

На правах рукописи



Гордеев Святослав Валерьевич

ГАЗОРАЗРЯДНАЯ КАМЕРА ПРЯМОТОЧНОГО
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Специальность 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук
Хартов Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Семёнкин Александр Вениаминович**, доктор технических наук, доцент, АО ГНЦ РФ «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», главный научный сотрудник

Пильников Александр Васильевич кандидат технических наук, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: АО «Научно-производственное предприятие «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»

Защита состоится «29» декабря 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день одним из перспективных направлений развития космической техники является создание низкоорбитальных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

Характерные высоты круговых околоземных орбит для таких аппаратов составляют 300-700 км. Снижение высоты орбитального полета таких спутников до уровня 200-300 км позволило бы повысить эффективность работы целевой аппаратуры. Однако, в данном диапазоне высот становится значительным воздействие на КА силы аэродинамического сопротивления, вызванной наличием газов верхних слоёв атмосферы. Это воздействие может быть скомпенсировано бортовой корректирующей двигательной установкой (КДУ), которая может работать непрерывно, создавая тягу равную силе аэродинамического сопротивления, или включаться периодически, создавая усилие, превосходящее сопротивление верхних слоев атмосферы. При этом, для обеспечения длительного срока активного существования (САС) низкоорбитального КА потребуется значительный запас рабочего тела (РТ) на борту при использовании традиционных для таких КДУ жидкостных ракетных двигателей. Применение для этих целей электроракетных двигателей (ЭРД) позволит увеличить массу полезной нагрузки за счет сокращения запасов РТ. Так известно, что использование ионного двигателя Т5 фирмы «QinetiQ» позволило обеспечить существование европейского исследовательского КА GOCE (Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer) на орбитах 240-280 км в течение 4-х лет при запасе РТ – ксенона порядка 40 кг.

Для дальнейшего повышения срока активного существования КА на низкой орбите возможно использовать в качестве РТ для ЭРД газы остаточной атмосферы, то есть перейти к концепции прямоточного электроракетного двигателя. Также возможен вариант добавления атмосферных газов, к рабочему телу, запасенному на борту КА, для повышения длительности его САС.

В случае успешного решения задачи создания такого двигателя появляется возможность освоения низких околоземных орбит, а также перспективы повышения эффективности работы аппаратов ДЗЗ.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время в мире активно ведутся исследовательские работы, посвященные созданию прямоточного электроракетного двигателя. Первые

концепции такого двигателя были предложены еще в 60-е годы двадцатого века. В 2000-х начались работы по исследованию возможности использования различных видов ЭРД в прямоточном режиме. В Японии исследовалась концепция прямоточного сверхвысокочастотного ионного двигателя, в Европе – прямоточного стационарного плазменного двигателя, в России – прямоточного высокочастотного ионного двигателя. Тем не менее, на сегодняшний день в мире не создано лабораторного образца прямоточного ЭРД, обладающего тягой, превышающей расчетное значение силы аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы на целевой орбите, что свидетельствует о необходимости более глубоких исследований концепции прямоточного ЭРД.

Объектом исследования является лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры, т.е. с возможностью истечения рабочего тела, как через ускорительную систему, так и через входной канал, моделирующий устройство забора атмосферных газов.

Предметом исследования являются процессы, происходящие в газоразрядной камере данного двигателя.

Целью работы является разработка научно технических основ проектирования газоразрядной камеры прямоточного высокочастотного ионного двигателя, работающей в условиях пониженных концентраций рабочего тела.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

1. Разработана инженерная физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда, поддерживаемого в различных газах как одноатомных так и диссоциирующих.
2. Спроектирована и изготовлена лабораторная модель ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры, с возможностью регулирования прозрачности входного канала устройства забора атмосферных газов.
3. Проведены экспериментальные исследования режимов работы лабораторной модели.

4. Верифицирована физико-математическая модель с использованием опубликованных ранее и полученных в настоящей работе экспериментальных данных.

5. Выработаны рекомендации по проектированию газоразрядной камеры прямого ВЧИД.

Научная новизна результатов исследований состоит в том, что:

1. Разработана оригинальная двумерная осесимметричная физико-математическая модель процессов в газоразрядной камере прямого ВЧИД, потребляющая умеренное количество вычислительных ресурсов, и позволяющая, в то же время, анализировать изменения локальных параметров плазмы высокочастотного разряда.

2. Впервые показана принципиальная возможность удержания высокопотенциальной плазмы в объеме газоразрядной камеры прямого конфигурации.

3. Впервые получены экспериментальные зависимости потребляемой высокочастотной мощности от расхода рабочего тела для высокочастотного ионного двигателя с прямой конфигурацией газоразрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

1. Создан лабораторный макет ВЧИД с прямой конфигурацией газоразрядной камеры.

2. Доказана принципиальная возможность работы ВЧИД с прямой конфигурацией газоразрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.

3. Разработана двумерная осесимметричная физико-математическая модель высокочастотного индукционного газового разряда в газоразрядной камере прямого ВЧИД.

Методология и методы исследования

В работе применялись эмпирические и теоретические методики исследования. В ходе экспериментов применялись современные методы регистрации параметров рабочих режимов ВЧИД с прямой конфигурацией газоразрядной камеры. Физико-математическая расчетная модель построена на известных принципах физики плазмы газового разряда.

Вклад автора в проведенное исследование

При непосредственном участии автора:

- разработана инженерная физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда, поддерживаемого в различных газах, и проведена её верификация с использованием экспериментальных данных;
- разработана и изготовлена лабораторная модель ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры, с возможностью регулировки прозрачности входного канала устройства забора атмосферных газов, для исследования различных режимов работы модели;
- проведены экспериментальные исследования лабораторной модели с использованием азота в качестве рабочего тела;
- выработаны рекомендации по проектированию газоразрядной камеры прямоточного ВЧИД.

Положения, выносимые на защиту:

- двумерная осесимметричная математическая модель высокочастотного индукционного газового разряда в газоразрядной камере прямоточного ВЧИД;
- результаты экспериментального исследования работы ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры;
- рекомендации по проектированию газоразрядной камеры прямоточного ВЧИД.

Степень достоверности полученных результатов экспериментальных исследований обусловлена использованием современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все исследования проводились на сертифицированном оборудовании. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей. Результаты расчета верифицировались с использованием экспериментальных данных, полученных как в данной работе, так и в работах других исследователей

Апробация результатов работы

Результаты исследований, описанных в данной работе, представлены в девяти статьях в рецензируемых научных изданиях. Результаты работы были доложены в рамках 18-ти российских и международных конференций: XLII, XLIII, XLIV, XLV, XLVI Академических чтений по космонавтике (Москва, 23 – 26 января 2018, 29 января-01 февраля 2019, 28-31 января 2020, 29 марта – 01

апреля 2021, 26-29 января 2022), Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017, 2019, 2020, 2021, 2022» (Москва, 5 – 20 апреля 2017, 16-19 апреля 2019, 27 декабря 2019 – 17 апреля 2020, 20-23 апреля 2021), 16-ой, 17-ой, 18-ой, 19-ой, 20-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва, 20 – 24 ноября 2017, 19-23 ноября 2018, 18-22 ноября 2019, 23-27 ноября 2020, 22-26 ноября 2021), IV-й научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева, посвященной 60-ти летию запуска первого спутника Земли (Железногорск, 2017), научно-технической конференции «Иосифьяновские чтения-2017» (Истра, 2017), международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 11–13 ноября 2019 года).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ в рецензируемых научных изданиях, из них 2 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень высшей аттестационной комиссии, рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Объем и структура работы

Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, включает в себя 104 рисунка, 3 таблицы, а также 127 библиографических ссылок. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определен объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе обсуждается применение ЭРД для поддержания космических аппаратов на низкой орбите. Приведены сведения о возможности использования остаточной атмосферной среды в качестве РТ двигателя. Рассмотрены различные виды ЭРД с точки зрения их использования по прямоточной схеме. Также приведен обзор различных схем прямоточных ЭРД. Рассмотрена концепция прямоточного ЭРД, и его составные части.

Прямоточный электрореактивный двигатель должен включать: устройство забора газов, область термализации потока (выравнивания распределения частиц по направлению скоростей) - термализатор и тяговый узел (Рисунок 1).

Устройство забора газов предназначено для приема набегающего потока частиц атмосферы и должно в условиях свободномолекулярного течения, снижать обратные потоки частиц из полости накопителя.

Накопитель – это камера, в которой происходит накопление частиц и их торможение до тепловых скоростей.

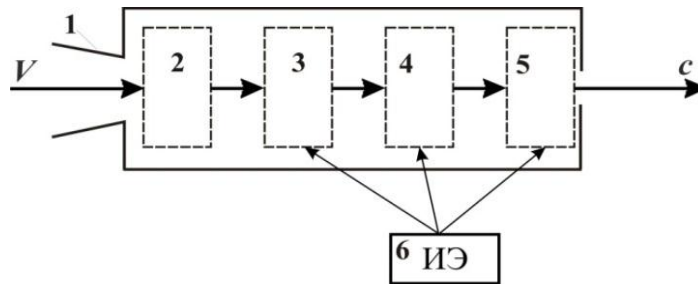


Рисунок 1 – Принципиальная схема прямоточного электрореактивного двигателя (1 – устройство забора газов, 2 – термализатор, 3 – область ионизации рабочего тела, 4 – область ускорения рабочего тела, 5 – область нейтрализации, 6 – источник энергии (ИЭ), с – реактивная струя)

Также в первой главе обосновано использование схемы высокочастотного ионного двигателя в качестве тягового узла прямоточного ЭРД.

Вторая глава посвящена физико-математической модели высокочастотного индукционного разряда, в том числе, в диссоциирующих газах.

При моделировании разряда выполняются следующие расчеты:

- расчет распределения амплитудного значения плотности вихревых электронных токов;
- расчет параметров электромагнитного поля;
- расчет распределения концентраций нейтральных атомов и молекул;
- расчет распределения концентраций атомарных и молекулярных ионов.

Учитывается наличие в плазме ионов, нейтральных атомов и электронов (в случае диссоциирующего рабочего тела учитываются нейтральные атомы и молекулы, а также атомарные и молекулярные ионы)

При этом модель учитывает характер взаимодействия между различными группами частиц, а также частиц с электромагнитным полем. Приведенные расчеты выполняются по очереди итерационно, с использованием в текущем расчете результатов предыдущего до достижения сходимости и получения результата.

При расчете кольцевых токов в плазме вводятся следующие допущения:

- ток в индукторе изменяется по синусоидальному закону (будем искать распределение амплитудных значений плотности кольцевого тока в плазме);
- индуктор заменяется набором замкнутых колец с током (не учитывается его спиральная форма);
- при анализе движения электронов не учитывается влияние магнитного поля (переменное магнитное поле рассматривается только как источник вихревого электрического поля, которое влияет на движение электронов);

Амплитудное значение скорости электронов находится из задачи движения электрона в синусоидальном вихревом электрическом поле с учетом соударений. При этом, используется зависимость амплитудного значения электрического поля от амплитудного значения векторного магнитного потенциала, получаемая из уравнения Максвелла для синусоидального закона изменения полей:

$$v_{emax} = \frac{q_e E_0}{m_e \sqrt{\omega^2 + \nu^2}} = \frac{q_e \omega A}{m_e \sqrt{\omega^2 + \nu^2}}, \quad (1)$$

где: m_e – масса электрона, ν_e – скорость электрона, ν – частота соударений электрона с тяжелыми частицами q_e – заряд электрона, ω – циклическая частота тока в индукторе.

Плотность токов в плазме определяется соотношением:

$$j = -n_e q_e v_{emax}. \quad (2)$$

Для расчета процессов в камере ионизации двигателя исследуемая область разбивается на n элементов по горизонтали и по вертикали (рассматривается осесимметричная постановка задачи). Рассчитываются

методом траекторий, а также учитываются дополнительные источники частиц, обусловленные нейтрализацией ионов на стенках.

При моделировании течения нейтральных частиц принимаются следующие допущения:

- нейтральные частицы рассматриваются в приближении твердых сфер;
- скорость движения нейтральных частиц принимается равной средней тепловой скорости;
- принимается диффузная модель отражения частиц от стенок камеры
- ионно-оптическая система рассматривается как стека с частичной прозрачностью для нейтральных частиц;
- рассматривается свободномолекулярное течение, то есть считается, что длина свободного пробега частиц значительно превосходит характерные геометрические размеры задачи.
- не учитывается объемная рекомбинация.

Граница расчетной области заменяется набором линейных (в сечении, содержащем ось симметрии) сегментов. Рассматривается поток частиц из кольца k на кольцо на кольцо l , который без учета ионизации и диссоциации равен:

$$N_{kl} = 2n_k v_T l_k r_k l_l r_l \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{R^2} d\varphi, \quad (9)$$

где: n_k – концентрация нейтральных частиц вблизи k -го сегмента границы, v_T средняя тепловая скорость, l_k, l_l – длина образующей k -го и l -го сегментов соответственно, r_k, r_l радиус средней точки образующей k -го и l -го сегментов соответственно, $\theta_k (\theta_l)$ – угол между нормалью к элементарной площадке, выделенной на k -м (l -м) сегменте и линией, соединяющей данные площадки (длина этой линии равна R)

Влияние ионизации и диссоциации учитывается приближенно следующим образом.

Строятся линейные траектории потоков нейтральных частиц из одной точки кольца k в различные точки кольца l (рисунок 2).

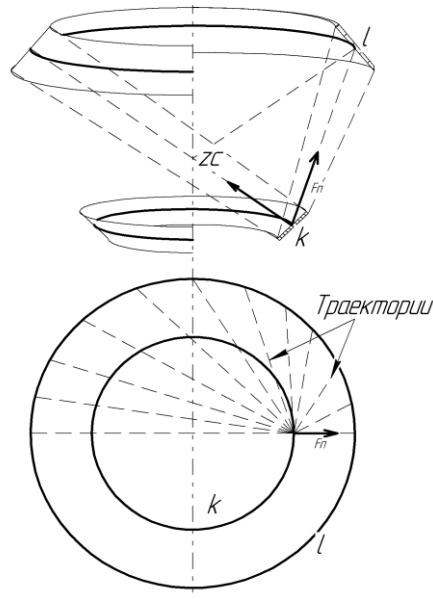


Рисунок 2 – Схема расчета потока частиц между элементарными площадками.

Затем, для каждой траектории ищется процент частиц, выбывающих из потока в результате ионизации и диссоциации, и рассчитывается коэффициент прохождения потока

После расчета данного коэффициента для каждой траектории, производится его усреднение с учетом доли полного потока частиц, приходящейся на каждую траекторию, в результате которого получается доля частиц, стартовавших с кольца k , которые достигают кольца l – $\overline{k_{\text{п}kl}}$.

С учетом данного коэффициента поток частиц с кольца k на кольцо l можно записать в виде:

$$N_{kl} = n_k \overline{k_{\text{п}kl}} \left(2v_T l_k r_k l_l r_l \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{R^2} d\varphi \right). \quad (10)$$

Обозначим:

$$2\overline{k_{\text{п}kl}} v_T l_k r_k l_l r_l \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{R^2} d\varphi = B_{kl}. \quad (11)$$

Тогда:

$$N_{kl} = n_k B_{kl}. \quad (12)$$

В случае, если через кольцо k подается массовый \dot{m}_k , поток частиц на кольцо l описывается соотношением:

$$N_{kl} = \frac{\dot{m}_k \overline{k_{\text{п}kl}}}{M \cdot \pi} l_l r_l \int_0^{\pi} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{R^2} d\varphi. \quad (13)$$

Введем обозначение:

$$F_{kl} = \frac{\dot{m}_k \overline{k_{\text{п}kl}}}{M \cdot \pi} l_l r_l \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{R^2} d\varphi. \quad (14)$$

Для потока частиц, достигающего кольца l можно записать:

$$N_l = \sum_{f=0}^{K_w-1} n_{f,w} B_{fl} + \sum_{g=0}^{K_{in}-1} F_{gl}, \quad (15)$$

где: K_w – количество элементов с граничным условием типа «стенка» и «ионно-оптическая система» K_{in} – количество элементов с граничным условием типа «вход», $n_{k,w}$ – концентрация частиц на k -ом элементе с граничным условием типа «стенка»,

В то же время:

$$N_l = n_l v_T \sigma_l, \quad (16)$$

где: σ_l – площадь поверхности сегмента l .

Подставив (16) в (15) получим систему уравнений относительно n_k :

$$\begin{aligned} n_1(v_T \sigma_1 - B_{11}) - \sum_{k=0}^{K_w-1, k \neq 1} n_k B_{k1}(1 - T_{n,k}) &= \sum_{g=0}^{K_{in}-1} F_{g1}(1 - T_{n,1}), \\ n_2(v_T \sigma_2 - B_{22}) - \sum_{k=0}^{K_w-1, k \neq 2} n_k B_{k2}(1 - T_{n,k}) &= \sum_{g=0}^{K_{in}-1} F_{g2}(1 - T_{n,2}), \\ &\dots\dots\dots \\ n_{(K_w-1)}(v_T \sigma_{(K_w-1)} - B_{(K_w-1)(K_w-1)}) - \sum_{k=0}^{K_w-2} n_k B_{k(K_w-1)}(1 - T_{n,k}) &= \\ \sum_{g=0}^{K_{in}-1} F_{g(K_w-1)}(1 - T_{n,(K_w-1)}), \end{aligned} \quad (17)$$

где: $T_{n,f}$ – прозрачность f -го сегмента для нейтральных частиц (прозрачность стенки равна нулю)

Из решения системы уравнений (17) находятся концентрации вблизи каждого кольца, и затем пересчитываются концентрации в объеме камеры (в узлах сетки).

Для расчета концентрации атомов рабочего тела, которые могут образовываться в объеме камеры при диссоциации молекул необходимо доработать описанную выше методику расчета.

Рассмотрим кольцевой объем $dV_{r,z}$, построенный в окрестности точки с координатами (r,z) . Количество диссоциаций в этом объеме в единицу времени будет:

$$dN_{r,z} = n_e n_M \sigma_{diss} dV_{r,z}, \quad (18)$$

где: n_e – средняя концентрация электронов в объеме $dV_{r,z}$, n_M – средняя концентрация нейтральных молекул в объеме $dV_{r,z}$, σ_{diss} – коэффициент интенсивности диссоциации молекул.

Поток атомов из этого объема на элементарный сегмент границы (рисунок 3) равен:

$$N_{rz-l} = \frac{dN_{r,z}}{\pi} l_l r_l \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta_l}{R^2} d\varphi. \quad (19)$$

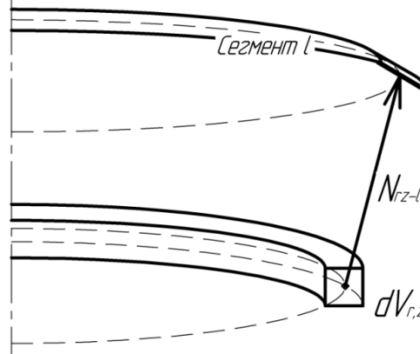


Рисунок 3 – Схема расчета потоков частиц из объема камеры на стенки.

Полный поток атомов, приходящий на кольцо l складывается из потоков с остальной поверхности камеры и потока атомов, образовавшихся в объеме камеры в результате диссоциации, рассчитываемого в узлах прямоугольной равномерной сетки:

$$N_l = \sum_{k=0}^{K_w-1} N_{kl} + \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} N_{r_{i,j} z_{i,j}-l}, \quad (20)$$

где: K_w – количество элементов границы камеры, $N_{r_{i,j} z_{i,j}-l}$ – поток атомов из кольцевого объема, построенного около узла сетки с координатами $(r_{i,j} z_{i,j})$ на кольцевой сегмент границы l , U – коэффициент, определяющий нахождение узла сетки с координатами $(r_{i,j} z_{i,j})$ внутри расчетной области: для внутренних точек $U = 1$, для точек, находящихся вне области $U = 0$.

В уравнении (20) последнее слагаемое не зависит от концентрации атомов рабочего тела (а зависит от концентрации молекул). Записав уравнения баланса потоков для каждого сегмента можно получить систему уравнений относительно концентраций нейтральных атомов n_a вблизи кольцевых сегментов границы области:

$$\begin{aligned} n_{a_0} v_T \sigma_0 (1 - T_{n,0}) - \sum_{k=0}^{K_w-1} n_{a_k} B_{k0} (1 - T_{n,k}) &= \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} N_{r_{i,j} z_{i,j}-0}, \\ n_{a_1} v_T \sigma_1 (1 - T_{n,1}) - \sum_{k=0}^{K_w-1} n_{a_k} B_{k1} (1 - T_{n,k}) &= \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} N_{r_{i,j} z_{i,j}-1}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$n_{a_l} v_T \sigma_l (1 - T_{n,l}) - \sum_{k=0}^{K_w-1} n_{a_k} B_{kl} (1 - T_{n,k}) = \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} N_{r_{i,j} z_{i,j}-l}.$$

Решив данную систему уравнений, и определив значения концентраций атомов около каждого сегмента, можно найти концентрацию в узлах сетки по методике, аналогичной описанной выше для не диссоциирующего рабочего тела:

$$n_{i,j} = \frac{N_{\Sigma}}{v_T \sigma_{i,j}}, \quad (22)$$

где: N_{Σ} – суммарный поток частиц от всех кольцевых источников в рассматриваемой точке (и со стенок и из объема камеры).

Для расчета концентрации ионов в камере используется метод траекторий. Приняты следующие основные допущения

- Рассматривается двумерная осесимметричная квазистационарная задача.
- Учитывается воздействие на ионы только стационарной составляющей электрического поля.
- Считается, что влияние переменного магнитного поля на ионы пренебрежимо мало.
- Считается, что, долетев до стенок, ионы нейтрализуются.
- Не учитываются многозарядные ионы

Расчет производится следующим образом: сначала задается некоторое распределение потенциала в рассматриваемом объеме $\varphi_0(r, z)$, такое, что потенциал спадает от некоторой точки внутри области по направлению к её границам. В узлах равномерной прямоугольной сетки устанавливаются по одному иону и моделируется их движение в сторону стенок камеры в электростатическом поле (рисунок 4).

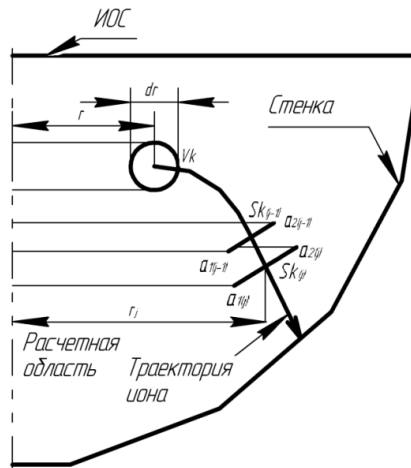


Рисунок 4 – Схема расчета траекторий ионов в камере ВЧИД.

Затем, исходя из уравнения баланса количества частиц для каждой траектории рассчитывается концентрация ионов. Далее концентрация пересчитывается в узлах сетки. Для получения траекторий и скоростей ионов уравнения их движения интегрируются методом Эйлера.

Введя для каждой траектории уравнение баланса количества частиц, рождающихся в объеме V_k и пролетающих через поверхности $S_{k(j)}$ получим выражение для расчета концентрации в j -й точке траектории:

$$n_{i(j)} = \frac{n_{i(0)} n_0 \sigma v_i V_k}{v_{i(j)} S_{k(j)}}. \quad (23)$$

Концентрация, рассчитываемая в соответствии с соотношением (23) суммируется с концентрацией в узлах, расположенных в окрестности j -й точки траектории, рассчитанной с помощью того же соотношения при $j = 0$. Для этого при каждом значении j рассчитываются координаты точек a_{1j} и a_{2j} (рисунок 3). Затем, проверяется, попадают ли узлы сетки в трапецию, образованную точками $a_{1j}, a_{2j}, a_{1(j-1)}, a_{2(j-1)}$. Если точка сетки оказывается внутри трапеции, то концентрация из j -й точки траектории суммируется с концентрацией в узловой точке сетки:

$$(n_i)_{\Sigma}^{(f,k)} = \sum_l \sum_m (n_i)_j^{(l,m)}, \quad (24)$$

где: (l, m) – номер траектории (номера траекторий совпадают с координатами узлов сетки, из которых они стартуют), j – номер шага траектории, на котором узел сетки с координатами (f, k) оказался рядом с траекторией, $(n_i)_j^{(l,m)}$ – концентрация ионов рассчитанная на j -м шаге траектории (l, m) .

После расчета концентрации в узлах сетки, исходя из условия квазинейтральности плазмы, из уравнения Больцмана пересчитывается распределение потенциала:

$$\varphi = - \ln\left(\frac{n_i}{n_{i0}}\right) \cdot \frac{kT_e}{q_e}, \quad (25)$$

где: n_{i0} – максимальная концентрация ионов в рассматриваемой области.

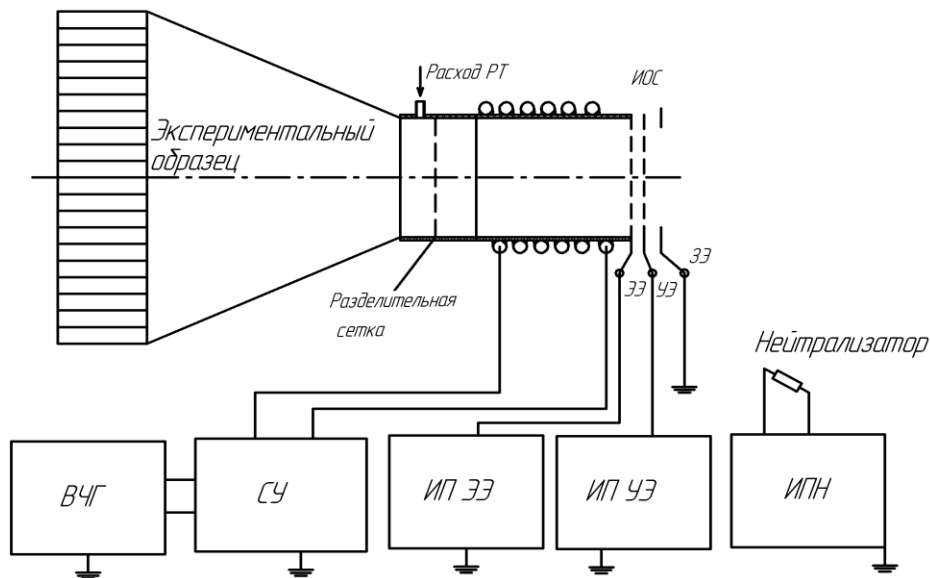
Далее полученное распределение потенциала используется для повторного расчета концентрации ионов описанным выше способом.

Расчет параметров плазмы производится следующим образом: сначала задаются начальные приближения для потенциала, концентраций нейтральных и заряженных частиц и температуры электронов. По этим распределениям рассчитываются вихревые токи в плазме. Затем с помощью полученных

значений вихревых токов пересчитываются новые распределения скоростей и температур электронов в расчетной области, с помощью которых опять рассчитываются распределения концентрации нейтральных и заряженных частиц. Расчет производится итерационно до достижения сходимости.

В третьей главе приводится описание экспериментального исследования ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры.

Исследования проводились на вакуумном стенде с объемом вакуумной камеры $5,6 \text{ м}^3$, оснащенном безмасляной системой откачки, обеспечивающей динамический вакуум не хуже 10^{-4} торр. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5.



ВЧГ – высокочастотный генератор, СУ – согласующее устройство, ИП ЭЭ – источник питания эмиссионного электрода, ИП УЭ – источник питания ускоряющего электрода, ИПН – источник питания нейтрализатора

Рисунок 5 – Схема эксперимента по исследованию ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры.

Лабораторный образец представляет собой высокочастотный ионный двигатель с пристыкованным к нему узлом, моделирующим влияние устройства забора атмосферных газов на работу двигателя (далее будем условно называть этот узел «УЗАГ»). Внешняя торцевая граница данного узла была выполнена с возможностью изменения прозрачности, путем поворота специальных створок (рисунок 6). Газоразрядная камера выполнена из кварцевого стекла. Диаметр пучка ионов составляет 50 мм. Лабораторный образец исследовался при подаче рабочего тела в объем термолизатора с возможностью его истечения, как через

ускорительную систему, так и через входную границу УЗАГ. Такой подход позволил приблизительно оценить параметры прямоточного ВЧИД в различных режимах работы.



а



б

Рисунок 6 – Лабораторный образец ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры (а – без кожуха, б – с кожухом).

Была решена проблема удержания плазмы в газоразрядной камере с помощью двух разделительных сеток и достигнута стабильная работа двигателя при потенциале эмиссионного электрода +600 В. При этом наблюдалось формирование пучка ускоренных ионов (рисунок 7)



Рисунок 7 – Пучок ионов при потенциале эмиссионного электрода +600 В.

Были экспериментально получены зависимости тока пучка ионов от ВЧ-мощности при различных расходах рабочего тела (рисунки 8-10) при различных положениях створок входной границы (вследствие несовершенства конструкции створок прозрачность входной границы при полностью закрытых створках принималась $\approx 0,05$).

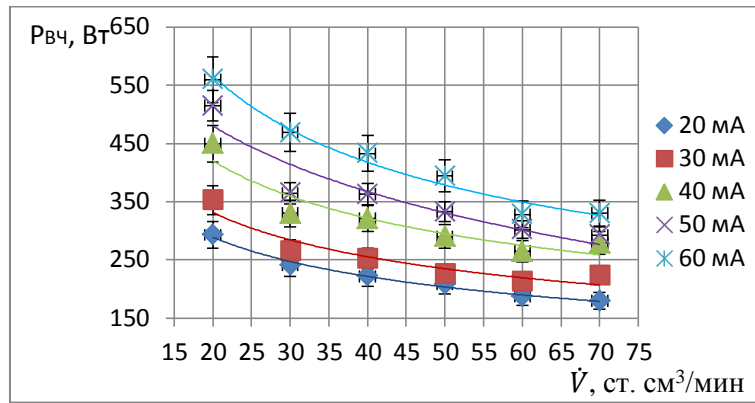


Рисунок 8 – Зависимость потребляемой ВЧ-мощности от объемного расхода азота при различных токах ионного пучка (створки закрыты), прозрачность входной границы $\approx 0,05$.

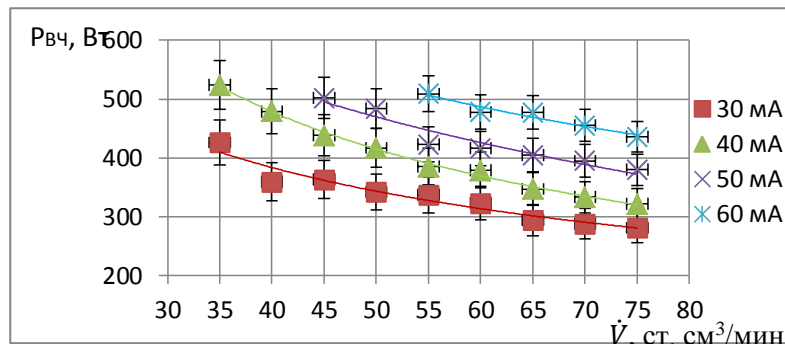


Рисунок 9 – Зависимость потребляемой ВЧ-мощности от объемного расхода азота при различных токах ионного пучка (угол между створками и плоскостью входной границы 15°), прозрачность входной границы $\approx 0,2$.

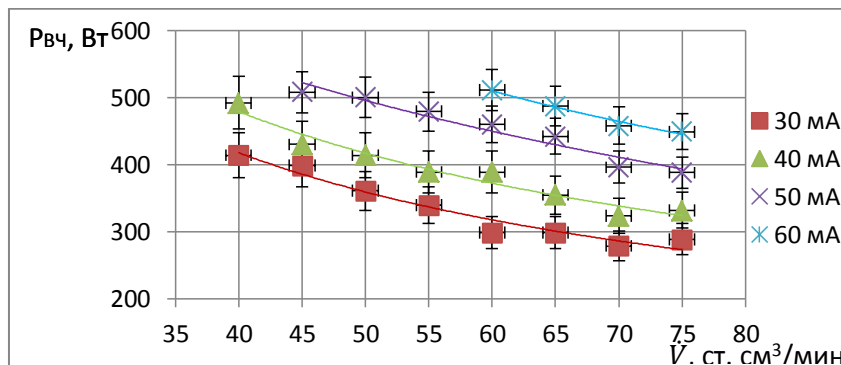


Рисунок 10 – Зависимость потребляемой ВЧ-мощности от объемного расхода азота при различных токах ионного пучка (угол между створками и плоскостью входной границы 30°), прозрачность входной границы $\approx 0,38$.

Как видно из рисунков 8-10, до угла створок 15° при увеличении прозрачности входной границы УЗАГ, наблюдается рост потребляемой ВЧ мощности для обеспечения заданного тока пучка ионов. Кроме того, повышается нижняя граница по расходу рабочего тела, при котором двигатель

еще сохраняет работоспособность. Однако при дальнейшем увеличении угла раскрытия створок параметры двигателя практически перестают изменяться.

Четвертая глава содержит сведения о верификации разработанной физико-математической модели с использованием опубликованных экспериментальных данных, полученных другими авторами, а также с использованием данных, полученных автором настоящей работы. Кроме того, приведен анализ характеристик ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры.

С помощью разработанной математической модели была смоделирована работа ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры. В качестве рабочего тела рассматривался азот.

Была задана расчетная геометрия, приближенная к внутренней геометрии экспериментального образца, представленная на рисунке 11.

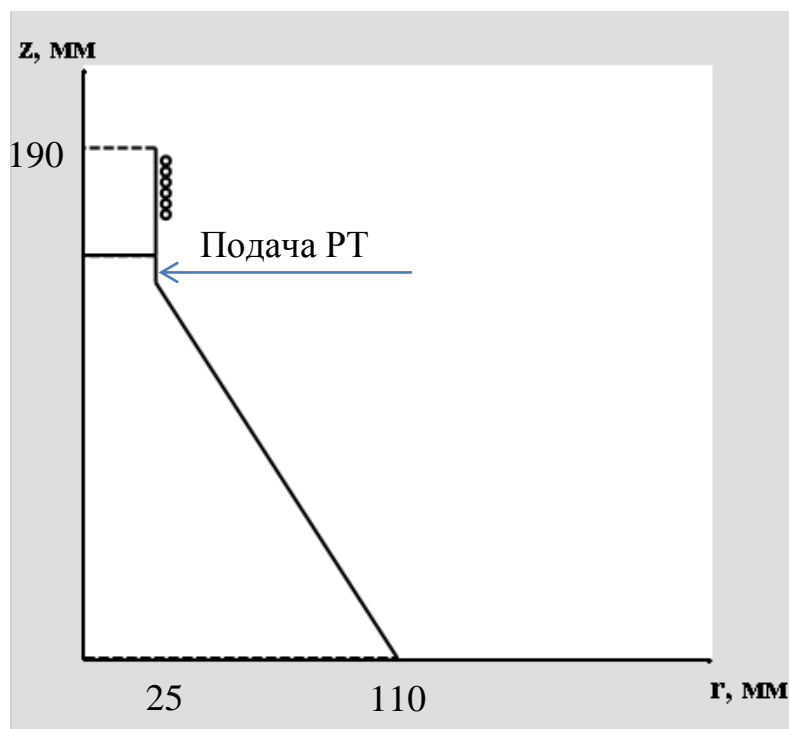


Рисунок 11 – Исходная геометрия для расчета ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры.

Результаты расчета сравнивались с данными, приведенными на рисунках 8-10. Результаты сравнения для токов пучка ионов 40 мА и 50 мА при закрытых створках угле раскрытия створок 15° (при прозрачности створок $\approx 0,2$) приведены на рисунках 12-13.

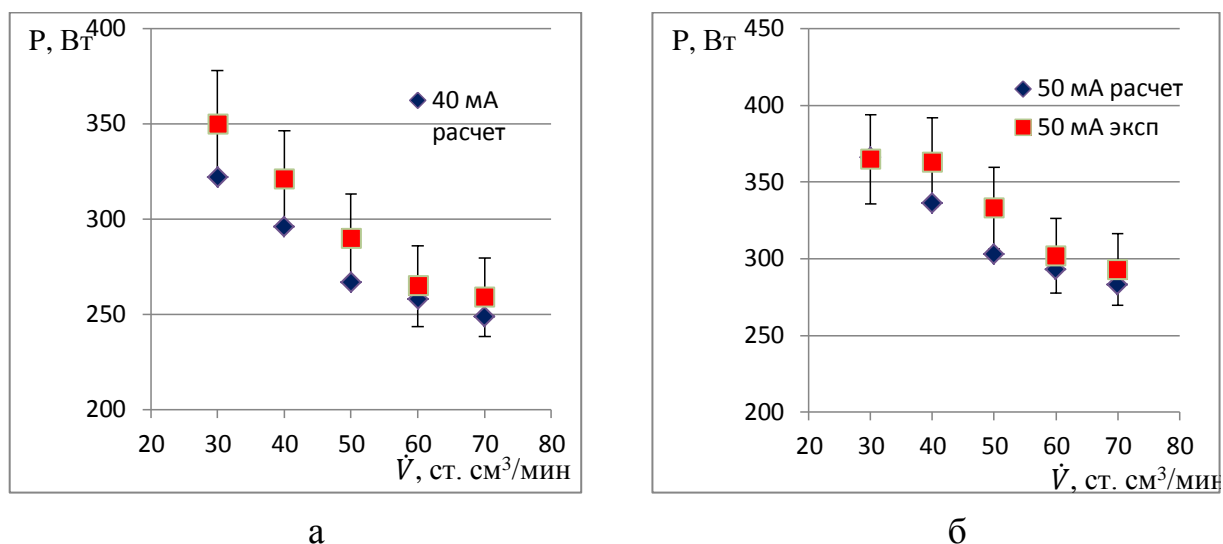


Рисунок 12 - Зависимость потребляемой ВЧ-мощности от объемного расхода азота (створки закрыты, а - ток пучка ионов 40 мА, б – 50 мА).

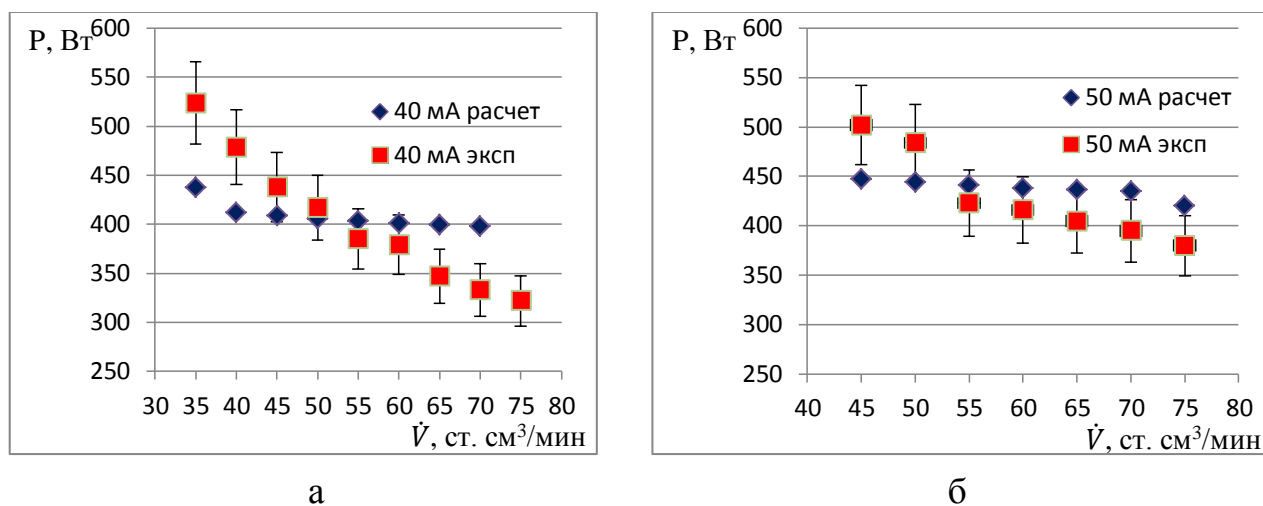


Рисунок 13 - Зависимость потребляемой ВЧ-мощности от объемного расхода азота (угол раскрытия створок - 15° , а - ток пучка ионов 40 мА, б – 50 мА).

Как видно из графиков, расхождения расчетных и экспериментальных данных для азота в большей части исследуемого диапазона по расходу рабочего тела не превышают 10%. Это является приемлемой точностью, с учетом точности, с которой определены сечения взаимодействий электронов с тяжелыми частицами рабочего тела, а также приближенного учета потерь в электрических цепях подвода ВЧ мощности

Заключение содержит основные результаты и выводы по работе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках «Госзадания», грант FFSF-2020-0014.

При достижении поставленных в настоящей работе задач были получены следующие результаты:

1. Разработана физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда низкого давления, поддерживаемого в различных (в том числе диссоциирующих) газах, проведена ее верификация с использованием опубликованных ранее и полученных в настоящей работе экспериментальных данных, и рассчитаны параметры высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры при работе на азоте. Расхождения результатов расчета и экспериментальных данных не превышают 10%.
2. Создана лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя, позволяющая проводить исследование имитации работы его газоразрядной камеры в прямоточном режиме.
3. Предложена схема разделительного узла, расположенного на входе в высокочастотную газоразрядную камеру прямоточной конфигурации, доказывающего принципиальную возможность удержания плазмы от проникновения в заборное устройство атмосферных газов при ускоряющем напряжении в двигателе до +600 В.
4. Экспериментальное исследование лабораторного образца прямоточного двигателя с диаметром ионного пучка 50 мм продемонстрировало возможность создания им силы тяги до 1 мН при работе высокочастотной разрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Гордеев С.В., Канев С.В., Мельников А.В., Назаренко И.П., Хартов С.А. Исследование высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией разрядной камеры. Инженерный журнал: наука и инновации, 2022, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2179>
2. Гордеев С.В., Мельников А.В., Хартов С.А. Экспериментальное исследование высокочастотного ионного двигателя с имитацией работы разрядной камеры в прямоточном режиме // Тепловые процессы в технике. Октябрь 2022. Т. 14. № 10.

Научные статьи в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus:

3. Gordeev S.V., Filatyev A.S., Khartov S.A., Popov G.A., Suvorov M.O. The concept of a ramjet electric propulsion for a low-orbit spacecraft // IAA/AAS SCITECH FORUM 2019 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, ADVANCES IN THE ASTRONAUTICAL SCIENCES, IAA-AAS-SciTech2019-027 AAS 19-967. 2019. Vol. 174. pp. 245-256.
4. Gordeev S.V., Kanev S.V., Khartov S.A., Popov G.A., Suvorov M.O. Electric propulsion system based on the air-breathing radio-frequency ion thruster using the upper atmosphere gases as propellant // Proc. of 69TH INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS: INVOLVING EVERYONE IAC 2018, Paper ID: 42673. Bremen. 2018.
5. Gordeev S.V., Kanev S.V., Khartov S.A. Numerical mathematical model for computation of neutral particle density in the chamber of a radio-frequency ion thruster // IAA/AAS SCITECH FORUM 2019 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, ADVANCES IN THE ASTRONAUTICAL SCIENCES, IAA-AAS-SciTech2019-028 AAS 19-968. 2019. Vol. 174. pp. 257-267.
6. Gordeev S.V., Kanev S.V., Khartov S.A. Numerical mathematical model for calculation ion density in the gas-discharge chamber of a radio-frequency ion thruster // JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, doi: 10.1088/1742-6596/1479/1/012057. 2020.
7. Akhmetzhanov R.V., Gordeev S.V., Kanev S.V., Melnikov A.V., Khartov S.A. Estimation of parameters of radio-frequency ion injector with an additional magnetostatic field // Acta Astronautica, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.044>. 2021.
8. Gordeev S.V., Kanev S.V., Melnikov A.V., Nazarenko I.P., Khartov S.A. Modeling of Processes in Plasma of Radio-Frequency Ion Injector with an Antenna Placed inside the Volume of Discharge Chamber // Aerospace 2021, 8, 209. <https://doi.org/10.3390/aerospace8080209>.

Научные статьи в других журналах:

9. Гордеев С. В., Канев С. В., Суворов М.О., Хартов С.А. Оценка параметров прямогоочного высокочастотного ионного двигателя // Труды МАИ, № 96, 2017.