мониторы. Применение мониторов. С их помощью определяли зависимости от координат полного заряда, поля, скорости с учетом индуцированных зарядов.

Эта конструкция обсчитывалась при разных размерах и напряжениях внешних источников, удельной массе ионов, токовых режимах. Определялись характеристики ионных и электронных траекторий, совмещенных в ускорителе и нейтрализаторе. Оценивались возможности совмещения и выполнения заданных функций, реализации комплекса ионно-электронных процессов в едином процессе, создание виртуального электронного катода

2. Сопоставление данных моделирования с аналитическими данными

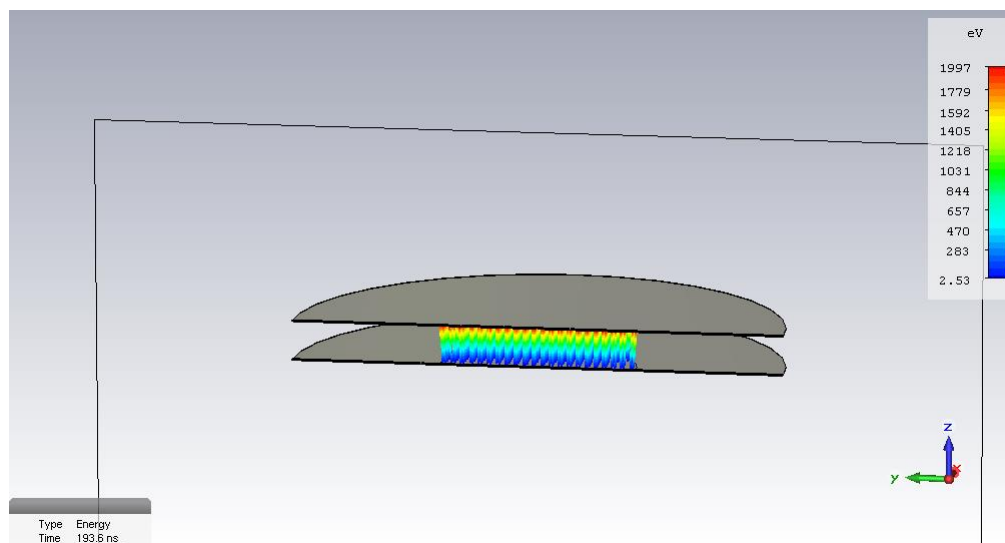
Типичные зависимости электронно-физических и механических параметров от координат и режимов работы для моделей плоских электродов с использованием ионов ксенона представлены на рис.

Для приведенных примеров были выбраны следующие параметры двухэлектродных моделей: напряжение U_d между пластинами – до 2 кВ,

диаметр ионного потока – 20 мм, область расчета превышает размеры конструкции на 20 мм в каждом направлении пространства, расстояние между пластинами $d = 4$ мм, толщина пластин 0.1 мм, положение виртуального катода 0.02, площадь эмиссии $S = 314$ мм².

На рисунках показаны расчетные характеристики аналитических (для режима ОТПЗ ионов) и численных расчетов.

а)



б)

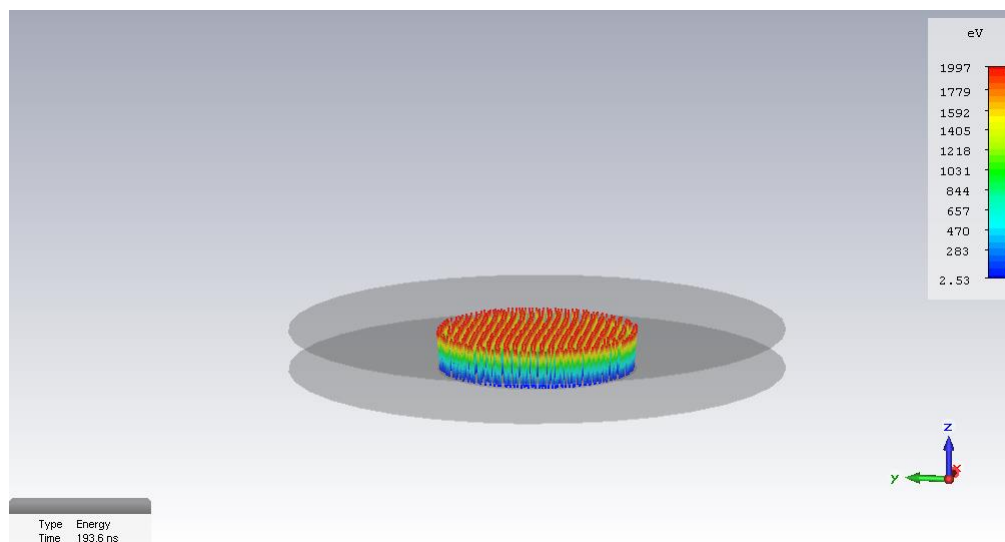


Рис. 3. Траектории ионов. Вид в сечении (а), полный вид (б).

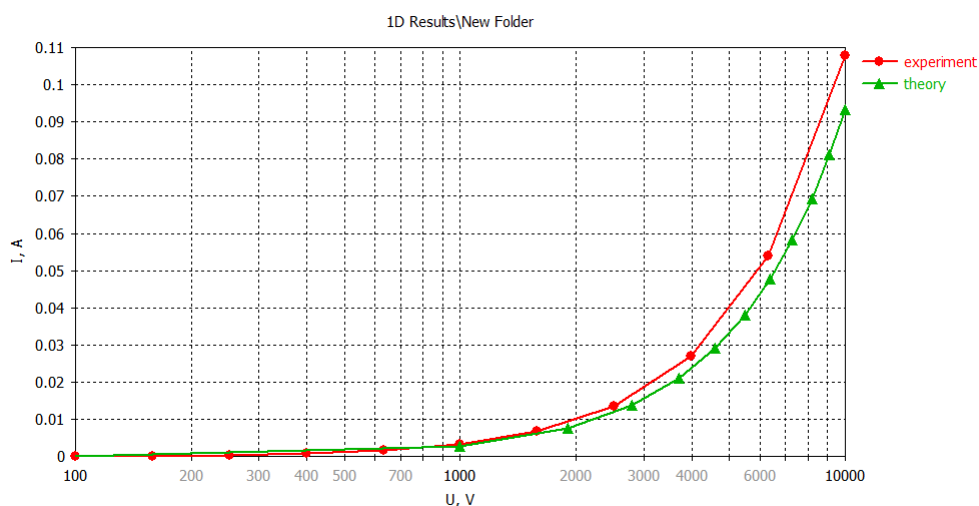


Рис. 4. ВАХ.

Численные результаты близки к теоретическим аналитическим кривым с наибольшим отклонением около 10 %. Такое расхождение можно объяснить, во-первых, действием краевых эффектов из-за конечных размеров и открытых границ ускорительного зазора, и, во-вторых, погрешностями вычисления поля и скорости частиц вблизи границы $z = 0$ в компьютерной модели. Внесение определенных корректировок уменьшало расхождение аналитических и компьютерных параметров до 1% и менее.

3. Многоэлектродная модель. Добавление магнитного поля

В данной модели ионы, образуемые разными способами и входящие в плоскость инжекции ионов (см. рис. 1 [10]), двигаются вдоль цилиндрического канала ускорения, образованного круглыми отверстиями в наборе наложенных друг на друга электродов. Самосогласованное электромагнитное поле фокусирует траектории ионов, увеличивая их скорость, когда они движутся вниз по потоку вдоль оси тяги, параллельно оси симметрии Z . Были исследованы различные конфигурации для оптимизации тяги, обеспеченные многоэлектродной системой, а на рисун 4 показаны две из этих конструкций.

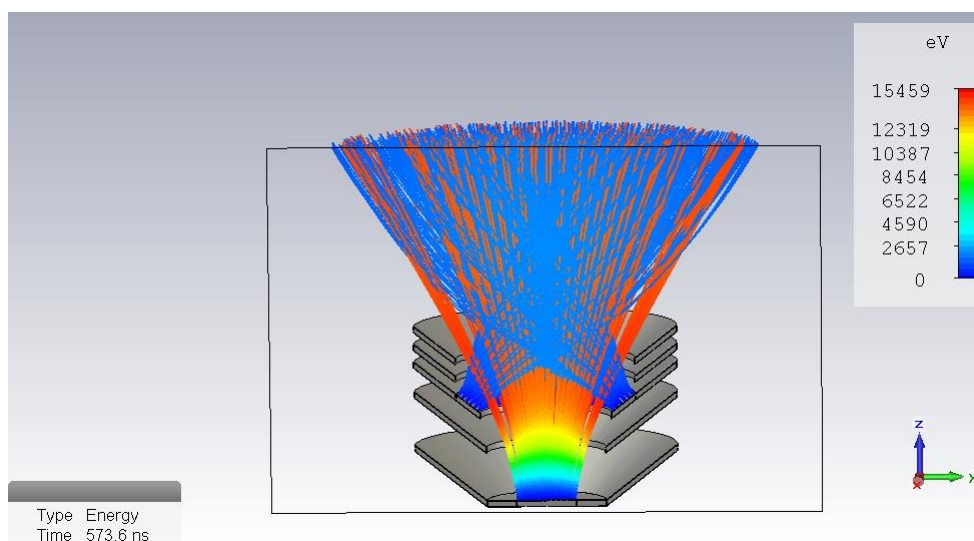
Давление нейтрального газа для работы двигателя в космосе является низким, поэтому типичный размер межэлектродных пространств намного

меньше, чем длина свободного пробега при столкновении нейтральных атомов с заряженными частицами.

Тогда движение ионов и электронов по каналу ускорения бесстолкновительно и в основном регулируется электромагнитными силами. Кроме того, поток ионов должен быть нейтрализован, в противном случае извлеченный ток ниже по потоку ограничивается эффектами пространственного заряда. Электронный нейтрализатор ускоренных катионов построен по принципу комбинированных пучков и виртуального катода, который в основном аналогичен ионно-плазменным двигателям. Образовавшаяся электронно-ионная плазма движется вдоль канала ускорения, где I_e и I_i - переносимый ток электронов и ионов.

Многоэлектродная структура ускорения показана ионов на рисунке 5. Электронные траектории иона показаны линиями, а боковая градуированная шкала соответствует энергиям заряженных частиц в диапазоне 0-15 кэВ. Форма и размер электродов, их потенциалы поляризации, площадь ионной эмиссии и величина токов заряженных частиц была оптимизирована в последовательных численных расчетах (моделирование). В частности, физические условия, при которых электронный пучок создает эффективную потенциальную яму для ускорения ионов.

а)



б)

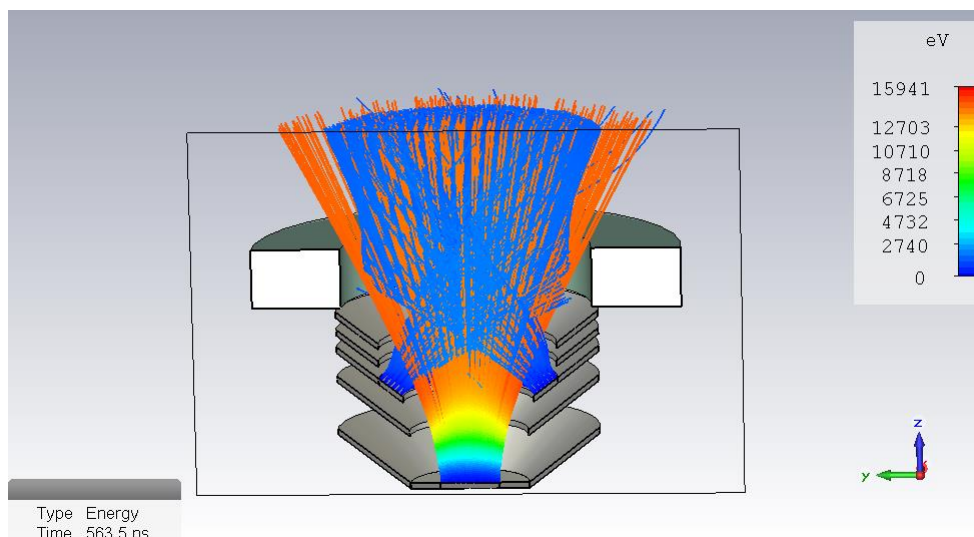


Рис. 5. Вид модели. Траектории частиц. Конструкция без магнита (а), конструкция с постоянным магнитом (б).

Источник ионов размещен на его дне с активной круговой областью диаметром 10 мм. Далее расположены четыре плоских электрода, разделенных расстояниями 8, 4, 2 и 2 мм (снизу вверх) перпендикулярно положительной оси симметрии Z . Открытый канал для ускорения ионов выполнен в виде круговых отверстий в электродах радиусом 10, 11, 15 и 15 мм соответственно.

На рисунке 1 ионный ток $I_i=14$ мА, $I_e=100$ мА и четыре нижних электрода электрически находятся под потенциалом 15,0, -0,5, -1, 0,5 кВ и верхний внешний электрод заземлен. Численное моделирование показывает, что ионы достигают высоких энергий с умеренной расходимостью плазменного потока относительно оси симметрии.

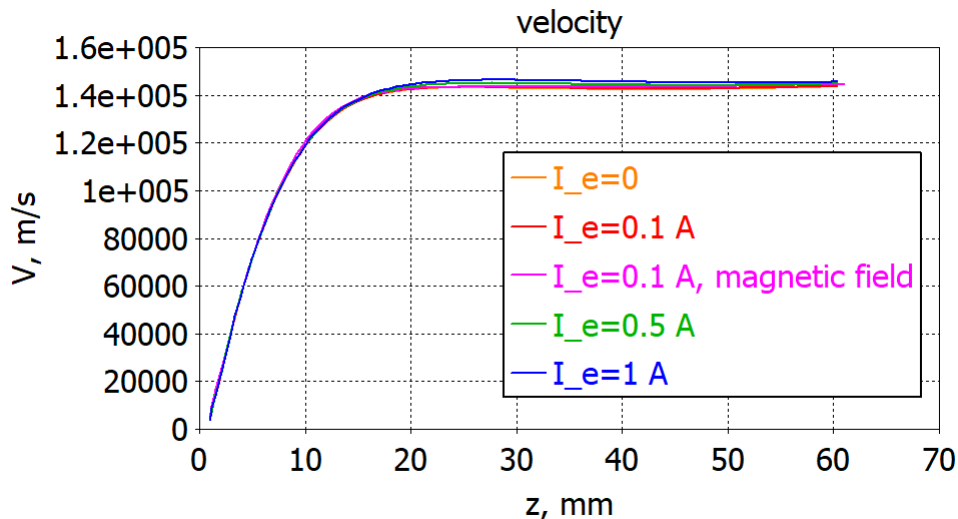
Вторая структура на рисунке 2 показывает постоянный кольцевой магнит, создающий плотность магнитного потока $W = 70$ мТл, добавленный над выходной частью многоэлектродной системы.

Как можно понять, его эффекты заключаются в улучшении расходимости ионных траекторий по с моделью, представленной на рисунке 5 а. Расстояние между электродами составляет 8, 4, 2 и 2 мм в этом случае, тогда как радиусы диафрагм и потенциалы поляризации электродов остаются такими же, как на предыдущем рисунке 5 а.

Скорость ионов вдоль оси тяги z показана на рисунке 6 а, которая резко увеличивается вдоль первых 20 мм многоэлектродной структуры и достигает постоянной скорости выхлопа $v_{ex} \approx 140$ км/с. Магнитное поле мало влияет в этом случае, поскольку ионы движутся по существу параллельно оси z и мало подвержены влиянию магнитной силы. Таким образом, они выходят из многоэлектродной области ускорения и достигают постоянной скорости выхлопа. Однако ионы с радиальной составляющей скорости ограничены в направлении оси тяги осевым магнитным полем, как видно из сравнения рисунков 5 а и 5 б. Следовательно, расходимость потока плазмы снижена.

Электрическое поле на рисунке 6 б отвечает за ускорение ионов и имеет острый пик, примерно расположенный около первого электрода на рисунках 5 а и 5 б. Очевидно, что электрическое поле не подвержено влиянию магнитного поля и уменьшается быстро за пределы конструкции и показывает гладкий профиль и низкие значения в расширяющемся плазменном потоке.

а)



б)

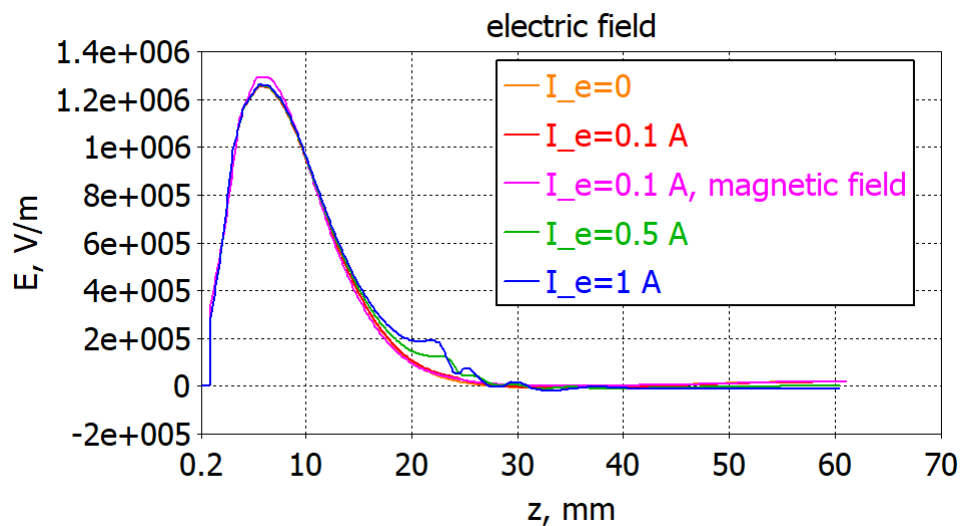
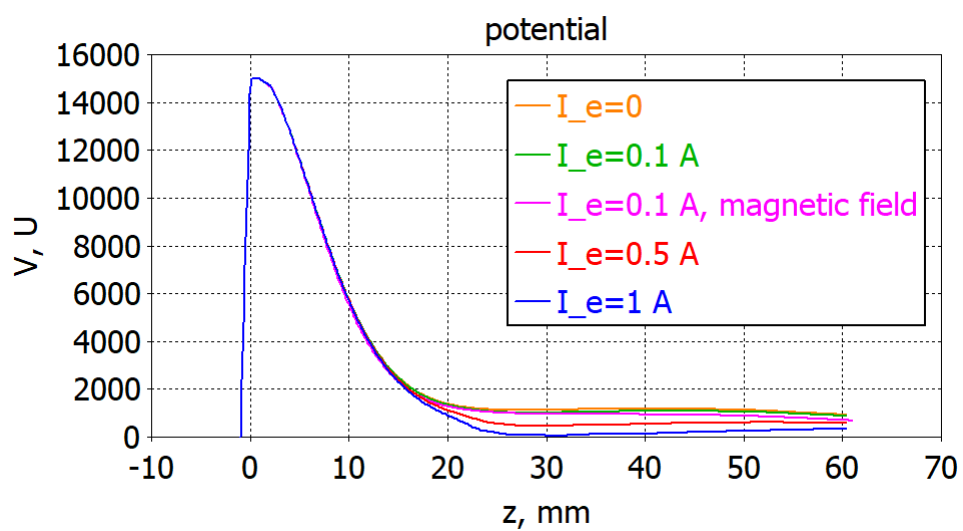


Рис. 6. Численный расчет скорости и распределения электрического поля вдоль оси симметрии z в многоэлектродной модели, изображенной на рисунке 5.

а)



б)

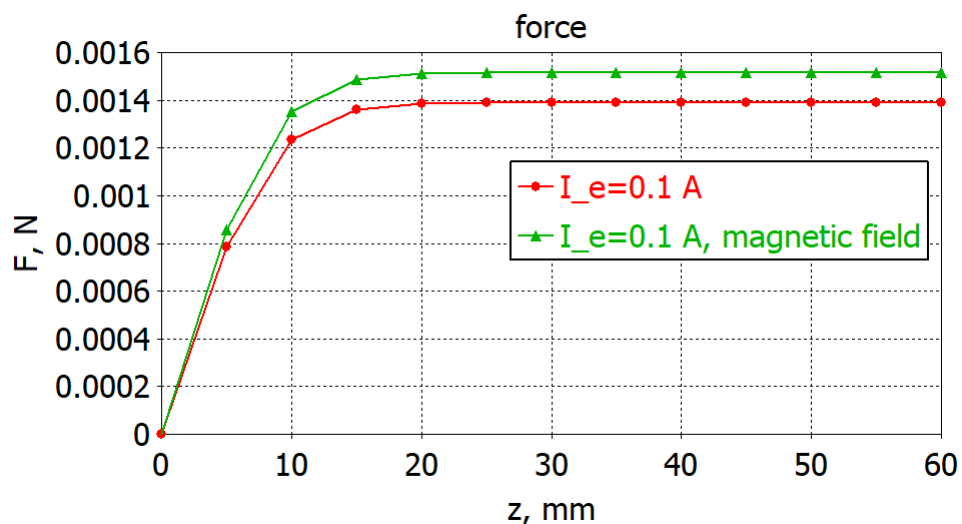


Рис. 7. Численный расчет тяги и распределения потенциала вдоль оси симметрии z в многоэлектродной модели, изображенной на рисунке 5.

На рисунке 7 а показан осевой профиль электрического потенциала вдоль оси Z моделирования. Резкое увеличение электрического потенциала происходит до отрицательного значения координаты, поскольку электрическое поле необходимо для извлечения ионов из источника. Это поле является граничным условием моделирования для $z < \approx 0$ перед плоскостью инжекции при $z = 0$ (см. рисунок 1 в [10]).

Электрический потенциал представляет собой острый пик на рисунке б б в области, где электрическое поле увеличивается, а затем быстро уменьшается по мере нейтрализации ионного пучка электронами. Для осевых расстояний за пределами многоэлектродной структуры профиль потенциала становится более гладким по мере расширения плазменного факела в вакууме. Влияние магнитного поля на выходном сечении заключается в уменьшении расхождения плазменного факела, поэтому поток плазмы становится более плотным. Этот эффект наблюдается на рис. 7 б по возрастанию электрического потенциала при $z > 20$ за пределами многоэлектродной структуры при наличии аксиального магнитного поля.

Ионы ускоряются вдоль области, где электрическое поле не равно нулю на рисунке б б, и поэтому сила $F_{Ti}(z)$ увеличивается до постоянного значения

на рисунке 7 б, как предсказано уравнением 1. Тогда область ускорения ионов ограничена до $Z_{\text{г}} \approx 20$ мм.

Наконец, передаваемую тягу можно оценить по предельной скорости выхлопа ионов на рисунке 6 а, как $F_{\text{Ti}} \approx 1,6$ мН на рисунке 7 б и удельный импульс $I_{\text{sp}} = v_{\text{ex}}/g_0 \approx 1,43 \times 10^4$ с. Это значение на порядок больше, чем данные, приведенные в литературе [11] [12] [13].

4. Сопоставление экспериментальных данных, полученных в лаборатории, с аналитическими

При подаче постоянного напряжения от 0 до 5 кВ на ускоритель ионов при нулевом потоке рабочего тела разрядные явления (пробой) отсутствовали, измеряемые токи в цепях ускорительного модуля близки к нулевым значениям.

При включении электрического напряжения и подаче рабочего газа запуск ионного ускорителя в рабочий режим происходил практически безинерционно. Измеряемый ток в цепи инжектора достигал максимального значения до приблизительно 1А в зависимости от сорта газа, значений напряжения (до 5кВ) и подаваемого газового потока. Для различных газовых РТ порог включения (среднее значение напряженности электрического поля в ускорительном зазоре) составлял приблизительно 250-500 В/см. Одновременно наблюдалось яркое свечение сфокусированного потока, обусловленное, как обычно в подобных устройствах, зарядовой и энергетической релаксацией ионного потока. Свечение было равномерно распределенным по поверхности микропористого инжектора, стабильным и неизменным в течение времени непрерывного испытания (Рис. 1.). В частности, видимое излучение из ускорительного зазора экспериментального прибора на Рис. 1. получено при напуске осушенного атмосферного воздуха в режиме генерации отрицательных ионов. Подобные результаты получены также для различных РТ и положительных ионов.

Типичные теоретические и измеренные характеристики в виде зависимостей ионного тока в цепи инжектора от приложенного постоянного

напряжения при разных значениях массового расхода РТ и зависимости коэффициента ионизации от массового расхода РТ представлены на Рис. 8. - 9. Кривые 1-4 соответствуют расстоянию между электродами 16 мм, толщине микропористой пластины 4 мм. Кривая 5 – теоретическая зависимость, полученная методом компьютерного моделирования для условий, соответствующих зависимости 4. Кривая 6 измерена при расстоянии между электродами 12 мм, толщине микропористой пластины 3 мм. Приведены также экстраполирующие степенные зависимости.

Согласно экстраполирующим степенным зависимостям, теоретическая вольтамперная зависимость на Рис. 3.41 компьютерной модели [3] соответствует кинетической ионной модели, соответствующей закону 3/2 Чайльда-Ленгмюра. Измеренные в широком диапазоне режимов зависимости, однако, имели существенные отличия и особенности возрастания тока, указывающие на ионно-плазменные свойства и явления, в том числе сильные радиационные эффекты, столкновения, нейтрализацию и резонансную перезарядку. Наряду с этим, процессы в целом имели квазистационарный характер, не сопровождались неконтролируемыми разрядными явлениями. Типичные зависимости коэффициента ионизации (Рис. 9.), вычисленные на основании экспериментальных кривых, соответствовали приблизительно линейному нарастанию эффектов плазмообразования в широком диапазоне параметров.

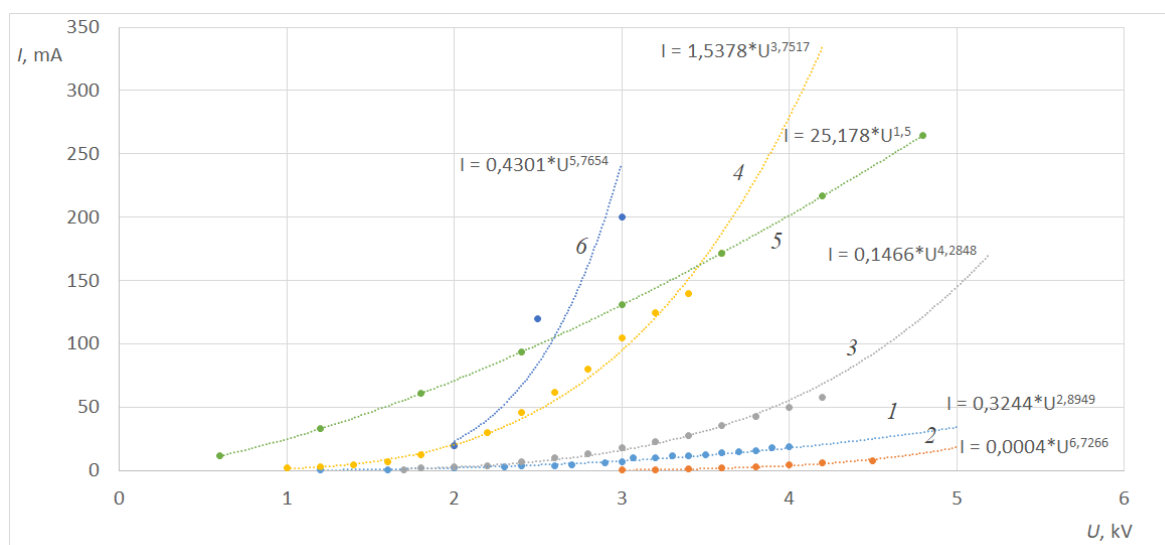


Рис. 8. Типичные вольтамперные характеристики в виде измеренных зависимостей и теоретической зависимости тока отрицательных ионов в цепи инжектора от приложенного постоянного напряжения при разных значениях массового расхода РТ. Зависимость 1-воздух, массовый расход 8 мг/с; зависимости 2-4 – эле-газ SF₆, массовый расход 3-20 мг/с. Кривые 1-4 соответствуют расстоянию между электродами 16 мм, толщине микропористой пластины 4 мм. Кривая 5 – теоретическая зависимость, полученная методом компьютерного моделирования для условий, соответствующих зависимости 4. Кривая 6 измерена при расстоянии между электродами 12 мм, толщине микропористой пластины 3 мм. Приведены экстраполирующие степенные зависимости.

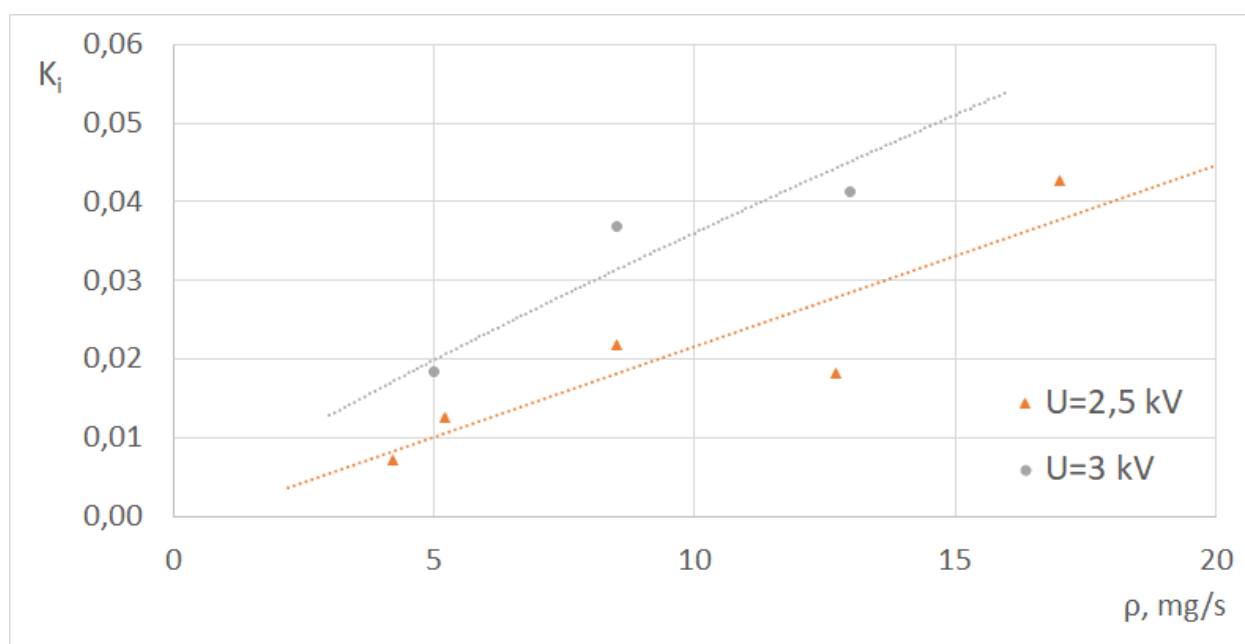


Рис. 9. Типичные зависимости коэффициента ионизации, вычисленного по формуле (3) с использованием измеряемых параметров, соответствующих кривой 6 Рис. 8, от массового расхода РТ (эле-газ SF₆).

5. Экспериментальные результаты исследования фотодиодов

На этапе предварительного измерения анод и затвор диода находятся под отрицательным напряжением смещения. Измерительный цикл начинается, когда на анод подается положительное напряжение после отрицательного смещения. На рис. 10 показаны измеренные зависимости, а также теоретические зависимости. Типичное экспериментальное обратное время срабатывания $1/T$.

Температурные зависимости представлены на графике.

Минимальная (при температуре $T = 320$ К) и максимальная (при 275 К) время срабатывания τ составляло примерно 150 нс и 150 мс, что соответствовало времени широкий динамический диапазон $\tau_{trig\ max}/\tau_{trig\ min}$ до 10^5 - 10^6 .

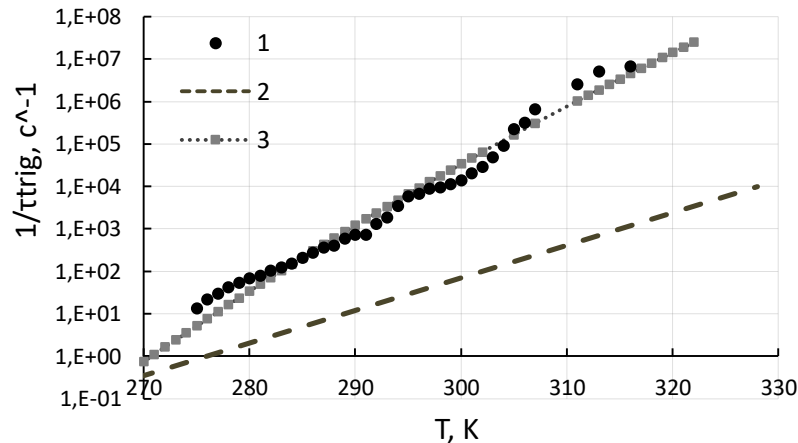


Рис. 10. Зависимость времени самопереключения DPD от температуры в логарифмическом масштабе [14].

1- экспериментальные данные, 2- теория [8] (пунктирная линия), 3- минимум Ричардсона (пунктирная линия). Вперед анодное импульсное напряжение $V_{an} = 1$, прямое напряжение катода и затвора, соответственно, $V_{ct} = 0,6$ В, $V_g = 1,2$. Очевидно, что наклон кривых теоретической зависимости [8] (пунктир) и экспериментальные существенно отличаются. Это несоответствие требует пересмотра теории. Решение заключалось в применении минимума Ричардсона (пунктирная линия), который приблизительно соответствует именно экспериментальной кривой. Для объяснения экспериментальных фактов и выявления основных физических процессов необходим более подробный теоретический анализ с помощью компьютерного моделирования.

Заключение

На основе аналитического обзора литературы по теме работы произведены сравнение и выбор программ компьютерного моделирования.

Выполнен анализ методики выбранного пакета прикладных программ для вычисления электронно-физических процессов в ионном двигателе космического аппарата. Методом компьютерного моделирования с помощью

пакета CST Studio получены и обобщены некоторые данные для заданной модели ионного двигателя.

Показано, что пакет CST может быть совмещен и дополнен алгоритмами.

С помощью пакета CST построен аналитический электродинамический алгоритм, объединенный с компьютерным моделированием электромагнитного поля и траекторий заряженных частиц. В алгоритме реализован принцип создания механической силы тяги в ионных ускорителях, обусловленный силовым кулоновским взаимодействием движущихся в вакууме ионов со связанными зарядами на поляризованных поверхностях элементов конструкции ускорительной камеры.

Основной вывод работы состоит в том, что методы компьютерного моделирования с помощью пакетов CST и COMSOL могут быть обоснованно и эффективно использованы для анализа электронно-физических процессов в ионных источниках и нейтрализаторах, в том числе при разработке ионных двигателей космических аппаратов.

Методами аналитических вычислений и компьютерного моделирования (с помощью указанного пакета) рассмотрен ряд моделей электростатических ионных ускорителей. Получены зависимости численных параметров от координат, в том числе распределение механических сил, потенциала и поля, плотности заряда и тока, скорости частиц в ускорительном зазоре. Анализ полученных данных показал удовлетворительную точность, адекватность и непротиворечивость предложенных подходов.

Разработанный аппарат предоставляет широкие возможности для исследования физических явлений и процессов в ионных и ионно-плазменных источниках, ускорителях и нейтрализаторах ЭРД, позволяет оценивать предполагаемые конструкторские решения и параметры разрабатываемых устройств, сравнивать применение в них различных рабочих тел.

Предложенный подход и разработка алгоритма на его основе позволит и в дальнейшем находить пути оптимизации реально созданных устройств, в том

числе сравнивать характер физических процессов при использовании различных рабочих веществ.

Установлено, что в вакуумной установке были обеспечены необходимые методы и средства измерений, параметры процессов, а также требуемые эксплуатационные условия при массовом расходе различных рабочих газов (воздух, гелий, аргон и другие в режимах генерации катионов и анионов) в диапазоне 0,5-15 мг/с.

Измерения и анализ характеристик экспериментальных моделей ионных ускорителей подтвердили, что расчетные и практические ионно-физические свойства испытанных образцов соответствуют поставленным актуальным задачам, и показали:

- усиленную поверхностную ионизацию;
- возможность применения различных рабочих тел, альтернативных ксенону;
- ионные и ионно-плазменные биполярные режимы;
- равномерное распределение излучения и температуры по развитой поверхности инжектора;
- практически безинерционный запуск ионной инжекции.

Предполагается, что разрабатываемая конструкция в новом физико-технологическом исполнении с указанными характеристиками будет представлять интерес для перспективных устройств. В целом, экспериментальная установка, ее измерительные и технологические возможности, а также конструкции опытных образцов создают эффективную платформу для дальнейших целенаправленных исследований и разработки перспективных электрических ракетных двигателей.

Анализ данных моделирования показывает адекватность и последовательность совмещения аналитического численного моделирования с использованием программного обеспечения CST. Аналогичные методы могут быть адаптированы для изучения альтернативных конфигураций ускорения ионов и / или плазменных двигателей, например, ионных двигателей,

основанных на эффекте Холла, или сеточный ионный двигателей, используя доступные вычислительные ресурсы.

Численное моделирование предполагает, что малая многоэлектродная конфигурация, показанная на рисунках, может ускорять ионы до скоростей порядка сотен километров в секунду. Это представляет большую на один порядок величину, чем обычные плазменные двигатели, такие как двигатель на эффекте Холла или сеточный ионный двигатель [15] [11]. Следовательно, достигнутые ионные токи могут обеспечивать тягу в диапазоне миллиньютонов, приводящую к повышенному удельному импульсу.

Следует отметить, что электрическая изоляция и потребление энергии могут быть проблемой. Преимуществом конфигураций электродов на представленных рисунках является их небольшие размеры и вес, но, к сожалению, для работы они требуют высокого напряжения.

Публикации

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Дюбо Д.Б., Цыбин О.Ю. Связь объемных и поверхностных эффектов с высотой зарядового барьера в динамическом р–i–n-фотодиоде // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 16 – 25. DOI: 10.18721/JPM.11202
2. Дюбо Д.Б., Цыбин О.Ю. Компьютерная модель ускорителя ионов с контактной ионизацией для электроракетных двигателей космических летательных аппаратов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 1. — С. 78–91. DOI: 10.18721/JPM.13107
3. Цыбин О.Ю. и др. Электростатический ионный ускоритель с контактной ионизацией для перспективных электрических ракетных двигателей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. № 2

Публикации в других изданиях

1. NANO COMMUNICATION DEVICE WITH AN EMBEDDED MOLECULAR FILM: ELECTROMAGNETIC SIGNALS INTEGRATION WITH DYNAMIC OPERATION PHOTODETECTOR
Dyubo D., Tsybin O.Y. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Т. 10531 LNCS. С. 206-213.
2. D. Dyubo and O. Y. Tsybin, "PIN Diode-Triode with Embedded Gate-Control Potential Barrier: Surface Charge Effects," 2018 IEEE International Conference on

Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, 2018, pp. 40-43, doi: 10.1109/EExPolytech.2018.8564397.

3. D. Dyubo and O. Y. Tsybin, "Semiconductor Sensor with Embedded Gate-control Potential Barriers," 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 253-256, doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906803.

4. REGISTRATION OF FLUORESCENCE IN BIOMOLECULAR SOLUTIONS USING DYNAMIC PIN PHOTODIODE

Savchenko E.A., Nepomnyashchaya E.K., Dyubo D.B., Velichko E.N., Tsybin O.Yu. Journal of Physics: Conference Series. 2017. Т. 917. С. 042010.

5. A NOVEL PHOTODIODE IN ON-BOARD MICRO RECEIVER IN 400-800 NM RANGE, Dyubo D., Tsybin O.Yu. В сборнике: THE FIRST JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASTROPHYSICS FOR YOUNG SCIENTISTS Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Higher school of applied physics and space technologies. 2017. С. 53-57.

6. Dyubo, D., Tsybin, O. (2019). Particles-on-surface sensor with potential barriers embedded in a semiconductor target. Journal of Physics: Conference Series. 1326. 012003. 10.1088/1742-6596/1326/1/012003.

7. Dyubo, D., Conde L., Gonsalez, Tsybin, O. Plasma thrusters for in space propulsion; new trends and physical limitations, International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2020) Saint Petersburg (Russia), в печати

Список литературы

[1] Гончаров П.С., Кулешов Ю.В., Мартынов В.В., Цыбин О.Ю., Шуневич Н.А. Вакуумная установка для огневых испытаний электрических ракетных двигателей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского — 2019. - Выпуск 668. - с. 216-223.

[2] Гончаров П.С., Мартынов В.В., Пеньков М.М., Скутницкий В.М., Цыбин О.Ю., Шуневич Н.А. Импульсный источник питания для проведения испытаний электрических ракетных двигателей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. - 2019. - Выпуск 668.

[3] Цыбин О.Ю., Макаров С.Б., Дюбо Д.Б., Кулешов Ю.В., Гончаров П.С., Мартынов В.В., Шуневич Н.А. Э. // НТВ СПбГУ. ф.-м. н. - 2020. - т. 13(2). с. 99–115.

[4] Tsybin O.Yu., Tsybin Y.O., Hakansson Per. Laser or/and Electron Beam Activated Desorption of Ions: A Comparative Study // in Desorption 2004, Papers of 10th International Conference, Saint Petersburg. - 2004. - p.61.

[5] Zandberg E.YA. Poverhnostno-ionizacionnoe detektirovanie chastic (Obzor) // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. - 1995. - v. 40.- p.865.

[6] Zandberg E.YA., Ionov N.I., Poverhnostnaya ionizaciya // Nauka, M. - 1969. - 432 p.

- [7] Okhonin, S., Gureev, M., Sallin, D., Appel, J., Koukab, A., Kvasov, A., Pastre, M., Polzik, E. S., Tagantsev, A. K., Uddegard, F. and Kayal M.: A dynamic operation of a PIN photodiode // *Applied Physics Letters*. - v. 106. - 2015. - p. 031115.
- [8] Sallin, D.: A low-voltage CMOS-compatible time-domain photodetector, device & front end electronics. PhD Thesis 6869. EPFL, Lausanne, Switzerland. - 2015.
- [9] M. Verdun, G. Beaudoin, B. Portier, N. Bardou, C. Dupuis, I. Sagnes, R. Haïdar, F. Pardo, and J.-L. Pelouard, Dark current investigation in thin P-i-N InGaAs photodiodes for nano-resonators // *Journal of Applied Physics*. - v. 120. - 2016. - p. 084501.
- [10] Dyubo, D. Tsybin, O. Yu. A computer model of the contact ionization ion accelerator for the electrically powered spacecraft propulsion // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. - v. 13. - 2020. - p.78-91.
- [11] Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches // *Plasma Sources Sci. Technol.* - v. 25. - 2016. - p. 033002.
- [12] Koch, N. et al.. The HEMPT concept. A survey on theoretical considerations and experimental evidences // *Proceedings of the 32th International Electric Propulsion Conference. IEPC paper 2011-236*. Weisbaden, Germany. September 11-15. - 2011.
- [13] Boch, E. The HEMPT NG // *Proceedings of the Electric Propulsion, Innovation & Competitiveness Workshop*. Madrid, Spain. October 24-25. - 2017.
- [14] Dyubo, Dmitrii & Tsybin, Oleg. Nano Communication Device with an Embedded Molecular Film: Electromagnetic Signals Integration with Dynamic Operation Photodetector.. 10.1007/978-3-319-67380-6_19. - 2017. - p.206-213.
- [15] Goebel D.M., Katz I., *Fundamentals of electric propulsion ion and Hall thrusters* // John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA Ch. 1, 6 and 7. - v.1. - 2008. - p.243–389.