

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт электроники и телекоммуникаций

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ М.Я. Винниченко

«___» _____ 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОРАКЕТНОМ
ИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

по направлению 16.03.01 Техническая физика

по профилю 16.03.01.10 Физическая и биомедицинская электроника

Выполнил

студент гр. 4931601/81001

Д.А. Пасечник

Руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор

О.Ю. Цыбин

Консультант

Д.Б. Дюбо

Консультант по нормоконтролю

Н.М. Гнучев

Санкт-Петербург

2022

«Утверждено»

Руководитель ОП

_____ М.Я. Винниченко
«__» _____ 2022 г.

ИЭиТ ВИФШ

Направление подготовки:

16.03.01 «Техническая физика»

Квалификация: бакалавр

ЗАДАНИЕ

на выпускную работу бакалавра

Пасечнику Даниилу Алексеевичу, гр. 4931601/81001

1. Тема работы:

Методика исследования физических процессов в электроракетном ионном двигателе космического аппарата

2. Срок сдачи студентом работы: июнь 2022 г.

3. Исходные данные к работе:

Список базовой литературы по теме работы.

4. Содержание – (перечень подлежащих разработке вопросов)

1) Обзор литературы, описание методов исследования физических процессов электроракетном ионном двигателе космического аппарата, выводы и постановка задач; 2) аналитические методы на примере ограничения мощности электропитания двигателя; 3) методы компьютерного моделирования процессов нейтрализации ионного факела; 4) сравнительная оценка полученных результатов аналитического исследования и компьютерного моделирования.

5. Перечень сопряженных разделов (вопросы экономики, охраны труда и проч.) не требуются

6. Консультанты по работе (при наличии, с указанием относящихся к ним разделов работы):

Дюбо Д.Б., CST моделирование.

7. Дата выдачи задания: 21.04.2022

Научный руководитель

Профессор, д.ф.-м.н. _____ Цыбин О.Ю.

(подпись)

«Задание принял к исполнению»

Студент

(подпись)

РЕФЕРАТ

На 49 с., 27 рисунков, 1 приложение

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ, РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ИОННОГО ФАКЕЛА, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Методика исследования физических процессов в электроракетном ионном двигателе космического аппарата».

Данная работа посвящена исследованию недостаточно изученных физических процессов в ионном двигателе. Цель работы состояла в аналитическом описании эффектов, вызванных ограничением мощности бортового источника электропитания, описании процессов нейтрализации ионного факела и оценке возможности применения компьютерного моделирования для исследования процессов нейтрализации.

В ходе работы установлена функциональная зависимость между силой тяги ионного двигателя и параметрами источника питания. Найдены параметры источника, обеспечивающие максимальную тягу. Из анализа зависимости экстремальной силы тяги от параметров получены области значений параметров источника питания, соответствующие разным режимам работы ионного двигателя. Анализ энергетической цены тяги и коэффициента полезного действия позволяет выбрать оптимальное рабочее тело для двигателя.

Получены выражение для сечения процесса аннигиляции частиц, а также соотношения, описывающие изменение концентраций частиц с координатой вследствие нейтрализации. Показаны возможности пакета CST Studio для моделирования процессов нейтрализации. Решатель Tracking Solver позволяет получить траектории частиц, распределение потенциала и плотности заряда, по которым можно оценивать степень взаимодействия потоков частиц и проектировать оптимальные конструктивные конфигурации.

Для численной оценки процессов нейтрализации разработан алгоритм на языке программирования Python, с помощью которого получены зависимость концентрации частиц от координаты с учетом процессов аннигиляции, распределение потенциала в области моделирования с учетом объемного заряда частиц, зависимости скоростей частиц и длин свободного пробега ионов от координаты, а также изменение смешанного ионно-электронного потока частиц с координатой.

ABSTRACT

49 pages., 27 pictures, 1 appendix

KEYWORDS: ELECTRIC ROCKET THRUSTER, ION THRUSTER, PHYSICAL PROCESSES IN AN ION THRUSTER, PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN ION THRUSTER, NEUTRALIZATION OF AN ION FLOW, COMPUTER MODELING.

The theme of the graduate qualification work: "Methodology for the study of physical processes in the electric rocket ion engine of the spacecraft."

The given work is devoted to the study of the least described physical processes in an ion thruster. The purpose of the work was an analytical description of the effects caused by the limitation of the power of the onboard power supply, a description of the processes of neutralization of the ion flow, and a description of the possibility of using computer modeling for studying neutralization processes.

In the course of the work, the dependence between the thrust force and the parameters of the power supply was established. The parameters of the source providing maximum thrust are found. From the analysis of the dependence of the extreme thrust force on the parameters, the ranges of the power supply parameters corresponding to different modes of operation of the ion engine are obtained. The analysis of the energy price of thrust and efficiency allows you to choose the optimal working fluid for the thruster.

An expression for the cross section of the particle annihilation process is obtained, as well as relations describing the change in the concentrations of particles with a coordinate due to neutralization. The possibilities of the CST Studio package for modeling neutralization processes are shown.

For the numerical evaluation of neutralization processes, an algorithm has been developed in the Python programming language, with the help of which the dependence of the particle concentration on the coordinate, taking into account the annihilation processes, the distribution of the potential in the field of modeling, taking into account the volume charge of particles, the dependence of particle velocities and ion free path lengths on the coordinate are obtained, as well as the change in the mixed particle flow with the coordinate.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1. Ионный двигатель. Физические процессы и методы их исследования..	8
1.1. Ионный двигатель.....	8
1.2. Генерация тяги и рабочие характеристики ионного двигателя	10
1.3. Физические процессы. Нейтрализация.....	14
1.4. Выводы и постановка задачи.....	19
Глава 2. Методика исследований	20
2.1. Аналитическое исследование эффектов, вызванных ограничением мощности бортового источника питания	20
2.3. Компьютерное моделирование.....	25
2.4. Оценка процессов аннигиляции частиц при нейтрализации.....	32
Глава 3. Результаты	37
3.1. Результаты исследования эффектов, вызываемых ограничением мощности бортового источника питания	37
3.2. Результаты компьютерного моделирования в CST	38
3.3. Результаты численной оценки нейтрализации	40
Заключение.....	46
Список литературы.....	48
Приложение А	50

ВВЕДЕНИЕ

Степень развития космической отрасли является одним из показателей научно-технического прогресса любого современного государства. Поэтому с каждым годом мировая космическая промышленность все сильнее увеличивает темпы роста. На современном этапе данная сфера и её научно-производственная база уже стали естественно функционирующей отраслью глобальной экономики, подчиняющейся универсальным закономерностям и тенденциям. Динамичное и стабильное развитие связано с высокой интегрированностью сферы в военную и гражданскую промышленность. Это приводит к высокой коммерциализации космической деятельности. Появляется все больше частных компаний, предоставляющих услуги, так или иначе связанные с космическим пространством – от космического туризма, например, компаний Blue Origin и Virgin Galactic) до спутникового интернета - глобальная спутниковая система Starlink компании SpaceX.

Одним из естественных векторов развития космической отрасли является поиск наиболее выгодных видов топлива для космического аппарата. Традиционно, в химических двигателях с высокой тягой в качестве рабочего тела используют метан, керосин и другие вещества, сгорающие в высокотемпературных условиях. В космическом вакууме оказалось возможным использовать двигатели с малой тягой, порядка единиц Ньютон – микроНьютон. Соответственно, получили развитие электроракетные технологии, основанные на использовании массивных заряженных частиц. Это привело к появлению семейства двигателей нового типа – электрических ракетных двигателей (ЭРД) [1,2]. Принцип работы ЭРД основан на превращении электрической энергии в направленную кинетическую энергию частиц, например, электротермический, электростатический, электромагнитный и импульсный плазменный.

Электротермический ракетный двигатель — тип ЭРД, который характеризуется тем, что электрическая энергия используется для нагрева рабочего тела, а затем термическая энергия струи преобразуется в кинетическую энергию струи

в сопле. Обычно это сопло Лаваля, позволяющее ускорить газ до сверхзвуковых скоростей. Двигатели такого типа различаются по способу нагрева газа – электронагревные, электродуговые, индукционные.

В электростатических двигателях ускорение частиц рабочего тела осуществляется в электростатическом поле. Типичными представителями такого вида двигателей являются ионный, ионно-плазменный и коллоидный двигатели.

В основе принципов работы электромагнитного двигателя лежат законы движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Типичным представителем является холловский двигатель [2,3], который имеет большое преимущество в сроке службы по сравнению с ионными двигателями из-за отсутствия сетчатых электродов, которые разрушаются плазмой. В импульсных плазменных двигателях используется электронно-детонационный тип разряда [4].

В последнее время все большее развитие получает разработка и производство малых космических аппаратов массой от десятков до сотен килограмм. Такие устройства способны решать широкий ряд прикладных и научных задач в космосе. Преимущества перед крупноразмерными космическими аппаратами очевидны: сокращение сроков создания устройства, многократное снижение их стоимости, а также меньшие затраты на эксплуатацию и вывод аппарата в космос. В малогабаритных космических аппаратах ЭРД получили широкое применение [2]. Увеличенные срок службы и удельный импульс тяги, меньший расход и габариты делают ЭРД наиболее выгодными для использования. Кроме этого, перспективным является разработка ЭРД в качестве основных маршевых устройств.

В настоящий момент не все физические процессы в ионных двигателях хорошо изучены и описаны. Наименее проработанным является процесс нейтрализации. Это является большой проблемой при проектировании новых моделей, и ограничивает возможности их массового производства. Также нет описания связи между параметрами источника электропитания и силой тяги, что позволило бы находить оптимальные режимы работы двигателей. Необходимо искать

новые аналитические подходы, а также их альтернативы. Одним из таких может являться компьютерное моделирование. К настоящему моменту в свободном доступе почти нет пакетов для компьютерного моделирования, специализированных непосредственно для таких задач. Необходимо искать альтернативы и способы адаптации существующих пакетов программного обеспечения.

ГЛАВА 1. ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Ионный двигатель

Ионных двигателей является одним из самых распространенных электроракетных двигателей [6]. Его принципиальная схема изображена на рис. 1.1.

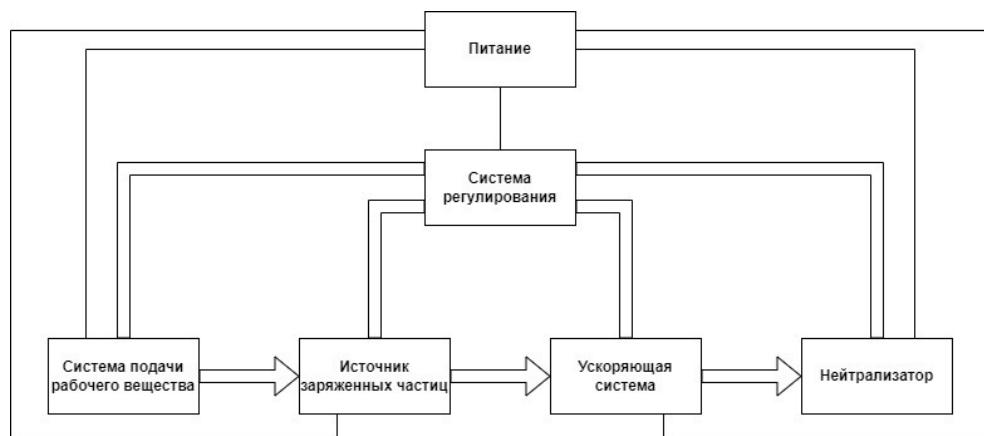


Рис. 1.1. Принципиальная схема ионного двигателя

Во всех элементах ионного двигателя потребляется электрическая энергия, поступающая от бортового источника электропитания. Система автоматического регулирования обеспечивает выполнение заданных режимов работы двигателя и поддержание в выбранных пределах характеристик его элементов. Система подачи включает в себя устройства, предназначенные для перемещения рабочего вещества из баллонов в источник заряженных частиц, а также дозирующие устройства и исполнительные органы системы регулирования (расходомеры, регуляторы температуры и др.).

Создание тяги в ионном двигателе происходит в три основных этапа: получение положительно заряженных частиц рабочего тела, ускорение ионов и нейтрализация ионного пучка (рис. 1. 2). Ионизация нейтральных атомов или молекул рабочего тела происходит в газоразрядной камере методом электронного удара. Также перспективным является использование контактных источников ионов [7]. Далее образовавшиеся ионы ускоряются до заданных скоростей в

приложенной к электродам разности потенциалов. На завершающем этапе для нейтрализации ускоренного ионного пучка, выходящего из сопла двигателя, используется катод-нейтрализатор [8].

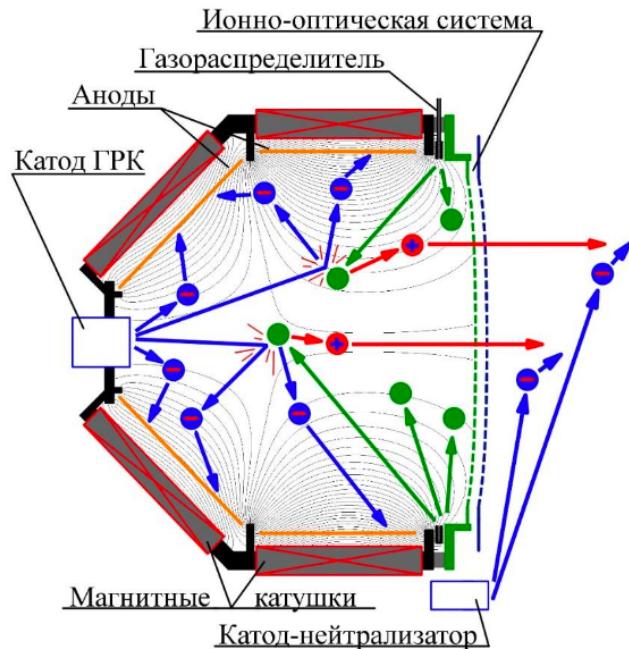


Рис. 1.2. Схема работы ионного двигателя

Процессы ионизации в ионном двигателе хорошо изучены. С помощью компьютерного моделирования можно получать, к примеру, распределения потенциала в камере и эффективные области ионообразования при разных режимах работы двигателя. Процессы ускорения в ионно-оптической системе тоже хорошо описаны электронной оптикой. С помощью компьютерного моделирования можно рассматривать распыление электродов и оценивать срок их службы. При этом процессы нейтрализации не имеют широкого описания в литературе. Также нет четкой аналитической связи между рабочими параметрами двигателя (напряжения на ускоряющих электродах, электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника) и силой тяги. С помощью таких соотношений можно определить эффективные параметры двигателя для разных режимов работы.

1.2. Генерация тяги и рабочие характеристики ионного двигателя

Сила тяги является одной из главных характеристик ионного двигателя. Ее генерация происходит в ускоряющем зазоре между электродами. За счет кулоновского притяжения к ускоряемым ионам поверхностных зарядов, появившихся из-за поляризации, возникает сила тяги, действующая на электроды. Схема генерации силы тяги в ионном двигателе изображена на рис. 1.3.

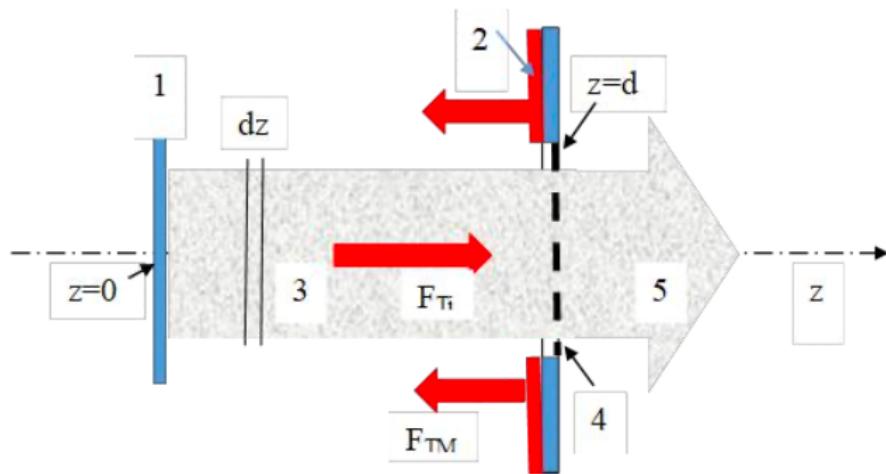


Рис. 1.3. Схема генерации силы тяги в ионном двигателе. 1 - входной электрод в плоскости инжекции ионов; 2 – связанные заряды на выходном электроде в плоскости экстракции ионов $z=d$; 3 – объёмный заряд Q «внутренних» ионов с полной массой m и скоростью $v(z)$ в ускорителе; 4 - область нейтрализации ионов; 5 – факел частиц, выбрасываемый в пространство со скоростью v_f ; F_{TM} - сила, действующая на выходной электрод со стороны ионного потока; F_{Ti} - сила, действующая на ионный поток со стороны связанных зарядов.

Силу, действующую на ионный поток со стороны поверхностных зарядов F_{Ti} , и силу, действующую на выходной электрод со стороны ионного потока F_{TM} , соответственно, можно записать следующим образом:

$$F_{Ti} = \mu \frac{d\nu}{dt}, \quad F_{TM} = -\nu \frac{d\mu}{dt}$$

Ускорение ионов происходит за счет действия на них силы притяжения к поверхностным зарядам электродов. Одновременно ионы притягивают электрод со связанными на нем индуцированными зарядами силой F_{TM} , что вызывает встречное ускорение космического аппарата в направлении против движения ускоренных ионов.

Силу притяжения со стороны поверхностных зарядов F_{Ti} можно вычислить как силу Лоренца, действующую со стороны поля E на заряженные частицы $dQ(z)$ в слое dz .

$$F_{Ti}(z) = \int_0^z E(z) dQ(z)$$

В упрощенном случае ионный ток выражается законом Чайльда-Ленгмюра в режиме ограничения тока пространственным зарядом (ОТПЗ). С учетом закона «трех вторых», а также полученных формул для распределения потенциала вдоль оси $U(z)$, скорости ионов $v(z)$, электрического поля $E(z)$, можно получить рабочие выражения для силы тяги и тока ионов.

$$\begin{aligned} F_{TM} &= \frac{1}{2} \epsilon_0 S E_d^2 = \frac{8}{9} \epsilon_0 S E_0^2 \\ I &= \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2q}{\mu}} \epsilon_0 S U_d^{3/2} d^{-2} = G U^{3/2}, \quad G = \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2q}{\mu}} \epsilon_0 S d^{-2}, \\ F_{TM} &= \sqrt{\frac{2q}{\mu}} G U^2, \end{aligned} \tag{1.1}$$

E_0 – электрическое поле, $\frac{\text{Н}}{\text{кл}}$;

S – площадь электродов, м^2 ;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}$;

G – первеанс, $\frac{\text{А}}{\text{Б}^{3/2}}$;

d – расстояние между электродами, м ;

q – заряд частицы, Кл;

Помимо силы тяги важными рабочими характеристиками ионного двигателя являются удельный импульс, энергетическая цена тяги, мощность и КПД. Удельный импульс тяги I_{y0} является усредненной скоростью реактивной струи, создающей тягу, и, соответственно, имеет размерность скорости — метр в секунду. Часто для удельного импульса тяги используется размерность секунды, характеризующая отношение тяги F к весовому секундному расходу рабочего тела в условиях земного тяготения:

$$I_{уд} = \frac{F}{g\dot{m}}$$

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Энергетическая цена тяги C_t , выражаемая как отношение тяги к потребляемой двигателем электрической мощности P , является характеристикой, выражающей эффективность и экономичность ионного двигателя.

$$C_t = \frac{F}{P}$$

Коэффициент полезного действия (КПД) ионного двигателя η можно представить как произведение двух компонент – коэффициента использования рабочего тела η_r и электрического КПД η_e :

$$\eta = \eta_r \eta_e$$

Коэффициент использования рабочего тела или коэффициент газовой эффективности η_r , является отношением выходящего из двигателя потока массы ионов \dot{m}_i , имеющего размерность кг/с, к массе рабочего тела на входе в двигатель \dot{m} :

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}}$$

Электрический КПД η_e традиционно можно представить как отношение полезной тяговой мощности N_T к электрической мощности, подводимой к двигателю.

$$\eta_e = \frac{N_T}{P}, \text{ где } N_T = \frac{\dot{m}_i \vec{v}_i^2}{2}$$

Потребляемая электрическая мощность P пропорциональна развиваемой двигателем тяге F , удельному импульсу тяги $I_{уд}$, и обратно пропорциональна полному КПД двигателя η :

$$P = \frac{FI_{уд}}{2\eta}$$

Выразив из этой формулы η , получаем формулу связывающие основные характеристики ионного двигателя: тягу F , электрическую мощность P , КПД η и расход рабочего тела \dot{m} .

$$\eta = \frac{FI_{уд}}{2P} = \frac{F^2}{2\dot{m}P}$$

Очевидно, что мощность бортового источника электропитания конечна. Это накладывает ограничения на рабочие характеристики ионного двигателя. Помимо этого, необходимо согласование характеристик для выявления эффективных режимов работы ЭРД. Мгновенную мощность бортового источника питания P можно представить через его параметры (электродвижущая сила (ЭДС) источника ξ , r – внутреннее сопротивление, напряжение U , ток I):

$$P = UI + rI^2, P = \xi I, \xi = U + Ir$$

Ограничения по мощности бортового источника могут негативно сказываться на силе тяги, расходе рабочего тела и КПД ионного двигателя. Поэтому необходимо разработать методику, согласующую характеристики и параметры ионного двигателя с целью получению выигрыша в КПД, силе тяги и расходе рабочего тела.

Одним из важных пунктов в эксплуатации двигателей является выбор рабочего тела (РТ). РТ ионного двигателя обладает множеством характеристик, таких как инертность, молекулярная масса, заряд иона, энергия ионизации, лёгкость в распылении, цена и степень токсичности. Чаще всего в ионных двигателях в качестве РТ выступают инертные газы. Известны разработки двигателей с использование в качестве РТ металлов (литий, цезий, ртуть). Но все же самым распространенным топливом для ионных двигателей является ксенон. Он имеет характеристики, позволяющие получать эффективные режимы работы ионных двигателей. Самым главным минусом ксенона являются его ресурсная недостаточность и высокая цена. Поэтому актуальным является поиск альтернативного РТ с наиболее выгодным балансом между его физическими характеристиками и ценой.

1.3. Физические процессы. Нейтрализация.

Заключительным этапом работы ЭРД является нейтрализация реактивного факела частиц. Из ЭРД в окружающее вакуумное космическое пространство истекают интенсивные пучки ускоренных ионов с высокой плотностью ионного тока и сравнительно большими поперечными размерами. Некомпенсированный поток ионов, вылетая из сопла двигателя, оставляет избыточный отрицательный заряд на корпусе космического аппарата, что влечет за собой ряд негативных факторов.

При ненулевом остаточном заряде уходящего факела аппарат, особенно малый, быстро заряжается до высокого потенциала. Формируется электрическое поле, которое тормозит истекающие из сопла ионы. Это приводит к снижению силы тяги. Очевидно, что большему влиянию тормозящего поля подвержены ионы с малыми энергиями. Для оценки степени снижения силы тяги необходимо оценить количество «медленных» электронов. Для этого необходимо учитывать разброс скоростей ионов в нейтрализаторе, а также явление резонансной перезарядки, при которой образуется значительное количество ионов с малыми энергиями. Помимо снижения тяги, медленные ионы могут осаждаться на элементах космического аппарата. Накопление может приводить к протеканию разрядов на чувствительных к электростатическому воздействию элементах, например, фотovoltaических панелях. Поэтому нейтрализация факела является очень важным этапом работе ионного двигателя и требует тщательного рассмотрения.

Для решения проблем, связанных с истечением некомпенсированного потока положительно заряженных ионов, рассматривают две задачи [9]. Первая задача заключается в полной компенсации тока истекающих положительных ионов равным ему током отрицательно заряженных частиц, и называют ее токовая нейтрализация. Главная ее задача – это сохранение электрического потенциала космического аппарата близким к потенциалу окружающего космического пространства. Условие токовой компенсации можно записать следующим образом:

$$\int_0^{\tau} (I_+ + I_-) dt = \int_0^{\tau} I_+ dt + \int_0^{\tau} I_- dt = 0,$$

где ток положительно заряженных частиц I_+ , ток отрицательно заряженных частиц I_- ;

Невыполнение этого условия приводит к быстрой зарядке космического аппарата. Изменение потенциала корпуса $\frac{d\phi}{dt}$ в данном случае можно описать следующим уравнением:

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{1}{C}(I_+ - I_-) = -\frac{1}{C} \int_S (j_+ - j_-) dS,$$

в котором C — электрическая емкость аппарата, Φ ;

j_+ и J_- — плотности тока положительно и отрицательно заряженных частиц, A/m^2 ;
 S — поверхность аппарата, m^2 .

Если учесть, что электрическая емкость космического аппарата очень мала, то даже незначительные отличия токов положительно и отрицательно заряженных частиц могут привести к зарядке аппарата до высокого потенциала за очень короткие промежутки времени.

Для правильного функционирования ионных двигателей недостаточно токовой нейтрализации. Необходима также компенсация пространственного заряда истекающих ионных пучков (зарядовая нейтрализация). В ионном пучке, истекающем в свободное от внешних полей дрейфовое пространство, возникают локальные электрические поля, которые вызывают расширение пучка и существенное замедление движущихся ионов или даже их возвращение к ускоряющей системе в случае образования виртуального анода. Поэтому вторая задача, решаемая при нейтрализации истекающих ионных пучков, заключается в непрерывной компенсации их положительного пространственного заряда на выходе из ионно-оптической системы за счет введения отрицательно заряженных частиц в поток ионов.

Условие нейтрализации пространственного заряда ρ истекающих ионных пучков может быть записано в следующем виде:

$$\rho = n_+ q_+ + n_- q_- = \rho_+ + \rho_- = 0,$$

n_+ и n_- — значения объемной концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц, m^{-3} ;

q_+ и q_- — величины их зарядов, Кл.

В проблеме нейтрализации ионных пучков необходимо реализовывать два подхода: теоретическое изучение физических процессов, протекающих при нейтрализации, и создание надежно работающих систем нейтрализации. Компенсировать заряд истекающих из двигателя пучков положительных ионов возможно с помощью электронов или отрицательных ионов. Систему нейтрализации необходимо планировать исходя из следующих простейших принципов: минимизировать энергетическую цену электрона, так как источник электронов должен обладать максимальной газовой эффективностью, обеспечить надежность схемы электропитания нейтрализатора, при этом вероятность безотказной работы и конструктивный ресурс системы нейтрализаторов не должны быть ниже, чем у остальных элементов ЭРД.

В ходе наземных испытаний прототипов ионных двигателей были исследованы различные виды нейтрализаторов: термоэмиссионные, проволочные прямоканальные катоды, плазменные источники электронов и полые катоды.

Термоэмиссионный нейтрализатор представляет собой термокатод, расположенный вне ионного пучка как можно ближе к его границе. При этом электронный ток с катода в пучок ограничивается пространственным зарядом, что приводит к увеличению энергетических затрат на компенсацию ионного пучка и к повышению потенциала летательного аппарата.

Эффективными являются также плазменные нейтрализаторы на основе полого катода. Плазма, образующаяся в результате зажигания низковольтной дуги в газообразном рабочем веществе между катодом и ионным пучком, истекает из нейтрализатора, создавая так называемый «плазменный мост», по которому электроны беспрепятственно поступают в ионный пучок. Наилучшими характеристиками по энергетической цене иона и газовой эффективности являются диафрагмированные газопроточные полые катоды (рис. 1.4). Перспективным является проектирование нейтрализаторов, располагающихся внутри ионно-оптической системы (рис. 1.5).

Катод нейтрализатора располагается вблизи выхода ионного пучка из ускорителя. Благодаря его работе, происходит соединение двух потоков разноименно заряженных частиц (ионов и электронов) в один устойчивый поток квазинейтральной плазмы. При этом задачи токовой и зарядовой нейтрализаций решаются одновременно.

Теоретическое описание нейтрализации ускоренных ионных пучков является достаточно непростой задачей, поэтому необходимо искать другие пути описания и решения поставленных задач.

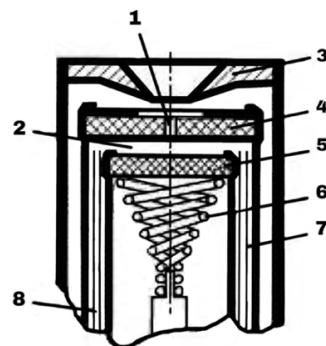


Рис. 1.4. Диафрагмированный газопроточный полый катод-нейтрализатор: 1 – выходное отверстие; 2 – катодная полость; 3 - вспомогательный электрод (анод) для поджига разрядов; 4 - диафрагма катода; 5 - катод; 6 - нагреватель; 7 - тепловые экраны; 8 - канал подачи рабочего вещества; Толщина прикатодного слоя разряда порядка дебаевского радиуса экранирования, а падение потенциала в нем близко к разрядной разности потенциалов.

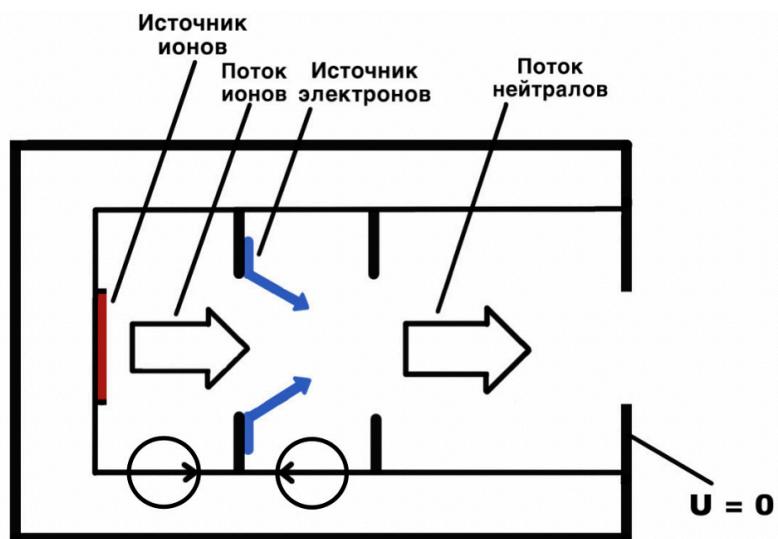


Рис 1.5. Схема ионно-оптической системы с внутренним катодом-нейтрализатором

В связи с этим были проведены эксперименты с целью изучения различных способов нейтрализации (рис. 1.6), результаты которых позволяют сделать общий вывод: с ростом электронного тока степень нейтрализации ионных пучков увеличивается.

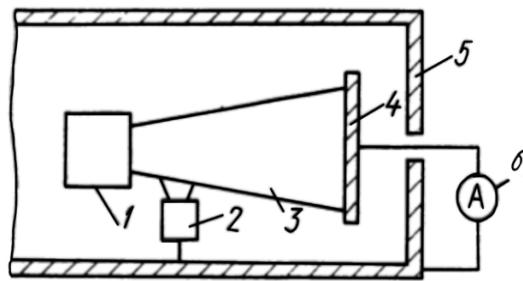


Рис. 1.6. Экспериментальная установка для исследования процессов нейтрализации: 1 – источник ионов, 2 – источник электронов, 3 – нейтрализованный факел, 4 – мишень, 5 – стенки вакуумной камеры, 6 - амперметр

При этом возникает важный вопрос о соответствии условий в вакуумных камерах условиям в космическом пространстве. В наземных вакуумных установках пролетное пространство и количество зарядов в нем ограничены и остаются постоянными во времени, в то время как в космических условиях объем пучка и количество зарядов в нем непрерывно увеличивается, и для компенсации требуется непрерывное введение в пучок электронов с нейтрализатора.

Таким образом можно сделать вывод о том, что в наземных установках моделировать космические условия для исследования процессов нейтрализации можно только в течение небольшого отрезка времени после включения двигателя, пока пучок распространяется от выходного сечения коллектора, т. е. в течение пролетного времени. Поэтому экспериментальное исследование процессов нейтрализации в ионном двигателе следует реализовывать в импульсном режиме.

Экспериментальное исследование процессов нейтрализации – это сложный процесс, имеющий ряд нерешенных проблем. Экспериментальная установка

должна быть тщательно откалиброванной, что требует немалых временных затрат. Расход дорогостоящего РТ так же является серьезным недостатком. Эти факторы в совокупности с ограниченностью экспериментального исследования нейтрализации импульсным режимом приводят к необходимости создания других методов исследования. Таковым может являться компьютерное моделирование.

1.4. Выводы и постановка задачи

С каждым годом ракетно-космическая отрасль показывает все большие темпы роста. В последнее время широкое развитие получили малые космические аппараты, имеющие ряд преимуществ перед крупногабаритными машинами. Но для малых аппаратов не подходят традиционные двигатели на керосине или метане. Перспективными являются электроракетные ионные двигатели.

Но не все физические процессы в них хорошо изучены. Процесс нейтрализации является наименее разработанным. Его описание позволило бы существенно упростить проектирование новых аппаратов и ускорить массовое производство. Также нет четкой связи между параметрами бортового источника электропитания и силой тяги, развиваемой двигателем, что не позволяет оценивать наиболее эффективные режимы работы. Экспериментальные исследования являются очень дорогостоящими из-за требуемого оборудования. Необходимо искать новые методы исследований. Перспективным является компьютерное моделирование, но нет доступных специализированных пакетов программного обеспечения для проектирования ЭРД. Поэтому необходимо изучать общедоступные пакеты для моделирования, и оптимизировать их под поставленные задачи.

Цель данной работы: дать аналитическое описание эффектам, вызванным ограничением мощности бортового источника электропитания, дать описание процессам нейтрализации ионного факела, показать возможность применения аналитических методов и компьютерного моделирования для изучения физических процессов при нейтрализации.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Аналитическое исследование эффектов, вызванных ограничением мощности бортового источника питания

Рассмотрим процессы формирования максимальной тяги в ионном ускорителе при условии ограниченности мощности бортового источника питания. Формула (1.1) связывает силу тяги с напряжением, где напряжение является независимой переменной. С учетом выражений для мощности и связи между параметрами источника для силы тяги можно написать систему уравнений, из которой получается выражение для силы тяги в зависимости от параметров источника:

$$\begin{cases} F_{TM} = \sqrt{\frac{2q}{\mu}} U^2 \\ \xi = U + Ir = U + GrU^{3/2} \\ F_{TM} = \sqrt{\frac{2\mu}{q}} \cdot \frac{U^{3/2}}{r} \left(\frac{\xi}{U} - 1 \right) \end{cases} \quad (2.1)$$

Полученное выражение является функцией $F(\mathcal{ЭДС}, U, r)$ и показывает связь между силой тяги, развиваемой двигателем, и параметрами источника питания, ограничивающими мощность.

Анализ выражения на экстремумы показывает, что наибольшую силу тяги можно достичь при

$$U_{extr} = \xi/3, r_{extr} = \frac{2\sqrt{3}}{G\sqrt{\xi}} \quad (2.2)$$

При экстремальных значениях параметров U и r выражение для максимальной силы тяги ионного двигателя выглядит следующим образом:

$$F_{E extr} = \frac{1}{9} \sqrt{\frac{2\mu}{q}} G \xi^2 = \frac{8}{9} \varepsilon_0 S d^{-2} \xi^2 \quad (2.3)$$

Из полученного выражения видно, что максимальная силы тяги формируется за счет конструктивных особенностей ускорителя (площади электродов и расстояния между ними) и ЭДС источника питания (рис 2.1).

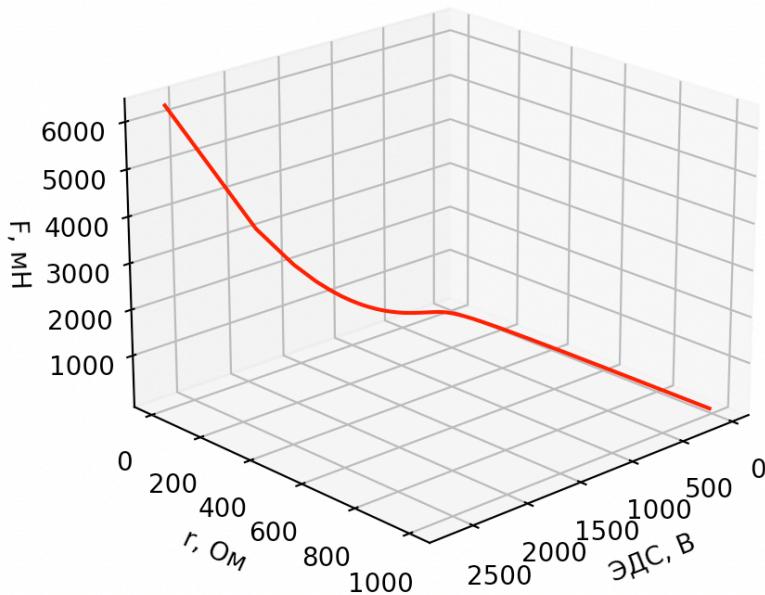


Рис. 2.1. График зависимости $F_{\text{extr}}(\mathcal{ЭДС}, r)$

На графике зависимости $F_{\text{extr}}(\mathcal{ЭДС}, r)$ (рис 2.1) отчетливо видны две области параметров, в которых ограничение силы тяги параметрами источника происходит по-разному. В области больших сопротивлений сила тяги почти не меняется при изменении параметров источника, а в области малых сопротивлений изменение параметров источника ведет к значительным изменениям силы тяги. Данные области и образуют разные режимы работы ионного двигателя.

Ионные двигатели работают в разных режимах в зависимости от их назначения и мощности. Маломощные двигатели, использующиеся в качестве устройств для корректировки траектории движения, работают при малых токах и небольших внутренних сопротивлениях источника ЭДС.

В таком случае связь между параметрами источника питания можно представить следующим образом:

$$\xi = U + Ir \approx U \quad (2.4)$$

Двигатели большой мощности, которые разрабатываются в качестве маршевых устройств, работают при больших напряжениях на зазоре и больших токах. При этом параметры конструкции ускоряющей ИОС (площадь электродов и рас-

стояние между ними) подбирают таким образом, чтобы обеспечить максимальный первенство. Тогда оба слагаемых в выражении для ЭДС становятся значимыми:

$$\xi = U + GrU^{3/2} \quad (2.5)$$

Таким образом можно оценивать влияние ограничения мощности параметрами источника питания на величину силы тяги. Для двигателей малой мощности изменение параметров источника почти не влияет на тягу, но для двигателей большой мощности это влияние значительно и его важно учитывать. При этом видно, что для реализации работы двигателей большой мощности необходимо использовать очень малые сопротивления, что может быть затруднительно. Необходимо искать решения. Одним из способов может быть увеличение массы иона. Это позволяет увеличить значения сопротивления, возможные для реализации двигателя большой мощности, без значительных потерь в тяге (рис 2.2).

Для определения экономичности и эффективности двигателя необходимо исследовать энергетическую цену тяги и КПД при разных значениях параметров источника питания. Энергетическую цену тяги в зависимости от параметров источника можно представить следующим образом:

$$C_T = \frac{F}{P} = \frac{\sqrt{\frac{2\mu}{q}} \cdot \frac{U^{3/2}}{r} \left(\frac{\xi}{U} - 1 \right)}{\xi I} = \frac{9m}{4q} \frac{d^2}{r \epsilon_0 S} \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{\xi} \right)$$

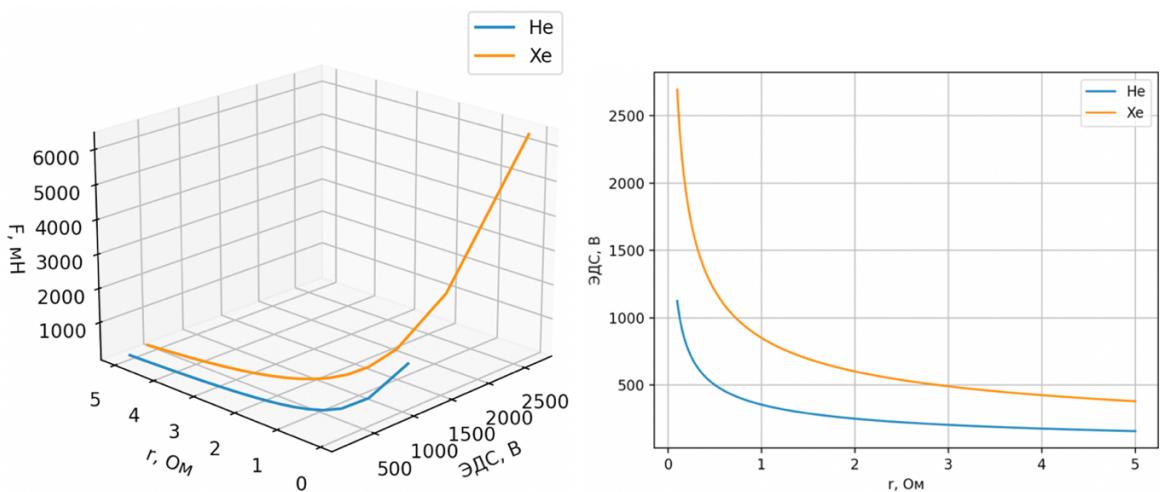


Рис. 2.2. Зависимости $F_{extr}(\mathcal{E}DC, r)$ и $\mathcal{E}DC(r)$ при различных массах иона.

Для анализа на повышение экономичности ионного двигателя необходимо рассматривать энергетическую цену тяги в экстремальном режиме. Тогда $F = F_{extr}$, а параметры источника $U_{extr} = \xi/3$, $r_{extr} = \frac{2\sqrt{3}}{G\sqrt{\xi}}$. Получается формула для определения энергетической цены тяги в экстремальном режиме:

$$C_{Textr} = \frac{F_{Extr}}{\xi I} = \sqrt{\frac{2\mu}{3q\xi}}$$

При учете выбора оптимальных параметров источника повысить экономичность можно путем выбора другого рабочего тела (рис 2.3).

При этом из приведенной выше зависимости видно, что более экономичными являются двигатели малой мощности, работающие при высоких сопротивлениях и низких напряжениях на ускоряющем зазоре. Однако это справедливо только при равных конструктивных условиях – совпадают расстояние между ускоряющими электродами и их площадь. В реальности же эти параметры для двигателей разной мощности различаются, что оказывает влияние на первеанс. В таком случае преимущество в экономичности двигателей малой мощности перед более мощными может быть скомпенсировано.

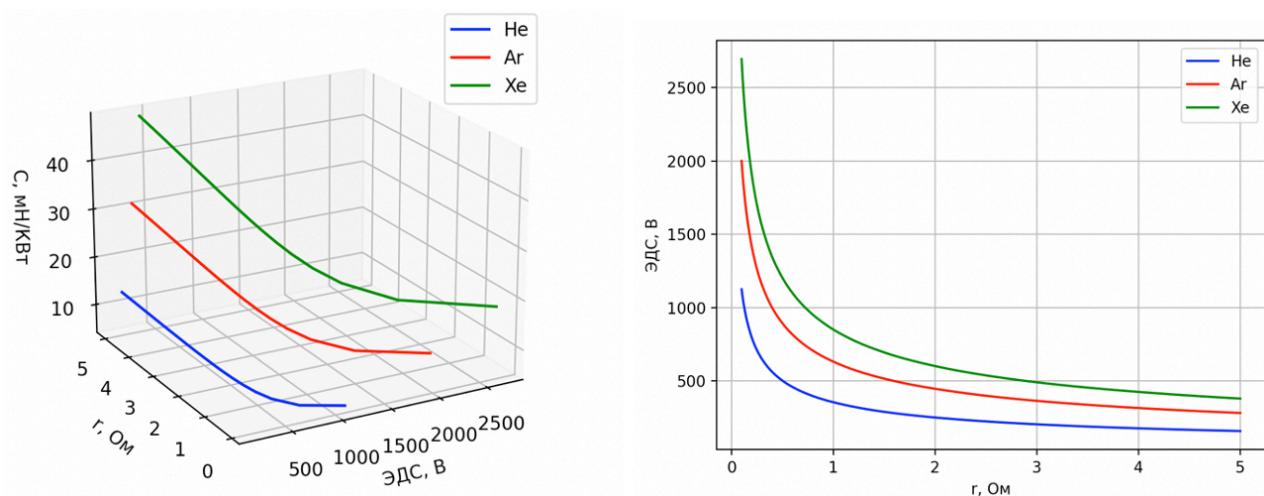


Рис. 2.3. Зависимости $C_{Textr}(ЭДС, r)$ и $ЭДС(r)$ в экстремальном режиме для различных атомов рабочего тела.

Рассмотрим влияние увеличения массы на КПД ионного двигателя. Электрический КПД в простейшем приближении можно рассмотреть, как отношение тяговой мощности к затраченной на ее получение электрической. При этом скорость иона определяется ускоряющим напряжением на зазоре:

$$\eta_e = \frac{N_t}{P}, N_t = \frac{\dot{m}v^2}{2}, v^2 = \frac{2eU}{\mu}$$

С учетом выражения Чайльда-Ленгмюра выражение для электрического КПД можно представить следующим образом:

$$\eta_e = \frac{9}{4\sqrt{2}} \sqrt{\frac{q}{\mu}} \frac{d^2}{\epsilon_0 S} \frac{\dot{m}}{\xi \sqrt{U}}$$

КПД в экстремальном режиме при $U_{extr} = \xi/3$:

$$\eta_e = \frac{9}{4} \sqrt{\frac{3q}{2\mu}} \frac{d^2}{\epsilon_0 S} \frac{\dot{m}}{\xi^{3/2}}$$

Полный КПД ионного двигателя является произведением газового КПД на электрический:

$$\eta = \eta_g \eta_e = \frac{9}{4} \sqrt{\frac{3q}{2\mu}} \frac{d^2}{\epsilon_0 S} \frac{\dot{m}_i}{\xi^{3/2}}$$

При этом необходимо показать зависимость от массы иона. Расход ионов можно представить следующим образом:

$$\dot{m}_i = \mu N,$$

где N – количество частиц;

$$\dot{m}_i = \frac{d(\mu N)}{dt} = \mu \dot{N}$$

Тогда выражение для полного КПД ионного двигателя принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{9}{4} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mu q}{\epsilon_0 S} \frac{d^2}{\xi^{3/2}} \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}} \quad (2.6)$$

Получаем $\eta \sim \sqrt{\mu} \dot{N}_i / \dot{N}$. Это значит, что увеличение массы иона снижает расход частиц рабочего тела.

Увеличение массы частиц рабочего тела полезно не только для уменьшения расхода частиц рабочего тела и повышения экономичности тяги. При прочих неизменных условиях повышение массы иона, очевидно, ведет к уменьшению его максимальной скорости. Это приводит к уменьшению длины свободного пробега частицы в области дрейфа после прохождения ускоряющих электродов. На этом этапе происходит нейтрализация положительного потока ионов потоком электронов с катода-нейтрализатора. Уменьшение длины пробега увеличивает число столкновений между частицами, что значительно повышает эффективность нейтрализации.

Помимо изменения массы можно пытаться изменить заряд иона. Но процесс образования многозарядных ионов более сложный, требует внесения конструктивных изменений и изменения рабочих характеристик. При этом не доказано, что переход к многозарядным ионам может давать повышение экономичности или эффективности, как, например, при увеличении массы иона.

2.3. Компьютерное моделирование

Физические процессы в ионном двигателе требуют тщательного изучения и описания. Традиционные аналитические методы применимы только к простым ионно-оптическим или электродинамическим задачам, как правило при вводе широкого ряда упрощений, что является серьезным недостатком. При моделировании процессов ионизации в ГРК как правило используют численный метод Монте-Карло, учитывающий столкновения между нейтральными частицами рабочего тела и электронами. Для получения траекторий частиц и электромагнитных полей, как правило, решаются уравнения Максвелла с учетом граничных условий Неймана и Дирихле, применяются сеточные методы и преобразование Фурье.

Для эффективного моделирования используются современные программные пакеты, к примеру, COMSOL, CST, IBSIMU, IGUN. Но в известных источниках не представлено применение данных кодов для исследования и проектирования ионных двигателей, что сдерживает развитие и разработку новых

устройств. Поэтому пакеты для трехмерного моделирования требуют тщательного изучения, из всего многообразия необходимо выбрать пакет, обладающий наибольшим числом полезных функций, применимых к поставленной задаче.

COMSOL Multiphysics[®] — это интегрированная среда моделирования, в которой можно выполнить все этапы построения расчетных моделей и процессов в различных областях научных исследований [10]. Пакет содержит модуль «Charged particle Tracing», предназначенный для получения траекторий заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Возможен учет взаимодействия частиц между собой и потоком среды. В модуле «Particle Tracing for Fluid Flow» возможно проектировать движение микроскопических и макроскопических частиц в подвижной среде. Модуль «Mathematical Particle Tracing» позволяет использовать широкий ряд уравнений, в том числе уравнения движения безмассовых частиц, уравнения в формулировках Ньютона, Лагранжа, Гамильтона, а также уравнения для сил, описываемых пользователем.

IBSIMU — среда для моделирования потоков заряженных частиц с учетом объемного заряда. Вычисления производятся решателем нелинейного уравнения Пуассона на основе метода конечных разностей при учете начальных и граничных условий первого и второго порядка аппроксимации. Для моделирования пучков с высоким пространственным зарядом используются итерации уравнения Власова [11].

CST Studio Suite — пакет программного обеспечения, предназначенный для моделирования и анализа физических процессов в электронных приборах [12]. Пакет имеет модуль «Particle Studio», предназначенный для анализа движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях. «Particle Studio» имеет вычислитель «Tracking Solver», предназначенный для расчета траекторий заряженных частиц в самосогласованных полях. Но данный вычислитель не предназначен для моделирования динамических процессов. Для этого используется вычислитель «Particle in Cell (PIC) Solver»

Сравнение возможностей моделирования физических процессов можно провести на простейшей двухэлектродной модели (рис. 2.4). В сочетании с разработанными алгоритмами [13], с помощью пакетов CST и COMSOL можно получить траектории ионных и электронных пучков, их параметры и индуцированный электрический заряд.

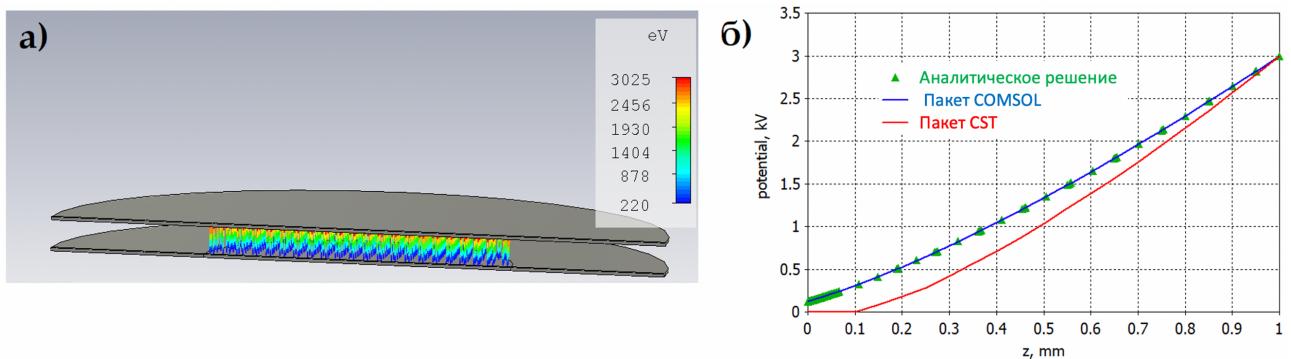


Рис. 2.4. Траектории частиц (а). Сравнение результатов моделирования в пакетах CST и COMSOL (б) [14]

Различие результатов моделирования связано с особенностями расчета в области вблизи поверхности эмиссии или инжекции ионов. Пакет COMSOL дает более близкие значения к модели Чайльда-Ленгмюра, по которой производились теоретические расчеты [14].

Для моделирования процессов нейтрализации в ионном двигателе был выбран пакет CST Studio Suite, потому что он обладает широким набором функций для решения поставленных задач. Пакет позволяет использовать геометрические модели, экспортруемые из большинства популярных CAD программ. Программная архитектура пакета позволяет разделять потоки задач для ускорения их выполнения и задействования меньшего количества оперативной памяти.

Часто при проектировании моделей со сложной геометрической формой приходится использовать классическую прямоугольную сетку, имеющую большое количество мелких ячеек. Процесс моделирования в таком случае требует большой вычислительной мощности и временных ресурсов. Для решения такого

рода проблем в CST можно использовать встроенную аппроксимацию идеальных граничных условий - Perfect Boundary Approximation (PBA). Использование PBA сетки обеспечивает огромный прирост в производительности без потери точности расчетов и значительно сохраняет ресурсы вычислительной машины (рис 2.5). Также одним из главных достоинств CST является возможность анализировать потоки частиц с учетом поля объемного заряда.

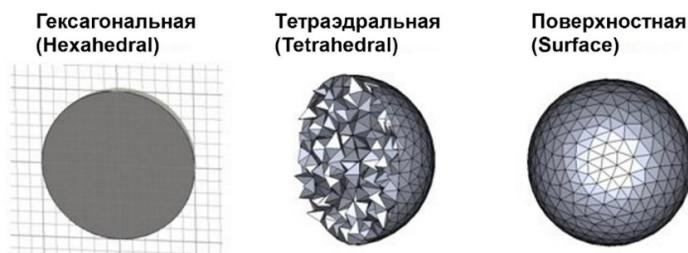


Рис. 2.5. Типы сеток в CST

Для решения поставленной задачи могут использоваться два вычислителя модуля CST Particle Studio - Tracking Solver и PIC Solver.

В вычислителе Tracking Solver используется итерационный метод моделирования. На каждом шаге циклического алгоритма решаются уравнения движения крупных частиц, стартующих с центров эмиссии на поверхности катода. В результате определяются траектории этих частиц с учетом распределения "внешних" электрического и магнитного полей, связанных с источниками напряжения и тока, а также распределения поля пространственного заряда, определенного на предыдущем шаге. Поскольку электрические заряды вычисляются с привязкой к ячейкам сетки, то необходимо выполнять процедуру интерполяции для определения полей в точке нахождения каждой частицы.

Описанные действия повторяются до удовлетворения условий сходимости, когда распределения пространственного заряда на текущем и предыдущем шаге различаются не более, чем на заданную пороговую величину. Результатом подобного траекторного анализа являются самосогласованные траектории частиц (трубки тока), характеризующие стационарное состояние потока [15].

Для моделирования физических процессов в ионном двигателе был выбран модуль Particle Dynamics пакета CST Studio. На первом шаге необходимо создать геометрическую модель (рис 2.6). В CST Studio это можно сделать с помощью встроенных примитивов (цилиндр, сфера, куб), либо параметрическим путем. В разделе для моделирования геометрии объекта есть все необходимые операции, например, логические сложение и вычитание, округление и др. Материалы проектируемого объекта можно выбрать в Material library.

После моделирования геометрических параметров необходимо задать электрические потенциалы и источники частиц (рис 2.7).

Важным этапом подготовки к моделированию является задание 2D мониторов и сетки (рис 2.8).

При запуске решателя Tracking Solver можно задать учет поля объемного заряда и собственное магнитное поле частицы. В этом же окне можно задать точность и другие параметры решателя (рис 2.9).

Для того, чтобы получить интересующие нас распределения, необходимо задать их в post processing (рис 2.10).

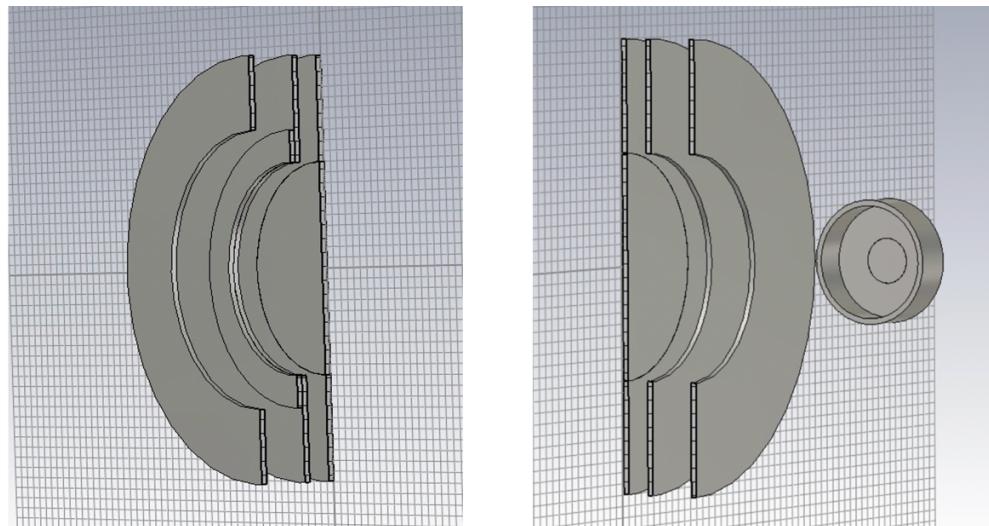


Рис. 2.6. Построение геометрии модели

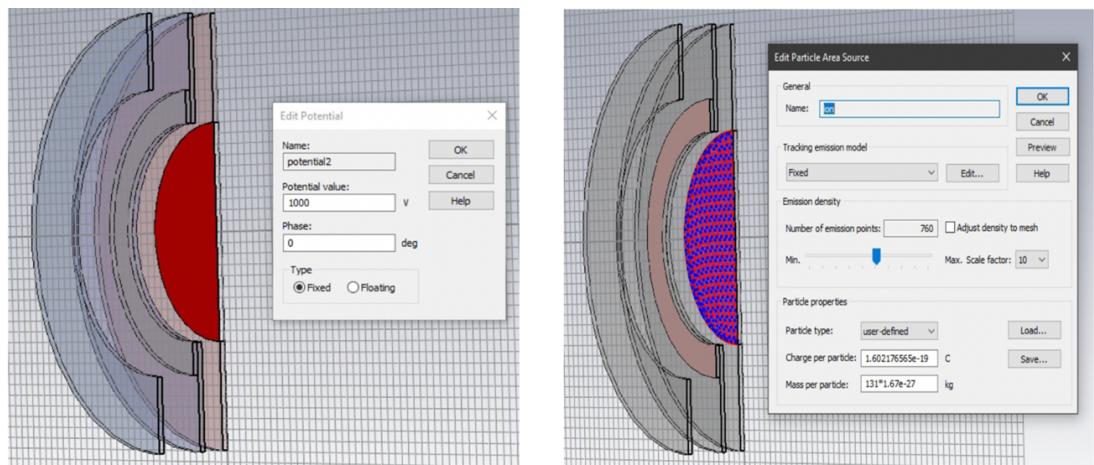


Рис. 2.7. Установка потенциалов и источников частиц

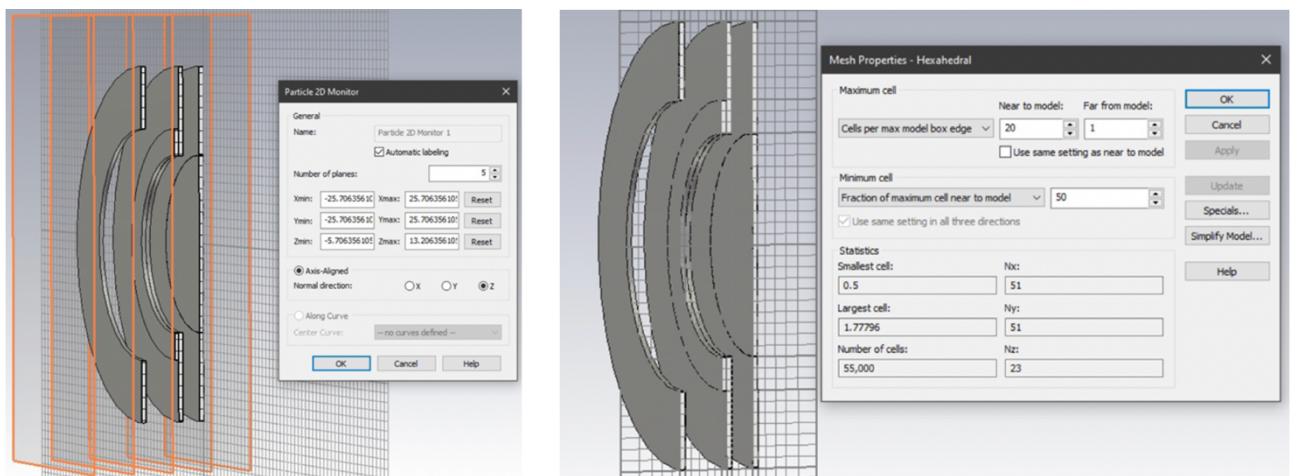


Рис. 2.8. Задание мониторов и сетки.

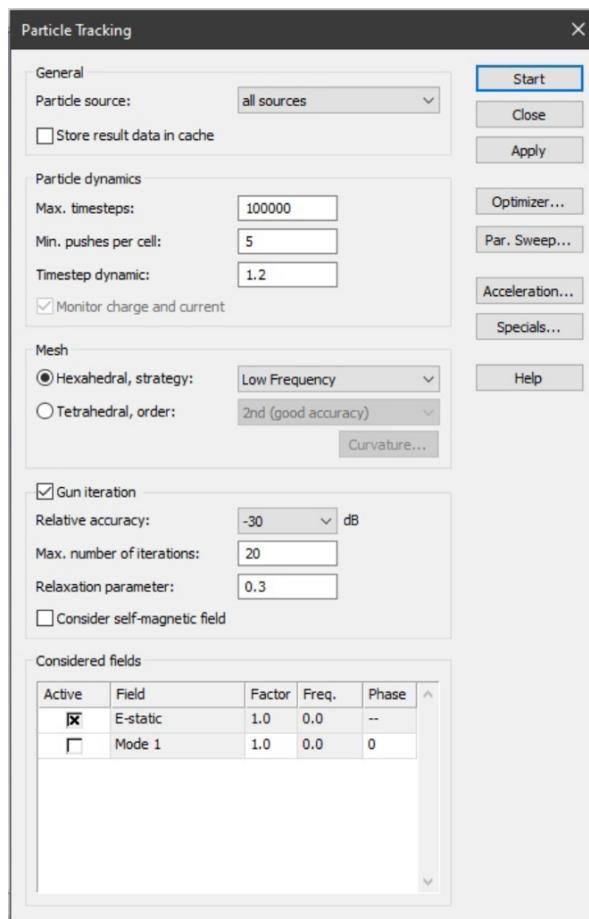


Рис. 2.9. Определение параметров решателя

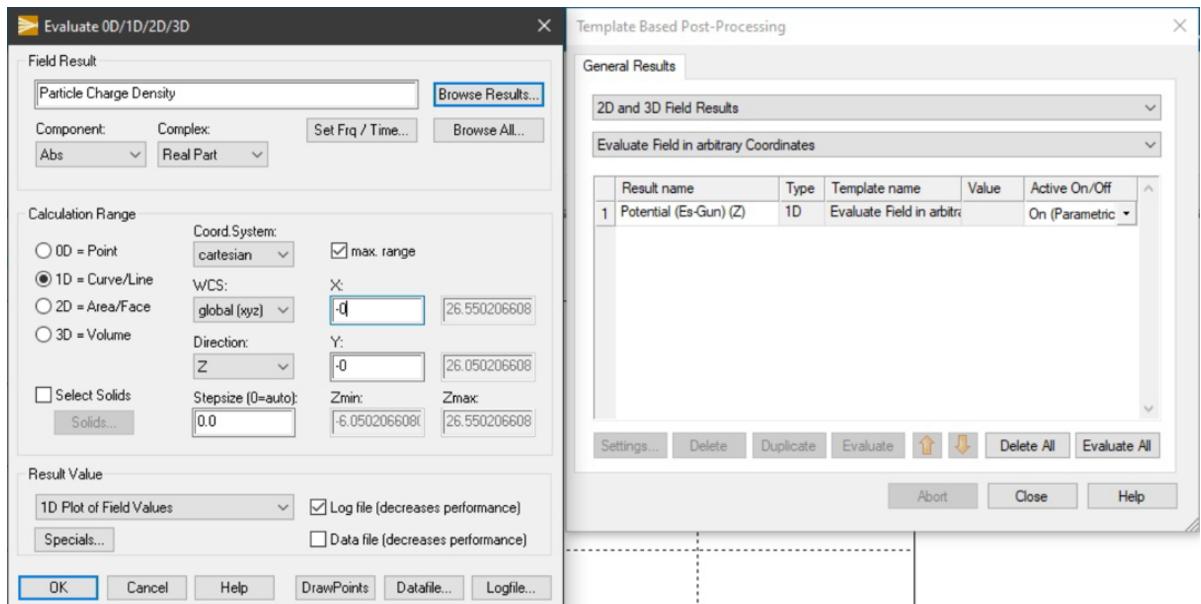


Рис. 2.10. Задаем построение график зависимости Particle Charge Density от координаты z

2.4. Оценка процессов аннигиляции частиц при нейтрализации

Необходимо оценить число процессов аннигиляции заряженных частиц с образованием нейтралов в общем процессе нейтрализации. Рассмотрим область нейтрализации между электродами в случайный момент времени во время работы ионного двигателя. При прохождении частиц на определенном критическом расстоянии друг от друга происходит аннигиляция их зарядов.

В простейшем случае взаимодействие частиц можно рассмотреть как взаимодействие двух твердых шаров с радиусами r_i и r_{el} , при столкновении которых происходит аннигиляция. Сечение процесса σ в таком случае:

$$\sigma = \pi(r_i + r_{el})^2, \text{ при } r_i \gg r_{el}: \sigma = \pi r_i^2$$

В реальности частицы обладают импульсом, зарядом, а взаимодействие происходит не при нулевом прицельном параметре (не «лоб в лоб») (рис. 2.11).

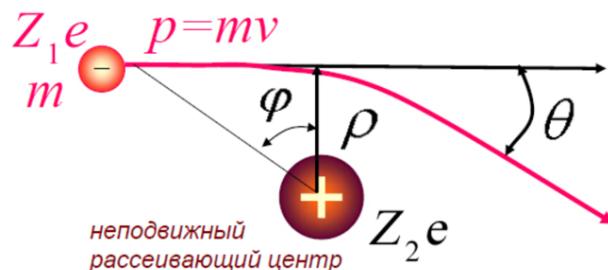


Рис. 2.11. Кулоновское взаимодействие электрона и иона

Пусть в начале координат расположен положительно заряженный ион, масса которого много больше массы электрона, поэтому считаем его неподвижным. К нему приближается электрон с массой m , со скоростью v и с прицельным расстоянием ρ . Между частицами действует кулоновская сила притяжения, обратно пропорциональная квадрату расстояния между центрами.

Закон сохранения энергии и закон сохранения импульса в полярной системе координат:

$$\begin{cases} \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2) + \frac{kZ_1Z_2}{r} = \frac{mv^2}{2}, \\ mr^2\dot{\phi} = mv\rho, \end{cases}$$

где r, ϕ - координаты электрона;

m – его масса в кг;

ρ - прицельный параметр в метрах;

Z_1, Z_2 – заряды частиц в Кл,

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2} \right]$$

Заряды частиц равны по модулю заряду электрона и противоположны по знаку, прицельный параметр можно выразить соотношением:

$$\rho = \frac{|-e^2|}{mv^2} \operatorname{ctg} \frac{|\theta|}{2}$$

Минимальное расстояние между частицами:

$$r_{min} = \frac{e^2}{mv^2} \frac{1 - \sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{e^2}{mv^2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{mv^2}{e^2} \right)^2 \rho^2} - 1 \right)$$

Получаем минимальное расстояние между частицами с учетом кулоновского притяжения. Минимальное расстояние является функцией прицельного расстояния, зарядов частиц, а также массы и скорости налетающих частиц.

$$r_{min} = f(Z_1, Z_2, m, v, \rho)$$

Скорость налетающей частицы определяется ускоряющей разностью потенциалов U :

$$r_{min} = \frac{e}{2U} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2U}{e} \right)^2 \rho^2} - 1 \right)$$

Аннигиляция частиц происходит при $r_{min} \leq r_i$. Подставив в выражение в качестве r_{min} значение радиуса иона r_i , получаем прицельный параметр – максимальное отклонение от оси столкновения частиц «лоб в лоб», при котором возможна аннигиляция. Тогда сечение процесса можно представить как:

$$\sigma = \pi \rho^2$$

Для того, чтобы оценить нейтрализацию, необходимо знать концентрации частиц, то, как изменяется их число в пространстве и во времени, распределение потенциала в области нейтрализации, а также скорости частиц. Для этого нужно

рассмотреть уравнения Пуассона для смеси частиц разного сорта, уравнения непрерывности для каждого из сортов частиц, а также из уравнения движения Ньютона-Лоренца получить выражение для скорости частиц в зависимости от координаты и пройденной разности потенциалов. Получается система:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \nabla \overrightarrow{J_{el}} = -e \frac{dn}{dt}, \\ m \frac{d\vec{V}}{dt} = e\vec{E} + e\vec{V} \times \vec{B} \end{cases}$$

В общем случае рассмотрение нейтрализации является сложной задачей, необходимо ввести упрощения. Рассмотрим одномерную задачу в приближениях квазистатики:

$$\tilde{B} \sim 0, \nabla\varphi = -\vec{E}, \frac{\partial n}{\partial t} = 0$$

Собственное магнитное поле частиц примем равным нулю. Тогда получаем систему для поиска неизвестных величин:

$$\begin{cases} \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0} \\ \frac{d}{dx}(\rho(x)\vec{V}) = 0 \\ V^2(x+dx) - V^2(x) = 2\frac{e}{m}(\varphi(x+dx) - \varphi(x)) \end{cases}$$

Концентрацию частиц разбиваем на две части:

$$n = n_{(v)} - n_{(n)},$$

первая изменяется вдоль оси x из-за изменения скорости, а вторая – из-за нейтрализации.

Необходимо задать граничные условия, для этого еще раз обратимся к условию задачи. Перед входом в область нейтрализации (плоскость второго электрода, возьмем ее за начало отсчета $x = 0$) катионы приобретают скорость, формируемую разностью потенциалов между первым и вторым электродом U_1 .

Плотность тока ионов при инжекции из ускорителя в область нейтрализации:

$$J_{i0} = G(\varphi_1 - \varphi_2)^{3/2}, V_{i0} = \left(2 \frac{e}{m} (\varphi_1 - \varphi_2)\right)^{1/2} n_{i0} = \frac{J_{i0}}{V_{i0}}, n_i(l) = 0$$

Ток термоэмиссии электронов описывается законом Ричардсона-Дешмана, начальные скорости электронов тепловые, далее в пространстве зависят от потенциала:

$$J_{el0} = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right), v_{el0} = \left(\frac{3kT}{m}\right)^{1/2}, n_{el0} = \frac{J_{el0}}{V_{el0}}, n(l) = C$$

Границные условия по потенциалу в области нейтрализации:

$$\varphi(x=0) = \varphi_2, \varphi(x=l) = 0$$

Выражение для потоков преобразуется в:

$$\frac{dJ(x)}{dx} = \left(v \frac{\partial}{\partial x}\right) n_{(v)}(x) - \frac{d}{dt} n_{(n)}(x).$$

Наложим условия аннигиляции частиц:

$$\frac{\partial}{\partial x} n_{(n)i}(x) = \frac{\partial}{\partial x} n_{(n)el}(x) = f(x),$$

$f(x)$ – функция, описывающая изменение (убывание) концентрации заряженных частиц с координатой x в следствие аннигиляции.

Тогда справедливо:

$$\left[\frac{d}{dt} n_{(n)}(x)\right]_i = v_i f(x), \left[\frac{d}{dt} n_{(n)}(x)\right]_{el} = v_e f(x).$$

Полученные выражения показывают изменение числа частиц во времени в зависимости от координаты x .

Пакет CST Suite не имеет необходимых функций для оценки нейтрализации за счет процессов аннигиляции частиц, поэтому был проведен численный эксперимент на основе алгоритма, написанного на языке Python [Приложение А]. Рассмотрим область нейтрализации в какой-то случайный момент времени работы ионного двигателя. На первом этапе геометрически задаем область моделирования, которая представляет собой в идеальном случае цилиндр (площадью S и длиной L) с центром одного из оснований в начале координат и ориентированный вдоль оси X. Внутри области задается n_e электронов и n_i ионов.

К каждой частице из начала координат проведем радиус вектор. Далее для каждого иона и каждого электрона проверяем разность между их радиус векторами. Если длина вектора разницы меньше радиуса сечения аннигиляции, происходит нейтрализация. По итогу эксперимента определим количество образовавшихся нейтралов, а также отношение числа нейтралов к первоначальному числу ионов.

Внутри области моделирования рассмотрим трубку тока площадью dS и длиной L . Трубка тока содержит «холодный» поток частиц в гидродинамическом приближении, в котором изменение концентрации частиц с координатой обусловлено исключительно процессами нейтрализации. При этом начальные скорости частиц будут задаваться только напряжением на электродах. Уменьшение площади области моделирования с S до dS пропорционально уменьшит количество исследуемых частиц.

Длину трубки тока разобьем на M элементов длиной dl и применим вышеописанный алгоритм в новой области моделирования $dS \cdot dl$ M раз. При этом на каждом повторении будем убирать из алгоритма электроны и ионы, аннигилировавшие на прошлой итерации. Длину элемента dl сделаем величиной, равной длине свободного пробега иона в трубке тока.

Оценим нейтрализацию при разных токах электронов. Проведем 3 эксперимента при токе ионов в 20 мА и токах электронов 124 мА, 0.25 А, 0.45 А. При токе электронов в 124 мА число электронов очень близко к числу ионов в области моделирования.

Область нейтрализации – цилиндр с основанием в $S = 40 \text{ мм}^2$, длиной $L = 5 \text{ мм}$, рабочее тело - атомы ксенона - нейтрализуются электронами. Трубка тока (область моделирования) площадью сечения $dS = 1.25 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, $dl_1 = 0.233 \text{ мкм}$, $dl_2 = 0.164 \text{ мкм}$, $dl_3 = 0.122 \text{ мкм}$.

Радиус сечения аннигиляции в таком случае – $r_a = 1.08359 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, сечение – $\sigma = 3.68876 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Результаты исследования эффектов, вызываемых ограничением мощности бортового источника питания

Конечная мощность бортового источника электропитания накладывает ограничения на рабочие характеристики двигателя и его технические показатели. Оказывается, что развиваемая двигателем сила тяги зависит от ЭДС, напряжения и внутреннего сопротивления источника питания (формула 2.1). Эти параметры должны быть согласованы между собой для получения максимальных значений силы тяги (формула 2.2). Экстремальная сила тяги явно зависит от конструктивных особенностей ускорителя (площади электродов, расстояния между ними), ЭДС источника питания (формула 2.3).

При этом зависимость $F_{extr}(\mathcal{E}DC, r)$ (рис. 2.1) имеет две характерные области значений параметров источника питания, относящиеся к разным режимам работы ионного двигателя. В области больших внутренних сопротивлений источника экстремальная сила тяги слабо зависит от его параметров (ЭДС, напряжение, внутреннее сопротивление). Это соответствует маломощным двигателям, работающим при малых токах и небольших внутренних сопротивлениях источника. Параметры источника в таком случае связаны выражением (формула 2.4) Двигатели большой мощности работают при больших напряжениях на зазоре, больших токах. При этом параметры ускоряющей ионно-оптической системы выбирают так, чтобы сделать максимальным первенство. В таком случае связь между параметрами источника описывается выражением (формула 2.5)

Из зависимости $F_{extr}(\mathcal{E}DC, r)$ (рис. 2.1) видно, что в случае с мощными двигателями тяга сильно зависит от внутреннего сопротивления. Но бесконечно уменьшать его не получится, поэтому необходимо искать альтернативу. Решением может являться увеличение массы иона, что позволяет значительно увеличить диапазон оптимальных внутренних сопротивлений без ущерба для тяги (рис. 2.2).

Анализ энергетической цены тяги показал, что увеличение массы атомов рабочего вещества приводит к повышению экономичности (рис. 2.3), при этом двигатели малых мощностей являются более экономичными по сравнению более мощными при равенстве всех конструктивных параметров. В реальности же первенство у двигателей разной мощности отличается, и различие в экономичности может быть скомпенсировано.

Получена связь между полным КПД ионного двигателя, массой атомов рабочего тела и расходом частиц (формула 2.6). Очевидно, что увеличение массы атомов приводит к снижению расхода частиц.

Помимо этого, увеличение массы атома снижает максимально-развиваемую скорость ионов. Это уменьшает длину свободного пробега и увеличивает частоту столкновений частиц в области нейтрализации, что значительно повышает эффективность аннигиляции.

3.2. Результаты компьютерного моделирования в CST

Моделирование в Tracking Solver позволяет получить траектории частиц с учетом действия поля пространственного заряда (рис. 3.1), распределения потенциала (рис. 3.2) и плотности заряда (рис. 3.3). Видно, что при расположении источника электронов внутри ионно-оптической системы потоки электронов и ионов коллинеарны, область взаимодействия между ними намного больше, чем при использовании внешнего катода, что значительно увеличивает вероятность процессов аннигиляции. Это делает перспективным расположение нейтрализатора внутри ионно-оптической системы. Таким образом, можно делать выводы о нейтрализации и искать наиболее оптимальные конструктивные решения.

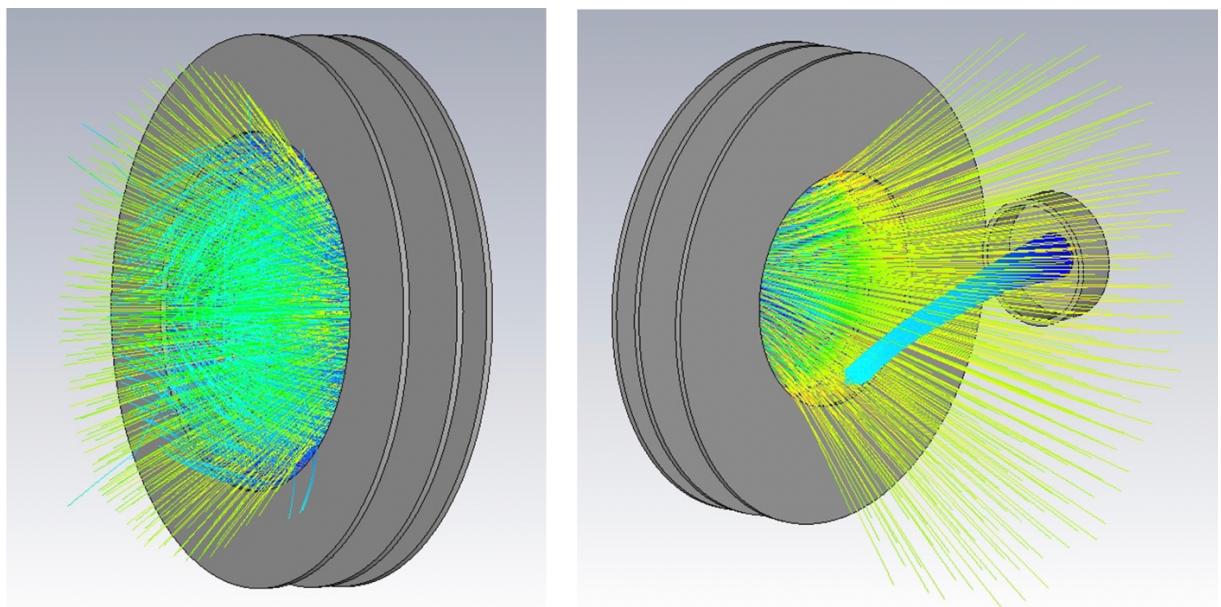


Рис. 3.1. Траектории частиц при разных конструктивных конфигурациях ионного двигателя.

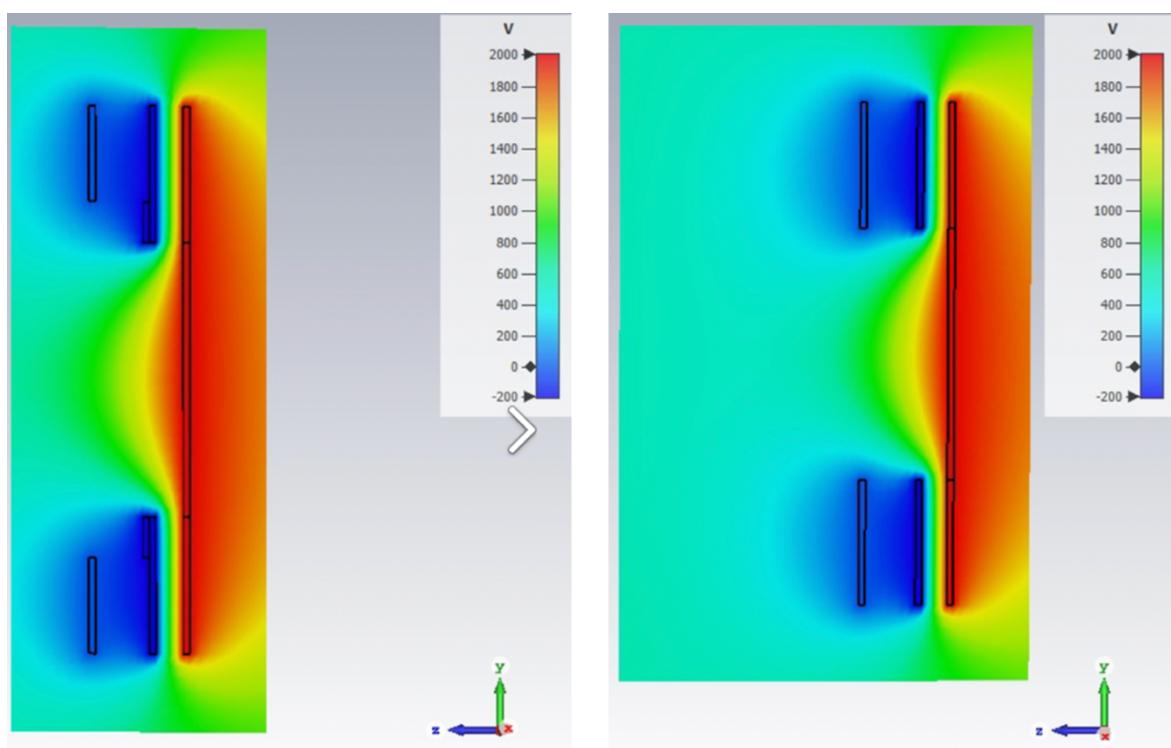


Рис. 3.2. Распределения потенциала

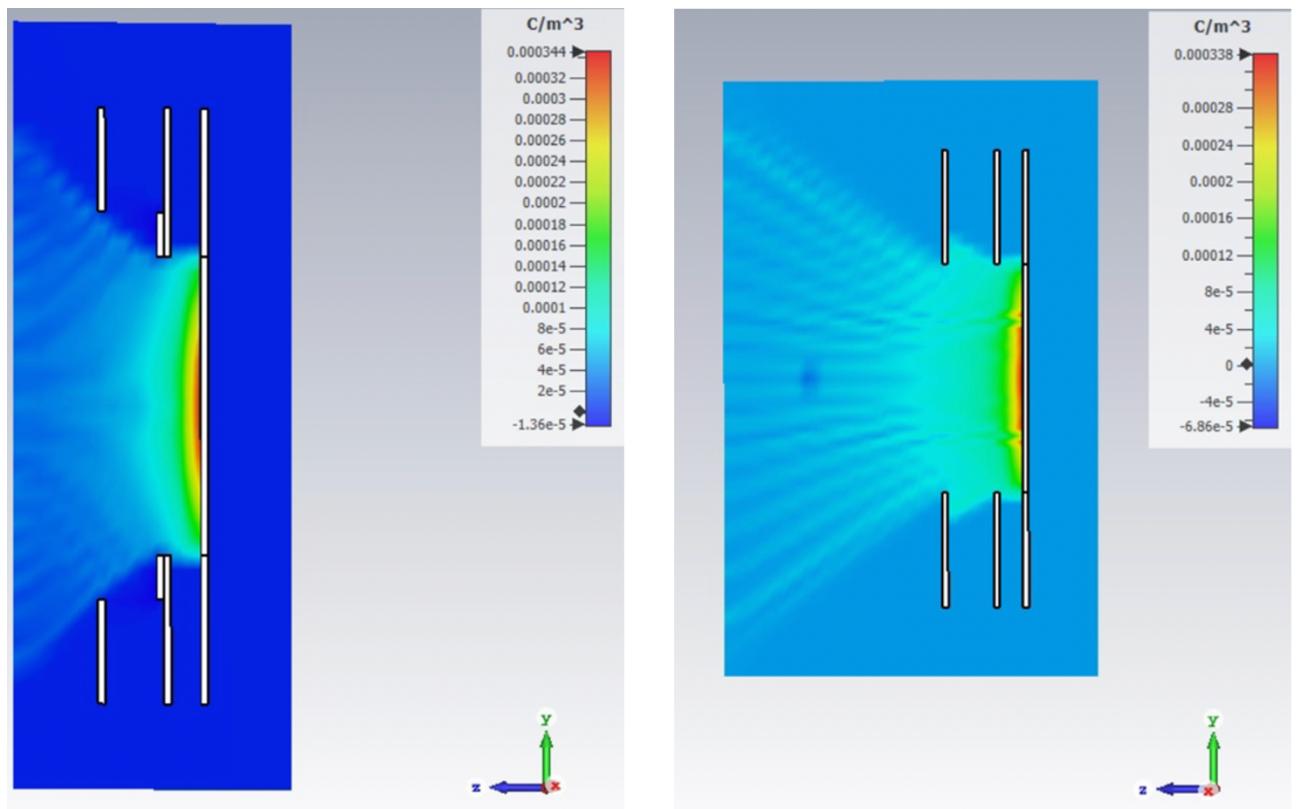


Рис. 3.3. Распределения плотности заряда

3.3. Результаты численной оценки нейтрализации

Пример начального распределения частиц в области нейтрализации и в трубке тока без учета нейтрализации изображен на рисунке 3.4.

Число заряженных частиц одного сорта в области нейтрализации:

$$N_{\text{нейтр}} = n_0 S l$$

где n_0 – концентрация частиц в начальный момент времени в области $x = 0$.

Число заряженных частиц одного сорта в трубке тока:

$$N_{\text{тт}} = n_0 d s d l$$

Распределение концентрации ионов вдоль оси при токе ионов 20 мА и токах электронов 124 мА, 0.25 А, 0.45 А с учетом нейтрализации изображено на рисунке 3.5. Коэффициент нейтрализации, рассчитываемый как отношение числа ионов после нейтрализации к начальному числу ионов, для каждого тока электронов получается $K_{0.124} = 38.6 \%$, $K_{0.25} = 74.5 \%$, $K_{0.45} = 97.0\%$.

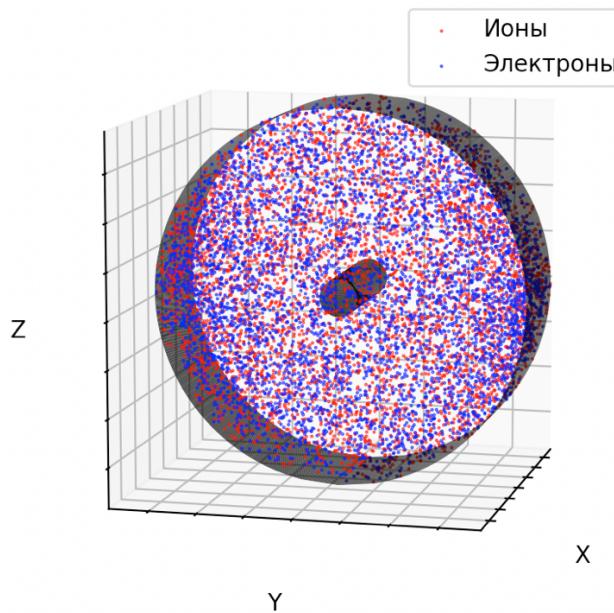


Рис. 3.4. Пример распределения частиц внутри области нейтрализации и трубы тока

Видно, что для полной нейтрализации потока ионов недостаточно использования тока электронов, дающего равные концентрации частиц в области нейтрализации. Необходимо использовать токи электронов большие, чем ток ионов. Учитывается, что часть электронов, оставшаяся после полной нейтрализации ионного потока, попадает на третий электрод, оставляя нулевой объемный заряд.

Распределение потенциала рассчитываем в каждой точке как суперпозицию линейного потенциала, создаваемого электродами, и потенциала некомпенсированного заряда. Линейный потенциал в рассматриваемом примере можно представить в виде:

$$\phi_l = 4 \cdot 10^4 x - 200$$

Для определения потенциала некомпенсированного заряда необходимо в каждой точке решать уравнение Пуассона, что является непростой задачей. Если учесть, что квадрат величины dl является малой величиной, то потенциал некомпенсированного заряда в каждой точке можно определить рекуррентным соотношением:

$$\Phi_{m+1} = \rho(x_m) \frac{dl}{\epsilon_0} + \Phi_m$$

Получившееся распределение потенциала вдоль оси изображено на рисунке 3.6.

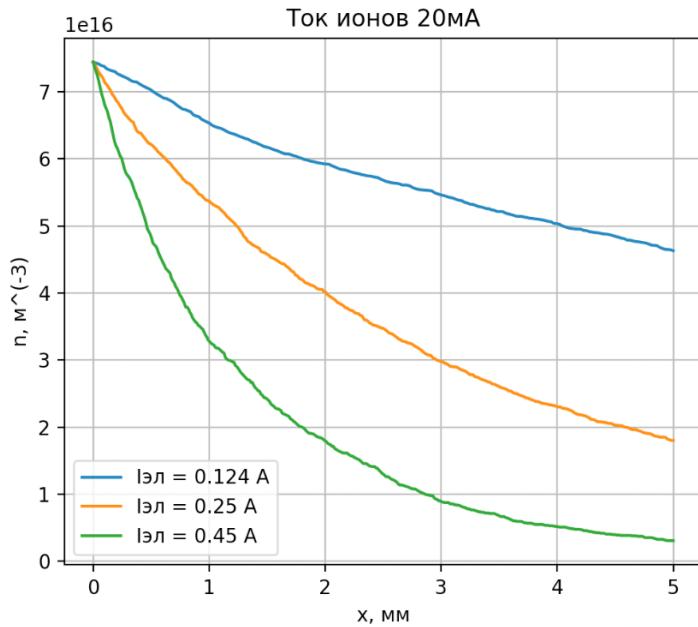


Рис. 3.5. Распределение концентрации ионов вдоль оси при разных токах

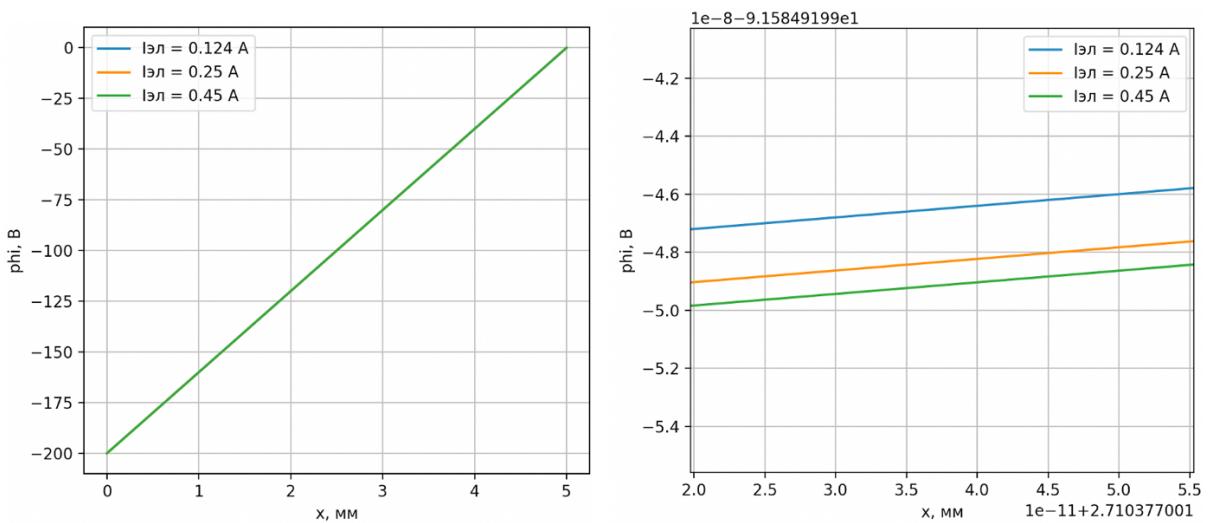


Рис. 3.6. Распределение потенциала в области моделирования

Распределение скоростей частиц необходимо рассчитывать с учетом начальных скоростей и действия электрического поля.

$$v_i = \left(2 \frac{e}{m} (U_1 - U(x)) \right)^{1/2} \quad v_{el}(x) = (v_{0el} + \frac{2e}{m_{el}} U(x))^{1/2}$$

где U_l – напряжение на ускоряющем зазоре.

Изменения скоростей частиц вдоль оси показаны на рис. 3.7 и рис. 3.8.

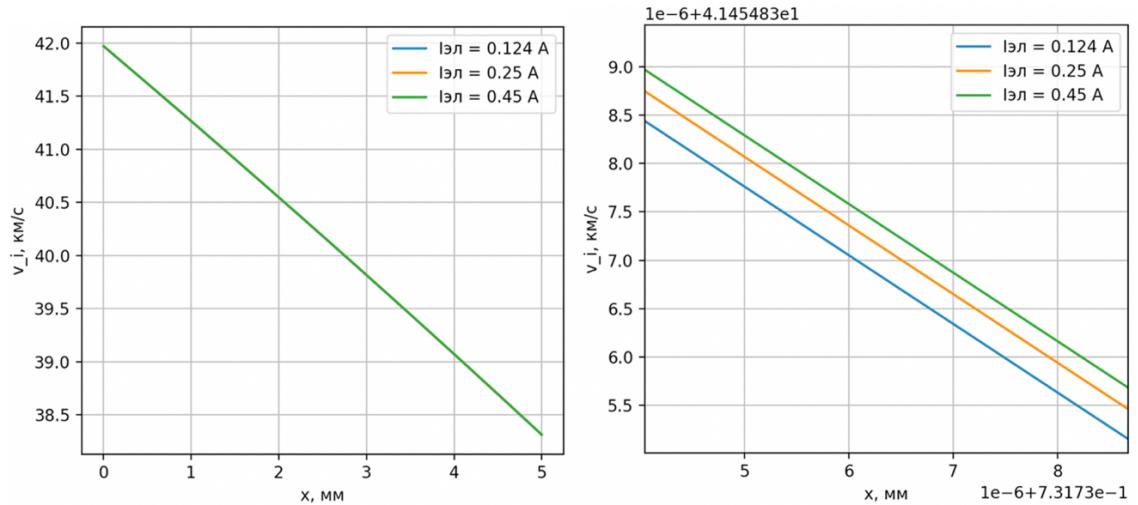


Рис. 3.7. Изменение скоростей ионов вдоль оси Z

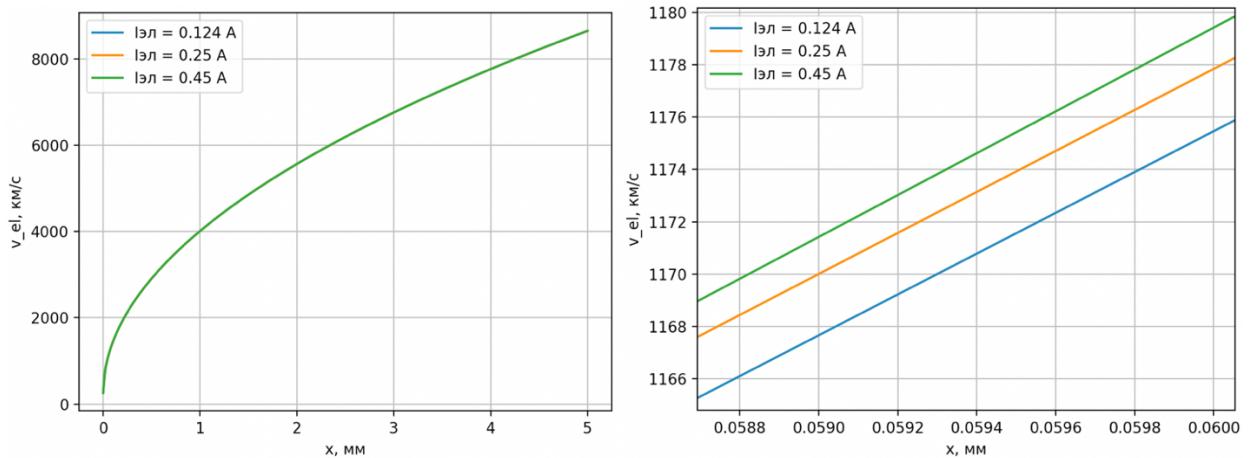


Рис. 3.7. Изменение скоростей электронов вдоль оси

Частоту ион-электронных соударений можно вычислить как:

$$\nu(x) = dsdl\sigma n_i(x)n_{el}(x)(v_i(x) + v_{el}(x))$$

Тогда длина свободного пробега иона [16]:

$$\lambda(x) = \frac{v_i(x)}{\nu(x)}$$

Зависимость длины свободного пробега от координаты показана на рисунке 3.8.

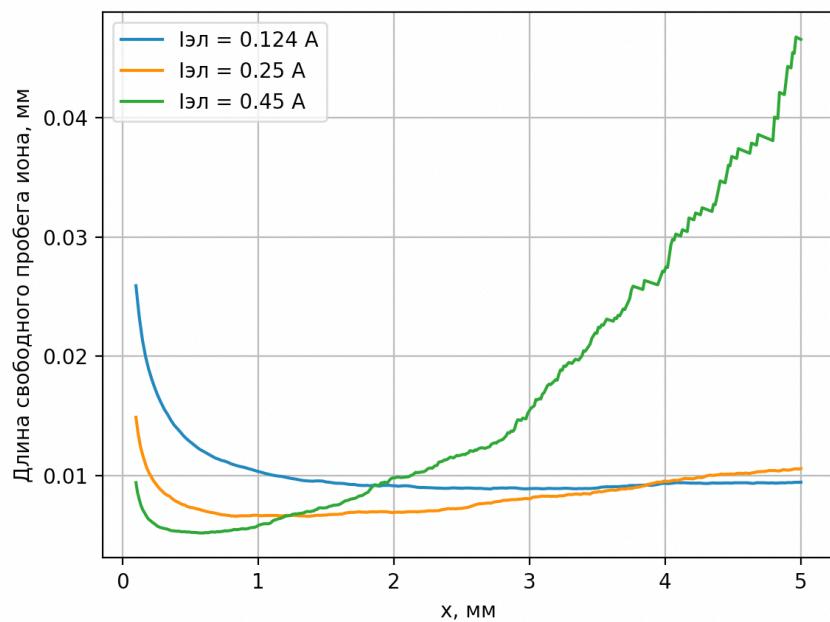


Рис. 3.8. Зависимость длины свободного пробега иона от координаты

Из уравнения непрерывности:

$$\frac{d}{dx} (J_i + J_e) = -v_i(x) \frac{d}{dx} \rho_i(x) - v_e(x) \frac{d}{dx} \rho_e(x)$$

График изменения смешанного потока с координатой изображен на рис. 3.9.

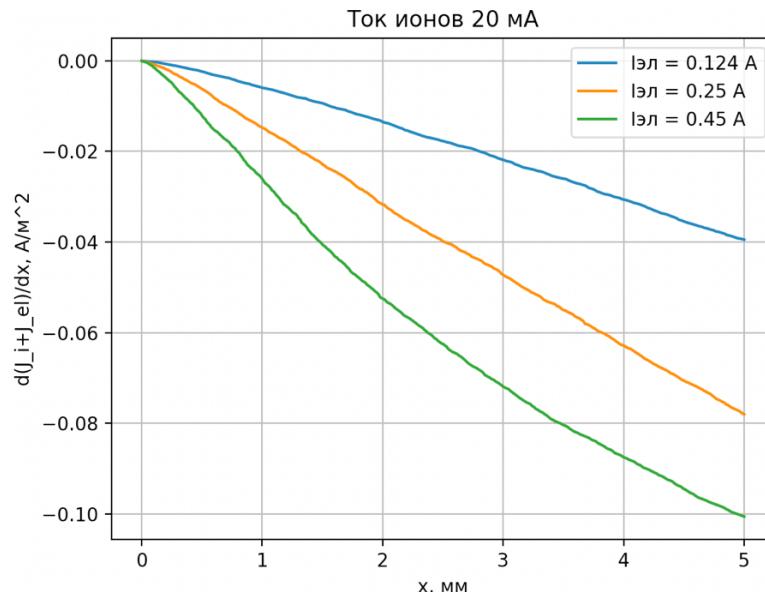


Рис. 3.9. Скорость изменения плотности суммарного ионно-электронного тока с координатой.

Полученные зависимости позволяют численно оценивать процесс нейтрализации. Перспективным является проведение такого эксперимента для больших токов, в которых распределение потенциала отличается от линейного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получено выражение для максимальной силы тяги в зависимости от параметров бортового источника питания. Данная зависимость имеет две характерные области, соответствующие двум разным режимам работы: работе мощных двигателей в качестве маршевых устройств и маломощных двигателей, используемых для корректировки траектории космического аппарата на орбите.

Анализ энергетической цены тяги и КПД ионного двигателя с учетом полученной зависимости силы тяги от параметров источника питания позволяет выбирать оптимальное рабочее тело.

При теоретическом описании нейтрализации получено выражение для сечения процесса аннигиляции между ионом и электроном с учетом кулоновского взаимодействия, а также получены выражения, характеризующие убывание концентрации частиц с координатой вследствие процессов нейтрализации.

В работе показаны возможности использования решателя Tracking solver пакета CST Studio. Получены траектории ионов и электронов, распределение потенциала и плотности заряда частиц для разных конструктивных конфигураций нейтрализатора. Совокупность полученных данных позволяет делать выводы о степени взаимодействия потоков заряженных частиц и искать оптимальные конструктивные решения.

Решатель Tracking solver не позволяет численно учитывать процессы аннигиляции, по которым можно оценивать процессы нейтрализации. Для этих целей был разработан алгоритм, написанный на языке Python. С помощью алгоритма получены распределения концентрации заряженных частиц, коэффициент нейтрализации ионов, распределение потенциала с учетом объемного заряда частиц, зависимости скоростей частиц и длины свободного пробега ионов от координаты, а также изменение смешанного потока частиц с координатой. Полученные данные позволяют численно оценивать процесс нейтрализации ионного фокела.

Перспективным является применение данного алгоритма к распределениям частиц в области нейтрализации, импортируемым из решателя PIC Solver пакета CST Studio, а также расчет нейтрализации при больших значениях тока ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levchenko I., Bazaka K., Ding Y., Raitses Y., Mazouffre S., Henning T., Klar P., Shinohara S., Schein J., Garrigues L., Kim M., Lev D., Taccogna F., Boswell R., Charles Ch., Koizumi H., Shen Y., Scharlemann C., Keidar M. and Xu Sh. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthermost frontiers // Appl. Phys. Rev. 5, 011104 - 2018.
2. Levchenko I., Xu Sh, Mazouffre S., Lev D., Pedrini D., Goebel D., Garrigues L., Taccogna F., Bazaka K. Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion // Phys. Plasmas 27, 020601 – 2020.
3. Горшков О.А., В.А. Муравлёв, А.А. Шагайда. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // М.: Машиностроение -2008. - 280 с.
4. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели // М.: Машиностроение -1975. - 272 с.
5. Ловцов А. С., Селиванов М. Ю., Томилин Д. А., Шагайда А. А., Шашков А. С. Основные результаты разработок центра Келдыша в области ЭРДУ // Известия РАН. Энергетика - 2020, № 2 - с. 3–15.
6. Holste K., Dietz P., Scharmann S., Keil K., Henning T., Zschätsch D., Reitemeyer M., Nauschütt B., Kiefer F., Kunze F., Zorn J., Heiliger C., Joshi N., Probst U., Thüringer R., Volkmar Packan C., Peterschmitt S., Brinkmann K. -T., Zaunick H.-G., Thoma M. H., Kretschmer M., Leiter H. J., Schippers S., Hannemann K., and Klar P. J. Ion thrusters for electric propulsion: Scientific issues developing a niche technology into a game changer // Rev. Sci. Instrum. 91, 061101 -2020.
7. Цыбин О.Ю., Макаров С.Б., Дюбо Д.Б., Кулешов Ю.В., Гончаров П.С., Мартынов В.В., Шуневич Н.А. Электростатический ионный ускоритель с контактной ионизацией для перспективных электрических ракетных двигателей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 2. С. 99–115.

8. Достанко А.П., Голосов Д.А. Нейтрализация ионного пучка торцевого холловского ускорителя плазменным источником электронов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях // Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 10 – С. 59-64.
9. Григорьев В.П., Вагин Е.С., Офицеров В.В. Исследование зарядовой и токовой нейтрализации низкоэнергетического сильноточного электронного пучка во внешнем магнитном поле при инжекции в плазму // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 2 – С. 81-88.
10. Particle Tracing Module // URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.particle/ParticleTracingModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 05.03.2022).
11. Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Ärje J., and Clark H. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // Rev. Sci. Instrum. 81(2), 02B703 (2010).
12. CST MICROWAVE STUDIO // URL: https://perso.telecom-paris-tech.fr/begaud/intra/MWS_Tutorials.pdf (дата обращения: 04.03.2022).
13. 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.
14. Дюбо Д.Б., Пасечник Д.А., Цыбин О.Ю. Ресурсы компьютерного моделирования ИОННО-плазменных космических двигателей // НЕДЕЛЯ НАУКИ ИЭИТ. Материалы Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 60-62 с.
15. Лукша О. И. Решение задач вакуумной электроники СВЧ с помощью пакета CST Studio Suite: учеб.-метод. пособие // О. И. Лукша. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 122 с.
16. Conde L. An Introduction to Plasma Physics and its Space Applications, Volume 1: Fundamentals and elementary processes // Book - 978-1-64327-174-3, 2018. – 131 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные элементы кода алгоритма для численного исследования нейтрализации

```

import numpy as np
from numba import njit, prange
import random

#функция для расчета концентрации ионов
def get_n_i(I = 20 * 10 ** (-3), e = e, u = 1200, S = S, m = m_i):
    return I / (e * S * ((2 * e * u) / m)**(1/2))

#функция для расчета концентрации электронов
def get_n_el(): #на вход подается ток электронов
    return I / (e * S * (3 * k_b * T / m_el) ** (1/2))

#функция для определения точек (частиц) со случайными координатами в трубке тока
@njit(fastmath=True)
def get_random_coords(l, r):
    z = random.uniform(0, l)
    x = random.uniform(-r, r)
    y = random.uniform(-r, r)

    while y > (r**2 - x**2)**(1/2) or -y > (r**2 - x**2)**(1/2):
        y = random.uniform(-r, r)
    return (x, y, z)

#функция для вычисления процессов нейтрализации
@njit(fastmath=True)
def start_experiment(m, n_i, n_el, l, r):

    qtty_ions = [] #количество ионов после нейтрализации
    qtty_electrons = [] #количество электронов после нейтрализации
    qtty_neutrals = [] #количество нейтралов после нейтрализации
    ions = [] #ионы перед нейтрализацией
    electrons = [] #электроны перед нейтрализацией
    neutrals = [] #нейтралы

    section_radius = 1.08359075266265*10**(-10)

    for _ in prange(m):
        for _ in prange(n_i - len(neutrals)):
            ions.append(get_random_coords(l, r))

        for _ in prange(n_el - len(neutrals)):
            electrons.append(get_random_coords(l, r))

        for ion in ions:
            for electron in electrons:
                if ((electron[0] - ion[0]) ** 2 + (electron[1] - ion[1]) ** 2 +
                    (electron[2] - ion[2]) ** 2) ** (
                    1 / 2) <= section_radius:
                    neutrals.append(ion)
                    electrons.remove(electron)
                    ions.remove(ion)
                    break

    qtty_neutrals.append(len(neutrals))
    qtty_electrons.append(len(electrons))
    qtty_ions.append(len(ions))

```

```

    ions.clear()
    electrons.clear()

    return (qtty_neitrals, qtty_electrons, qtty_ions)

# функция для расчета потенциала
def calc_pot(data_electrons, data_ions, dl, x_pot):
    delta_n = []
    for els, ins in zip(data_electrons, data_ions):
        delta_n.append((els - ins))

    #расстановка знаков в формлах соответствует случаям, в которых количество
    #электронов больше, чем ионов
    p0 = 1.6 * 10 ** (-19) * (data_electrons[0] - data_ions[0]) / e0 * dl
    #потенциал некомпенсированного заряда на входе в область
    potencials_x0 = [p0]

    #расчет потенциала некомпенсированного заряда
    for x, del_n in zip(x_pot, delta_n):
        potencials_x0.append(potencials_x0[int(x*10)] + e / e0 * del_n * dl)

    #расчет суммарного потенциала
    super_pot = []
    for x, pot in zip(x_pot, potencials_x0):
        super_pot.append((40000*x/1000-200) - pot) #40*x-200 - линейный потен-
    циал

    return super_pot

#функция для расчета скоростей в км/с
def calc_v_el(super_pot): #на вход подается массив x в мм и массив потенциалов с
    #учетом потенциала заряда
    v = []
    v_0 = (3 * k_b * T / m_el) ** (1 / 2) #начальная скорость электрона
    for pot in reversed(super_pot):
        v.append(((v_0**2 + (2 * e * abs(pot) / (m_el))) ** (1 / 2)) / 1000)
    return v

def calc_v_i(super_pot):
    v = []
    for pot in (super_pot):
        v.append((2 * e * (1000 - pot) / m_i) ** (1 / 2) / 1000)
    return v

#функция для расчета длины пробега в мм
def calc_lambda(data_ions, data_electrons, v_i, v_el, dl):
    lambdas = []
    for n_i, n_el, v_i, v_el in zip(data_ions, data_electrons, v_i, v_el):
        if n_i != 0 and n_el != 0:
            lambdas.append((v_i / (ds * L * n_i * n_el / (ds*ds*dl*dl) * sigma *
            (v_i + v_el))) * 1000)
        else:
            lambdas.append(0)
    return lambdas

#функция для расчета смешанного потока
def calc_flow(data_neitrals, v_i, v_el, dl):
    flow = []
    for N_neit, v_i, v_el in zip(data_neitrals, v_i, v_el):
        flow.append(e * N_neit * (-v_i - v_el)/(1000 * ds * dl))
    return flow

```

```
#старт эксперимента
experiments_data = []
#проводим три эксперимента для разных токов
for nel, ni, m0, dl in zip(num_of_el, num_of_i, m, dl_lambda):
    experiments_data.append(start_experiment(m0, ni, nel, dl, r))
```