

ТОРОПОВ Григорий Петрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТРУИ СТАЦИОНАРНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ОБЪЕМЕ ВАКУУМНОЙ
КАМЕРЫ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель: д.т.н., доцент **Хартов Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор **Рыжов Юрий Алексеевич,**
к.т.н., с.н.с. **Бишаев Андрей Михайлович**

Ведущая организация: **Федеральное государственное
унитарное предприятие ОКБ "Факел"**

Защита диссертации состоится « 19 » сентября 2011 года в 13 : 00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) «МАИ» по адресу: 125993, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш. д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью просим высылать по адресу: 125993, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш. д. 4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан « 24 » июня 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.08, д.т.н., профессор



Ю.В. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность темы:

В космической технике все более широкое применение в качестве тяговых модулей находят электроракетные двигатели (ЭРД) и в частности одна из их разновидностей – стационарный плазменный двигатель (СПД). Наиважнейшим вопросом разработки и совершенствования СПД, как и любого ЭРД, является проблема наземных испытаний. Одним из основных недостатков этого этапа отработки двигателей является невозможность в полном объеме имитировать условия окружающей среды, характерной для работы ЭРД на борту космического аппарата. Так, например, концентрация частиц остаточной атмосферы в вакуумных камерах на несколько порядков превосходит реальную концентрацию частиц в космическом пространстве. Отличны также от наблюдаемых при эксплуатации двигателей: пространственное распределение частиц и состав остаточной атмосферы испытательных стендов. Причиной этого является процесс взаимодействия ускоренных ионов со стенками вакуумных камер, в результате которого образуются обратные потоки атомов рабочего тела, нейтрализовавшегося на стенках, и распыленного с них материала. Эти потоки зависят от геометрии и размеров камеры. Верхний предел распыленных потоков во многом формирует требования для минимальных габаритов вакуумных камер при заданном уровне мощности испытуемого двигателя. Осаждение атомов распыленного материала стенок вакуумных камер может негативно влиять на функционирование изоляторных и электродных узлов ЭРД. В частности, для СПД это оказывает существенное влияние на электропроводящие и эмиссионные свойства поверхности керамической разрядной камеры.

При распространении в объеме вакуумной камеры струя ускоренных ионов из СПД взаимодействует с хаотично двигающимися нейтральными частицами остаточной атмосферы, образуя перезарядившиеся ионы. Экспериментально подтверждено, что при этом измеряемый ионный ток в ядре струи уменьшается, а на периферии (на углах свыше 30 градусов от оси двигателя) значительно возрастает.

Комплексные экспериментальные исследования указанных явлений при испытаниях СПД достаточно трудоемки и не всегда дают однозначный результат. Вместе с тем отдельные процессы относительно хорошо изучены (свободномолекулярное движение атомов; распыление материалов; перенос и осаждение распыленного материала; резонансная перезарядка и т.п.) и поддаются математической формализации. В последнее время были выполнены работы по моделированию поведения струи СПД в вакуумных камерах, которые провели группы исследователей: под руководством И. Бойда (I.D.Boyd) в Мичиганском университете (США), сотрудниками фирмы Альта (Alta, Италия) и ряд др. В данных

расчетах, в отдельных случаях, удалось добиться качественного соответствия результатов моделирования экспериментальным данным. Однако модели, использованные в этих работах, являются двумерными и не позволяют оценивать влияние на распространение струи СПД реальной геометрии стенок камеры и расположения откачных средств. Для получения более достоверных результатов необходимо рассматривать процессы в трехмерном приближении.

В качестве цели работы была выбрана разработка методики моделирования процесса распространения струи СПД в объеме вакуумной камеры в трехмерном приближении, с учетом взаимодействия ионов с остаточным газом и стенками вакуумной камеры.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработка трехмерной математической модели распространения струи стационарного плазменного двигателя в вакуумной камере.
2. Разработка поверхностного математического анализатора (ПМА) для проведения сравнения величин расчетных параметров (давление, плотность тока) с измеряемыми в эксперименте значениями, а также расчет интегральных характеристик СПД (тяга, суммарный ионный ток).
3. Создание математической модели для расчета процесса осаждения распыленных частиц материала стенок вакуумной камеры на поверхностях двигателя и вакуумной камеры.
4. Верификация моделей с использованием экспериментальных данных и результатов численных исследований других авторов.
5. Реализация модели на примере расчета вакуумных камер различной геометрии.

Научная новизна работы состоит в том, что разработана и реализована в виде вычислительного комплекса трёхмерная инженерная модель распространения струи стационарного плазменного двигателя в вакуумной камере. Предложен виртуальный датчик – ПМА, позволяющий проводить расчеты интегральных характеристик СПД (тяга, суммарный ионный ток), а также локальных значений параметров в струе двигателя (давление, плотность ионного тока и распределение частиц по скоростям).

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработана методика математического моделирования процесса распространения струи СПД, позволяющая изучать влияние на динамику атомов и ионов таких факторов, как геометрия стенок и распределение нейтрального газа в объеме вакуумной камеры, а также определять характеристики потоков ионов и нейтральных атомов внутри вакуумной камеры в процессе работы двигателя;
- проведено моделирование для конкретных геометрий вакуумных камер динамического распределения нейтральных частиц до и после включения двигателя;
- разработана методика численного определения локальных характеристик в

заданных точках струи СПД;

- разработана методика расчета распределения перезарядившихся частиц в объеме вакуумной камеры;
- разработана методика математического моделирования процессов распыления стенок вакуумной камеры и перепыления распыленного материала;
- разработана методика расчета интегральных параметров двигателя (тяги, суммарный ионный ток).

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием между модельными и экспериментальными данными, а также совпадением полученных автором результатов с расчетами других исследователей.

На защиту выносятся:

1. Стационарная трехмерная инженерная модель распространения струи стационарного плазменного двигателя в объеме вакуумной камеры произвольной геометрии.
2. Программный комплекс, позволяющий рассчитывать характеристики потоков ионов и атомов в объеме вакуумной камеры и отдельные интегральные параметры двигателя.
3. Результаты моделирования распределения нейтральных атомов и ионов в вакуумных камерах различной конфигурации.
4. Трехмерная инженерная модель оценки процессов распыления и перепыления материала стенок вакуумной камеры.

Апробация работы и научные публикации. Результаты работы прошли апробацию на 9 и 11 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика» в 2003 и 2005гг.; на «Всероссийском конкурсе на лучшие научные работы студентов по естественным, техническим наукам (проекты в области высоких технологий) и инновационным научно-образовательным проектам» в 2004г.; на 3 и 6 Международных конференциях «Авиация и космонавтика» в 2004 и 2007гг.; на Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике» в 2008г.; на 29, 30 и 31 Международных конференциях по электроракетным двигателям в 2005, 2007 и 2009гг. Основное содержание и результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях (в журналах, рекомендованных ВАК РФ) и 5-ти научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 99 страницах, включая размещенные в тексте 77 рисунка и 2 таблицы, а также списка использованных источников из 55 наименований; и состоит из введения, четырех глав, заключения (выводов) и приложений, объемом 20 стр.

Основное содержание работы

В первой главе обсуждается актуальность темы диссертации. Приведен анализ условий протекания рабочих процессов при распространении струи СПД в вакуумной камере, дан критический обзор ранее созданных математических моделей струи, сформулированы подходы для расчета различных параметров ее компонентов.

Представлен краткий обзор состава атмосферы внутри вакуумной камеры, моделей движения частиц, а также общее описание электрического и магнитного полей, формируемых в струе СПД. Рассмотрены характерные условия, которые создаются при работе СПД в объеме камеры. Даны оценки влияния остаточной атмосферы, а также динамического давления в вакуумной камере на работу двигателя. Проанализировано возможное воздействие распыленного со стенок камеры материала на рабочий процесс СПД. Произведен анализ факторов, которые являются критическими для двух характерных типов испытаний: параметрических и ресурсных.

Дан обзор результатов экспериментов по исследованию струи СПД, проведенных в космосе и в вакуумных камерах.

Рассмотрены созданные другими авторами модели струй СПД. Показано, что их основным недостатком является двумерная реализация.

Сформулированы цель работы и приведен анализ существующих методов для ее решения.

Во второй главе представлено описание стационарной трехмерной математической модели распространения струи плазменного двигателя в вакуумной камере. Особенности реализации ее составных частей являются:

Моделирование давления в вакуумной камере. Распределение нейтральных частиц имеет ключевое значение для анализа основных процессов, происходящих в вакуумной камере: для определения концентрации ионов, образующихся в результате перезарядки, электрического потенциала пространства, плотности тока первичных ионов в струе и др. Динамический вакуум в системе образуют атомы,двигающиеся в объеме камеры, при условии равенства потоков частиц из работающего двигателя и частиц, выходящих в средства откачки. Наиболее эффективным методом для оценки распределения нейтральных частиц, является трассировка их траекторий с использованием метода Монте-Карло. При этом вводятся следующие ограничения:

- при анализе движения траекторий первичных ионов применяется задание их скорости и угла вылета из двигателя на базе экспериментальных данных;

- траектория движения частицы строится до места ее пересечения со стенками вакуумной камеры;

- при попадании на стенку ион рабочего тела рекомбинирует и уходит от нее в виде атома со скоростью, определяемой с учетом максвелловского распределения для температуры стенки;

- т.к. поверхность стенок камеры имеет шероховатость, то при попадании на неё частицы точно неизвестно, в каком направлении она отразится. Поэтому в алгоритме расчета используется случайное отражение по «закону косинуса» относительно нормали к точке касания;

- атомы двигаются строго по прямолинейным траекториям, для учета соударений вводится коэффициент ослабления потока;

- при прохождении атомом расстояния, большего длины свободного пробега, генерируется его соударение с изменением скорости и направления (для данного расчета предварительно производится предрасчет концентрации нейтральных частиц без учета соударений). Сечение упругого взаимодействия атомов ксенона определяется с помощью модели взаимодействия двух шаров разных скоростей методом «твердых сфер», описанной в главе 3 диссертации. Скорость и направление движения частиц задается из базы данных заранее сделанных предрасчетов;

- отражения частицы от стенок происходят до тех пор, пока она не окажется во входном сечении откачивающего средства. Для того чтобы фиксировать выход атома из объема камеры, задаются «собирающие» поверхности насосов. При касании частицы этой поверхности считается, что она вылетела из объема камеры. После чего осуществляется переход к расчету траектории следующей частицы;

- в ходе вычислений заполняется массив данных с учетом времени, которое провели частицы в отдельных ячейках рассматриваемой области. С помощью этого массива рассчитывается реальная концентрация частиц в камере.

- для приближения картины расчета реальному процессу, взаимодействие частиц со стенками камеры моделируется с учетом максвелловского распределения при средней температуре стенки:

$$F(v) = 4\pi \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \cdot v^2 \quad , \quad (1)$$

где v – хаотическая скорость частицы, T – средняя температура отраженных частиц. Для корректного использования максвелловского распределения в рассматриваемых моделях подбирается для него степень свободы «Хи-распределения». В данной работе был использован метод наименьших квадратов (см. рис.1).

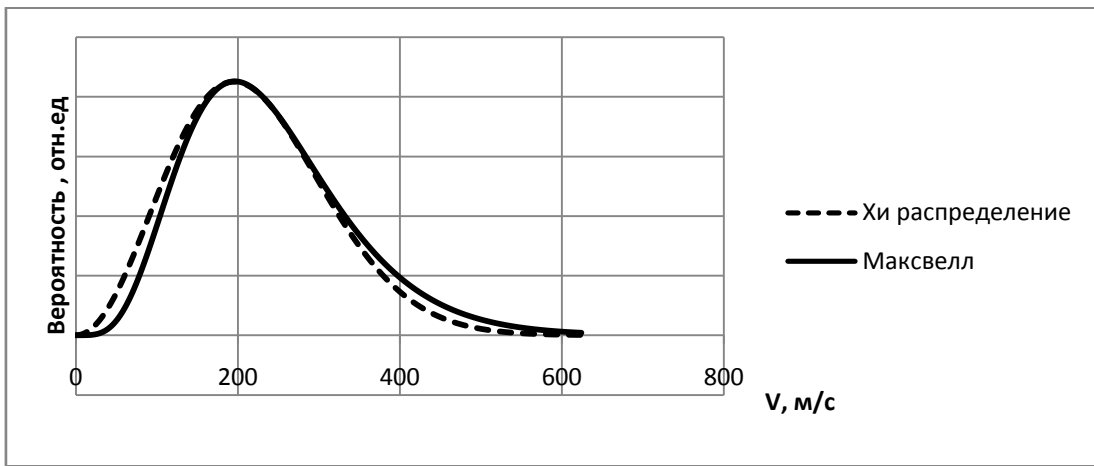


Рисунок 1. Результат подбора Хи-распределения к Максвелловскому по скоростям для заданной температуры газа 300К

Моделирование распределения концентрации первичных ионов. Под «первичными ионами» в работе понимаются частицы, ионизовавшиеся и ускоренные в разрядной камере двигателя. Их параметры задаются на основе экспериментальных данных. Все их множество распределяется в несколько групп – «моделируемых первичных ионов». В одном моделируемом ионе находится строго определенное количество первичных ионов, вылетающих в секунду из двигателя в заданном направлении. На изменение числа ионов по мере движения влияет их взаимодействие с нейтральными атомами остаточной атмосферы в камере. Процесс столкновений между нейтральными атомами и ионами оценивался с помощью экспериментально измеренных сечений перезарядки ионов ксенона на собственных атомах. На траекторию движения ионов оказывает влияние электрическое поле, формируемое в вакуумной камере.

Моделирование распределения концентрации ионов перезарядки. Количество перезаряженных атомов в расчетной ячейке определяется при прохождении моделируемого первичного иона через неё. Зная точную траекторию движения моделируемого иона в ячейке и значение сечения перезарядки для заданной энергии иона, можно определить среднюю длину пробега частиц в среде с учетом того, что скорость движения атомов относительно ионов пренебрежимо мала:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma_{пер}}, \quad (2)$$

где λ – средняя длина пробега иона, n – концентрация нейтральных частиц в ячейке, $\sigma_{пер}$ – сечение перезарядки:

$$\sigma_{пер} = (A - B \cdot \log(E)) \cdot 10^{-20}, \quad (3)$$

где E – энергия первичного иона, $A = 87,3 \pm 0,9$, $B = 13,6 \pm 0,6$.

С использованием соотношения (2) можно определить, какое число ионов в

моделируемом пучке взаимодействовало с атомами в расчетной ячейке. После сбора информации о количестве перезаряженных ионов во всех ячейках расчетной области, каждая из них является источником перезарядившихся ионов для последующего этапа моделирования. Определенное количество перезарядившихся ионов испускается по заданному распределению скоростей. Направление их движения генерируется случайным образом с равной вероятностью вылета. Начальная скорость определяется по максвелловскому распределению скоростей для средней скорости движения нейтральных частиц, а количество рассчитывается как отношение числа перезарядившихся ионов для данной ячейки к числу траекторий моделируемых ионов, проходящих через нее в секунду. В результате выполнения данного алгоритма строится распределение перезарядившихся ионов в рассматриваемой области. Данная модель подразумевает использование нескольких итераций, поскольку первоначально расчет ведется без учета воздействия электрического поля, а на последующих итерациях на траекторию перезарядившихся частиц накладывается влияние электрического поля.

Моделирование электрического поля. Основной задачей данного расчета является определение распределения потенциала в объеме вакуумной камеры. Граничные условия задачи: начальный потенциал пространства и температура электронов в определенной точке. Для их задания используются данные экспериментальных измерений в фиксированной точке вакуумной камеры. Принимается, что плазма квазинейтральна. Для описания ее параметров используются три основных уравнения магнитогидродинамики (уравнение неразрывности для электронного газа, уравнение сохранения импульса, уравнение сохранения энергии), которые решаются с помощью метода конечных разностей:

1. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e + \nabla(n_e V_e) = n_e n_n \langle \sigma_i v_e \rangle, \quad (4)$$

где V_e – направленная скорость движения электрона; v_e – тепловая скорость движения электрона.

2. Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_e n_e V_e) + m_e n_e (V_e \nabla) V_e = -en_e E - \nabla p_e + R_c, \quad (5)$$

с учетом: $p_e = n_e k T_e$, $R_c = \frac{en_e j}{\sigma}$, $\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e \vartheta_e}$, $\vartheta_e = \langle \sigma_{ei} v_e \rangle n_e + \langle \sigma_{ea} v_e \rangle n_e$

преобразуется в обобщенный закон Ома:

$$j = \sigma \left[-\nabla \varphi + \frac{1}{en_e} \nabla(n_e k T_e) \right]. \quad (6)$$

Из соотношения (6) с учетом заданных n_e , V_e и T_e и уравнения неразрывности тока электронов:

$$\nabla j = 0 \quad (7)$$

определяется распределение потенциала плазмы, применяя конечно-разностную схему для вычисления градиентов и лапласианов, при этом расчет параметров на новой итерации (слое) производится с помощью значений на предыдущей итерации (слое).

3. Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) + \frac{3}{2} n_e (V_e \nabla) k T_e + p_e \nabla V_e = \nabla \lambda_e \nabla T_e + j E - 3 \frac{m_e}{m_i} \vartheta_e n_e k (T_e - T_H) - n_e n_n \langle \sigma_i v_e \rangle \varepsilon_i, \quad (8)$$

где
$$\lambda_e = \frac{2.4}{1 + \frac{\vartheta_{ei}}{\sqrt{2} \vartheta_e}} \cdot \frac{k^2 n_e T_e}{m_e \vartheta_e}.$$

В расчетах использовалось распределение Больцмана для определения потенциала плазмы:

$$\varphi = \varphi^* + \frac{k}{e} T_e \cdot \ln \left(\frac{n_e}{n_e^*} \right) \quad (9)$$

С учетом этого определяется влияние напряженности электрического поля на траекторию движения частиц. Например, для оси X движение описывается соотношениями:

$$F_x = q E_x; \quad F_x = m a_x; \quad S_x = V_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (10)$$

Результаты расчета электрического поля учитываются при перерасчете траектории движения перезарядившихся частиц.

В третьей главе представлена программная реализация математической модели.

В первом разделе дано краткое описание приложений и библиотек, созданных для реализации проекта.

Во втором разделе приводятся математические выкладки, которые использовались при разработке вспомогательной численной сущности – виртуального датчика – поверхностного математического анализатора (ПМА), используемого при расчетах различных интегральных характеристик (тяга, суммарный ионный ток), а также локальных значений параметров (давление, плотность ионного тока, распределение частиц по скоростям):

Определение давления. В процессе моделирования на поверхность ПМА попадает N условных моделируемых частиц. Масса, которая переносится каждой условной частицей за секунду времени – $\dot{m}/N(\text{общ})$, где $N(\text{общ})$ – общее число моделируемых частиц. Формула расчета давления принимает следующий вид:

$$p = 2 \frac{\dot{m}}{S \cdot N(\text{общ})} \sum_{i=1}^N (V_{i(z)}), \quad (11)$$

где $V_{i(z)}$ – проекция вектора скорости иона на нормаль к площадке ПМА, S – площадь поверхности анализатора.

Определение тяги. Для расчета тяги двигателя использовалась следующая методика: назначалось измерительное сечение (ПМА) в компьютерной модели, на расстоянии нескольких сантиметров от двигателя, так, что оно перекрывало все сечение камеры. При попадании на площадку ПМА ускоренного иона, фиксировалось значение его скорости и косинус угла между направлением движения иона к нормали площадки по абсолютной величине. Тяга в таком случае будет равна:

$$T = \frac{\dot{m}}{N(\text{общ})} \sum_{i=1}^N (V_i \cdot \text{Cos}(\alpha_i)). \quad (12)$$

Определение плотности тока первичных ионов. Плотность тока ионов на ПМА определяется из формулы:

$$j = \frac{N \cdot \dot{m} \cdot F \cdot Z}{N(\text{общ}) \cdot \mu \cdot S}, \quad (13)$$

где F – постоянная Фарадея; μ – молярная масса ксенона; S – площадь ПМА; Z – валентность иона. Поскольку ПМА устанавливаются на определенном расстоянии от двигателя, пучок с моделируемыми ионами, проходя через среду нейтральных атомов в вакуумной камере, перезаряжается, что учитывается с помощью коэффициента ослабления.

Определение плотности тока ионов перезарядки. По результатам моделирования распределения первичных ионов в вакуумной камере известно общее количество ионов, образующихся в результате перезарядки в отдельных ячейках. Их траектории строятся с учетом уравнения движения. В процессе моделирования на поверхность ПМА попадает N условных частиц, $\dot{N}_{\text{пер}}$ – общее число ионов, образующихся в результате перезарядки в объеме камеры, $N_{\text{общ}}$ – общее число моделируемых траекторий. Плотность тока на анализаторе определяется из формулы:

$$j = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\dot{N}_{\text{пер}} \cdot e}{S \cdot N_{\text{общ}}} \right\}, \quad (14)$$

где e – элементарный заряд, S – площадь ПМА.

В третьем разделе рассмотрен процесс упругого взаимодействия атомов ксенона. Представлены расчеты сечений упругого взаимодействия с использованием различных теорий (модели твердых сфер; модели твердых сфер переменного диаметра; модели с потенциалом взаимодействия по Леннард-Джонсу; модели с потенциалом отталкивания по Борну-Майеру). Проведенный анализ показал, что при температурах менее 1000К целесообразно использовать модель твердых сфер, а при больших температурах, модель с потенциалом отталкивания по Борну-Майеру.

В четвертом разделе приведен тест модели при расчетах свободномолекулярного течения газа в трубах различной длины и формы, и сравнение коэффициента выхода частиц с аналитическим решением. Для всех рассмотренных случаев получено удовлетворительное совпадение расчетных результатов с теоретическими кривыми. Это подтвердило правильность работы алгоритма расчетов.

В пятом разделе приведен тест модели расчета распыления на полусфере, с использованием датчиков ПМА. Полученные результаты позволили убедиться в правильности построения модели процесса перепыления материала стенок вакуумной камеры в трехмерном пространстве.

В шестом разделе рассмотрены оценки погрешностей модели. Точность расчета давления в вакуумной камере зависит от погрешности датчика определения массового расхода газа, погрешности определения коэффициента выхода для насосов, оценки температуры стенки камеры и косвенно зависит от измеренного экспериментально углового распределения ионов, выбора модели отражения атома от стенки камеры. Оценки показывают, что суммарная погрешность входных данных может быть ~10%, при этом погрешность самого расчета не превосходит 30%. Это сопоставимо с экспериментальными данными – у современных вакуумметров погрешность измерения составляет 10...30%.

Погрешность измерения ионных токов на периферии струи составляет 10...20%. Согласно оценкам суммарная погрешность при расчете концентрации или тока струи в определенном участке камеры, не превышает 10...20%.

Погрешность вычисления скорости распыления атомов и скорости перепыления атомов стенок вакуумной камеры порядка 10...30%, а плотность ионного тока перезарядившихся ионов рассчитывается с точностью 30...50%.

В четвертой главе приведены результаты моделирования распространения струи нескольких моделей СПД в различных вакуумных камерах таблицы 1 и 2, а также тестирования отдельных элементов программного продукта. В приложении А дано подробное описание начальных и граничных условий. Представлено пять различных двигателей (среди них стандартные модели СПД-70, СПД-100 и их аналоги),

которые тестировались в 7 камерах разной формы и размеров, с разными системами откачки. Основными исходными параметрами для расчетов являлись угловое распределение плотности ионного тока и массовый расход рабочего тела, задаваемые на поверхности среза двигателя. Для двух двигателей было использовано детальное энергетическое распределение по скоростям ионов.

Таблица 1.

Наименование, изготовитель	\dot{m} , мг/с	U_p , В	N_p , Вт	Вак. камера,
СПД-70, ОКБ «Факел»	2,35	300	690	1
СПД-70, ОКБ «Факел»	2,35	300	690	6
КМ-5, «Центр Келдыша»	3,5	500	1350	2
Аналог СПД-100, Италия	5,4	300	1500	4
ВРТ-4000, США	14,1	300	3000	5
СПД-100, ОКБ «Факел»	5	300	1350	3

Таблица 2.

Обозн.	Название (тип средств откачки)	Габариты [диаметр / длина], м	Объем, м ³	Площадь насосов, м ²
1	Стенд 2ИУВ, кафедра 208 МАИ (масл.)	0,9 x 3,5	3	1,28
2	Стенд КВУ-90, «Центр Келдыша» (крио.)	3,7 x 10	89	2,51
3	Стенд 71-3-90, ОКБ «Факел» (крио.)	2 x 7	50	~1
4	Стенд Centros spazio (Alta, Италия) (крио.)	1,9 x 4	7,7	1,17
5	Вакуумная камера 12V, Arnold Engineering Development Center (США) (крио.)	5 x 12	164	41
6	Стенд в У2В, кафедра 208 МАИ (масл.)	2 x 6	20	1,28
7	Стенд в Мичиганском университете (США) (крио.)	6 x 9	232	7,87

Распределение нейтральных атомов при работающем двигателе проанализировано с использованием данных экспериментов в четырех установках: 1, 2, 3 и 7, а также сравнено с расчетами других исследовательских групп: фирмы Alta и Мичиганского университета. Достигнута удовлетворительная сходимость с экспериментом (в пределах погрешности измерения датчиков вакуумметра).

На рисунке 2 представлен результат расчета концентрации нейтральных атомов в вакуумной камере 7 (использовалось уравнение Менделеева-Клайперона для пересчета концентрации частиц в давление). Расчет для данной камеры, выполненный в Мичиганском университете, совпадает с экспериментом по форме кривой распределения, однако абсолютные значения в 8...10 раз меньше экспериментальных. Результаты моделирования настоящей работы демонстрируют хорошую сходимость с экспериментом (рис. 2).

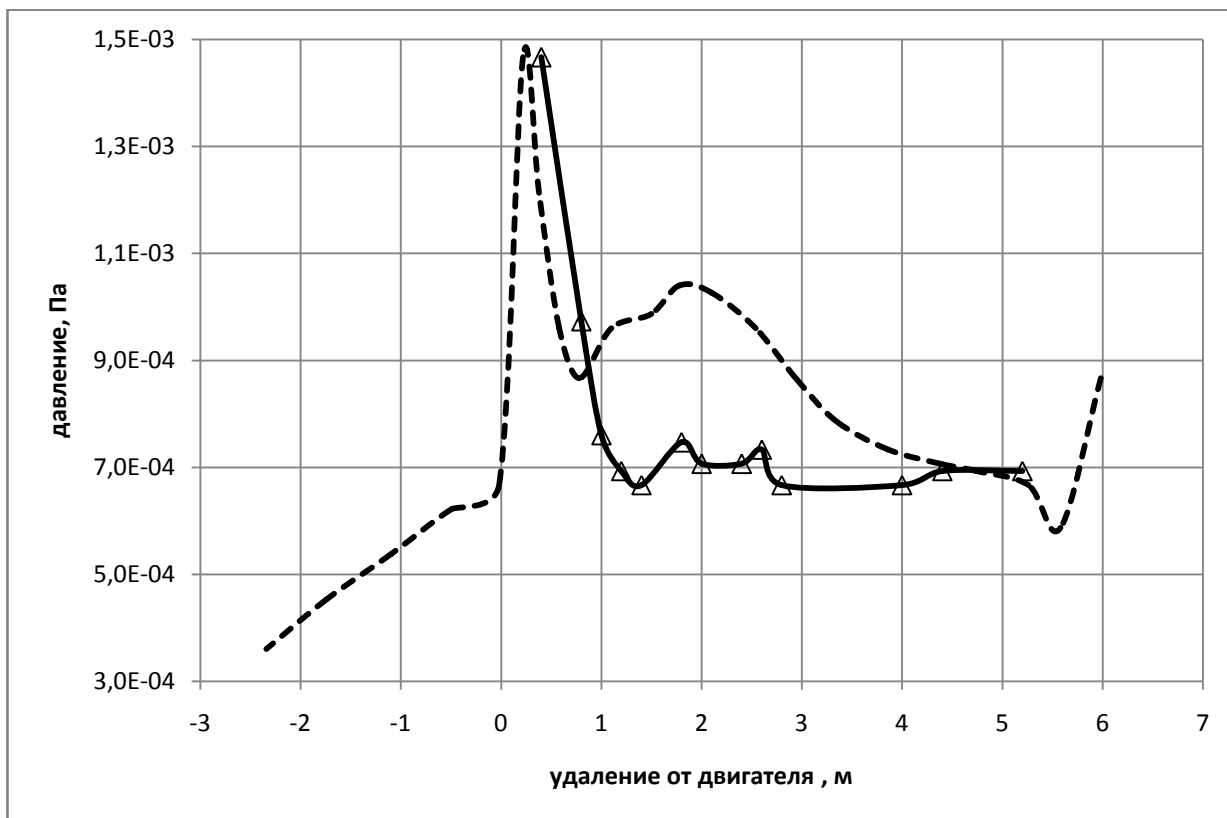


Рисунок 2. Сравнение результатов расчетов с экспериментом (пунктир – расчет; сплошная – давление, измеренное экспериментально)

Второй раздел посвящен результатам расчета распространения струи плазменного двигателя в объеме вакуумной камеры. Для анализа модели и сравнения с экспериментом был создан модуль, позволяющий имитировать зондовую систему измерений с помощью ПМА. Моделировались две дуговые арки с датчиками: одна с размерами датчиков такими же, как диаметр зонда в эксперименте (7мм), расположенными через 2,5 градуса. Вторая с ПМА диаметром 35мм, закрепленными через 6 градусов. Первая использовалась для расчета ионного тока, вторая для определения энергетического распределения первичных ионов.

На рис.3 и 4 приведены результаты расчета потока ускоренных ионов в вакуумной камере 2. Полученные данные расчета ионного тока имеют хорошую сходимость с экспериментом (рис. 3), а представленные на рис. 4 распределения подтверждают существующие представления о постепенной перестройке кольцевой структуры струи СПД и соответствуют измеренным данным.

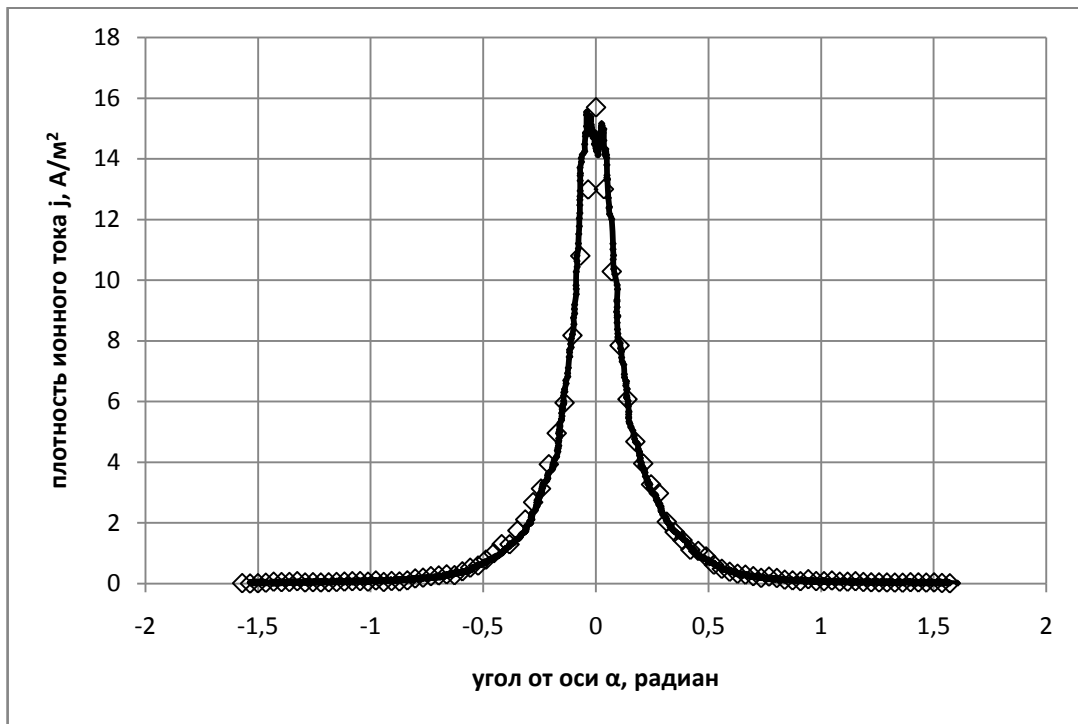


Рисунок 3. Сравнение плотности моделируемого тока на 91 ПМА диаметром 18 мм (ромбы), находящихся на расстоянии 1 м, с экспериментальными измерениями (сплошная линия)

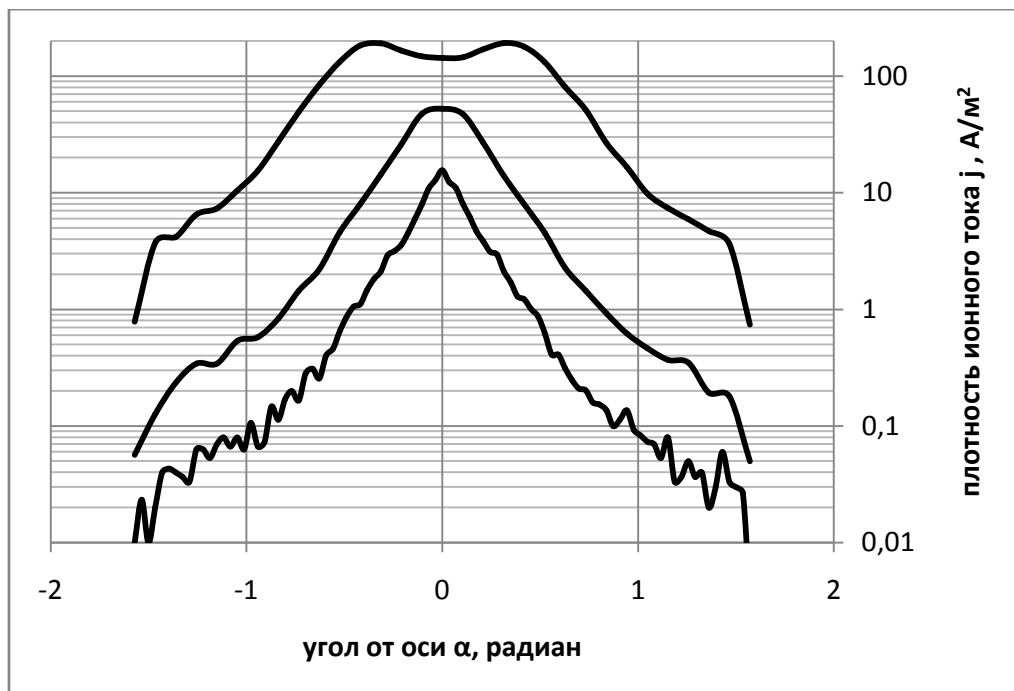


Рисунок 4. Результаты расчета пространственного распределения плотности ионного тока на расстояниях 0,1; 0,5; 1 м (сверху вниз)

Интегральное значение тяги для двигателя КМ-5, рассчитанное для 3000000 моделируемых ионов на ПМА-тягомере равнялось 81,07 мН с учетом 100% ионизации массового расхода 3,5 мг/с. Измерения тяги двигателя в данном эксперименте показали значение ~ 75 мН.

В третьем разделе представлены расчеты распыления струей двигателя

стенок вакуумной камеры 1. Для данной камеры характерна следующая особенность: около 60% ускоренных ионов попадают в днище камеры, остальные распределяются по цилиндрическим стенкам. Наиболее «распыляемой» частью камеры, за исключением днища, является область цилиндрических стенок на удалении 0,4...1,3 м от среза двигателя. В расчетах было получено, что скорость осаждения перепыленного материала со стенок камеры на поверхность разрядной камеры двигателя может достигать до $4 \cdot 10^{-11}$ м/с. Ранее (в гл.1) были приведены оценки предельных скоростей осаждения загрязнений, характерных для длительных испытаний двигателя СПД-100 в ОКБ «Факел», которые составляли $\sim 10^{-11}$ м/с. Исходя из этого, для рассматриваемой камеры сделан вывод о необходимости осуществления специальных мероприятий для снижения загрязняющих потоков. В качестве таких действий было предложено использовать мишень-ионоприемник потока в торце камеры с призматическими выступами на поверхности и защиту стенок вставками из материала с низким коэффициентом распыления. Результаты моделирования показали, что наибольший эффект (снижение до 5 раз) достигается при использовании в зонах интенсивного распыления стенок вставок из графита (рис.5).

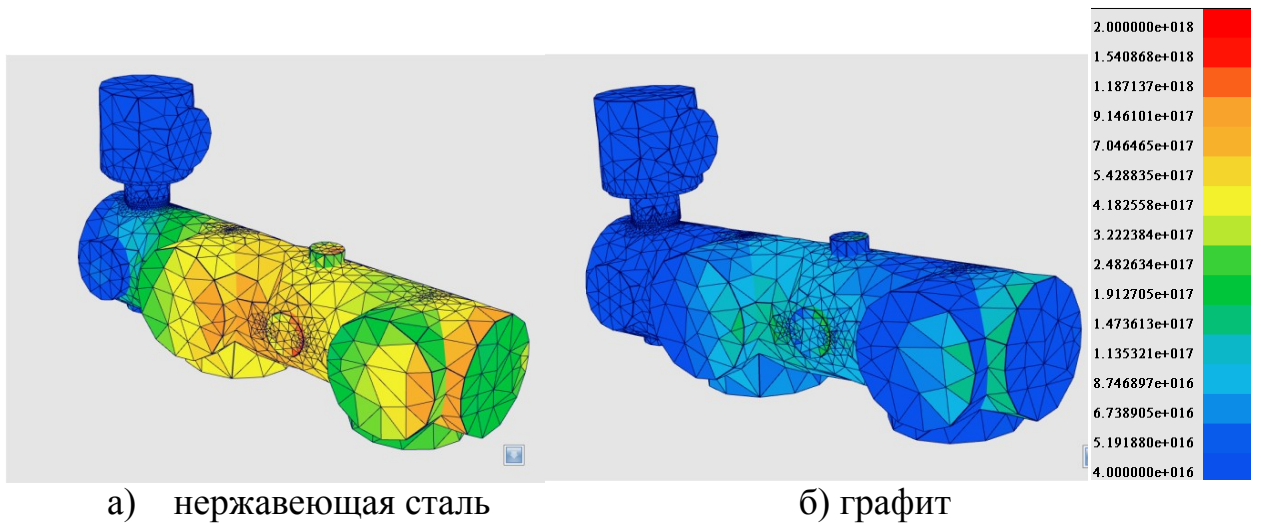


Рисунок 5. Плотность потока перепыления материала при различных покрытиях стенок камеры

В четвертом разделе главы помещены результаты моделирования потенциала в вакуумной камере с использованием магнитогидродинамической модели. Проанализировано влияние электрического поля на характер движения перезарядившихся ионов. Проведено сравнение плотности тока перезаряженных ионов в задней части камеры, рассчитанное с помощью модели, с результатами, которые были получены в камере 6 для двигателя СПД-70. Для данной камеры было подсчитано давление нейтральных частиц при коэффициенте выхода из насосов 0,55 и статическом давлении $7,23 \cdot 10^{-3}$ Па (рис.6).

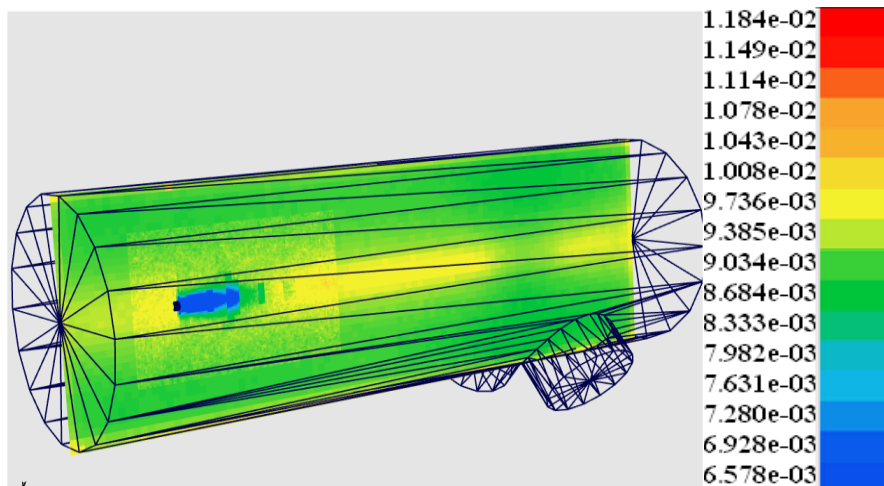


Рисунок 6. Результаты расчета давления нейтральных частиц Хе в камере 6 при работающем двигателе [$1/\text{м}^3$]

Экспериментально была зафиксирована угловая зависимость распределения плотности ионного тока в струе рассматриваемого двигателя. По данной кривой был определен расход ксенона с использованием формулы:

$$\dot{m} = \int_0^{\pi/2} (S(\alpha) \cdot \frac{j}{e} \cdot M_{ion}) d\alpha, \quad (15)$$

где \dot{m} – массовый расход газа, $S(\alpha)$ – площадь элемента сферы, ограниченная телесным углом $d\alpha$, j – плотность ионного тока на заданном угле, e – элементарный заряд, M_{ion} – масса иона.

Расчет данного интеграла показал хорошую сходимость с экспериментальными данными (2,2мг/с – расчет и 2,3мг/с – измерение). Погрешность экспериментального распределения плотности ионного тока (по интегральному перерасчету массового расхода) составляла около ~6%.

Расчет тяги с помощью ПМА-тягомера, для экспериментально измеренного распределения плотности тока, дал значение на уровне ~39,5мН. При испытаниях величина тяги данного двигателя изменялись в диапазоне 38,5...39,5мН в зависимости от давления остаточного газа в камере. Погрешность пространственного распределения массового потока в расчетах для данной камеры равняется ~2%.

Пересчет массового расхода из углового распределения плотности ионного тока (рис. 7) по формуле (15) дал результат ~2,38мг/с (экспериментальные измерения – 2,3мг/с). При этом необходимо учесть, что экспериментальная зависимость (рис. 7) не была симметрична относительно центральной оси, что повлияло на точность моделирования, кроме того при измерениях некоторая часть первичных ионов «перезарядилась» и не фиксировалась зондом. Все это и послужило причиной отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных.

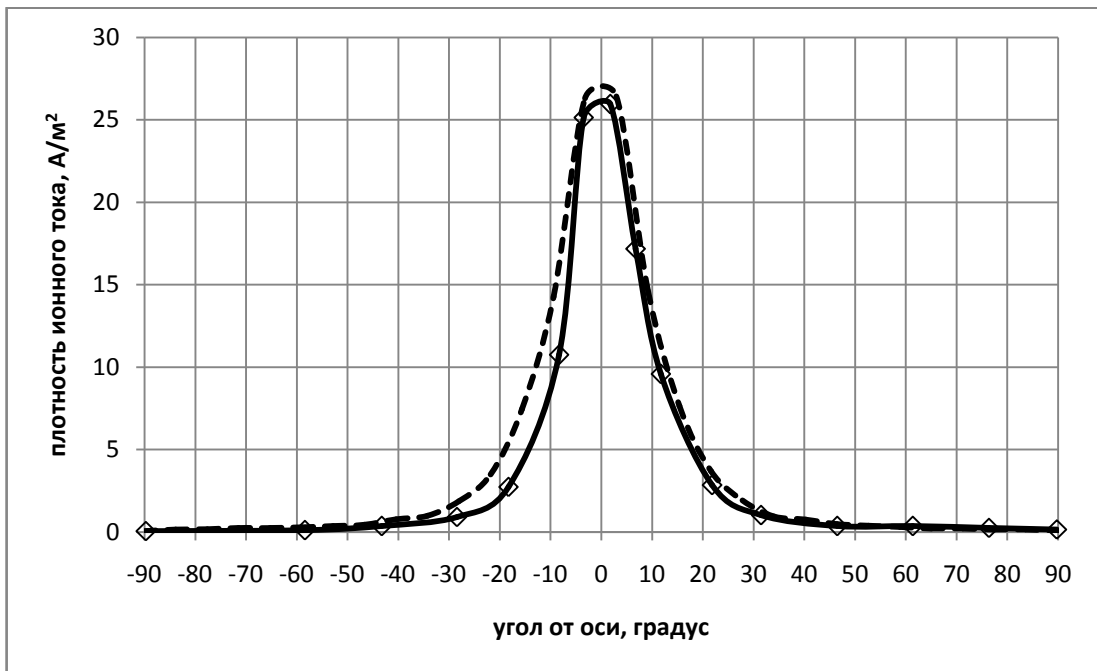


Рисунок 7. Угловое распределение плотности ионного тока в струе СПД на расстоянии 0,5м (экспериментальные измерения – сплошная линия; расчет для системы из 30 ПМА – пунктир)

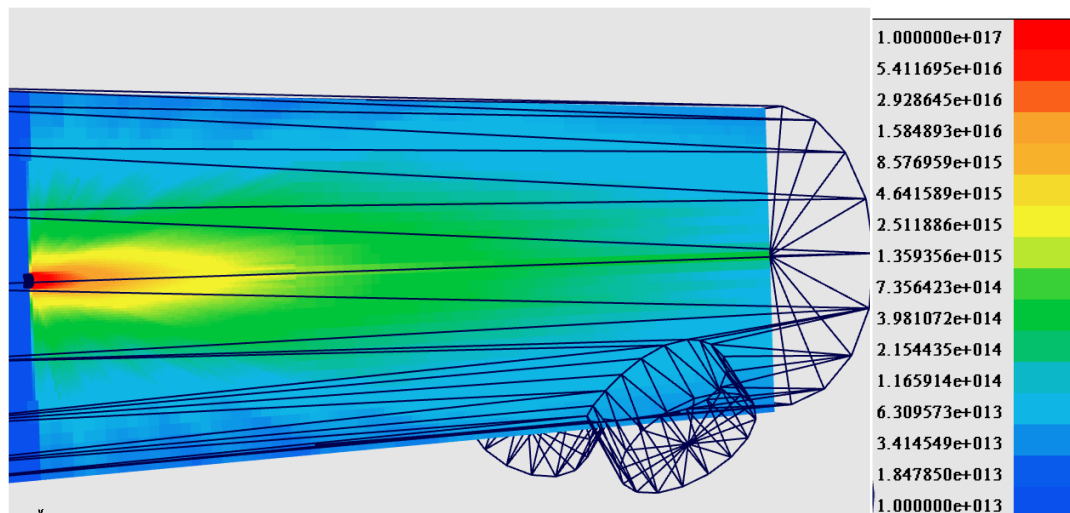


Рисунок 8. Расчет распределения концентрации первичных ионов [$1/\text{м}^3$]

На рис. 8 представлено распределение концентрации первичных ионов, рассчитанное по экспериментальным данным (для наглядности визуализации приведен нижний предел для значения давления, получаемого в расчете), а на рис.9 – распределение плотности тока первичных и перезарядившихся ионов вдоль оси камеры.

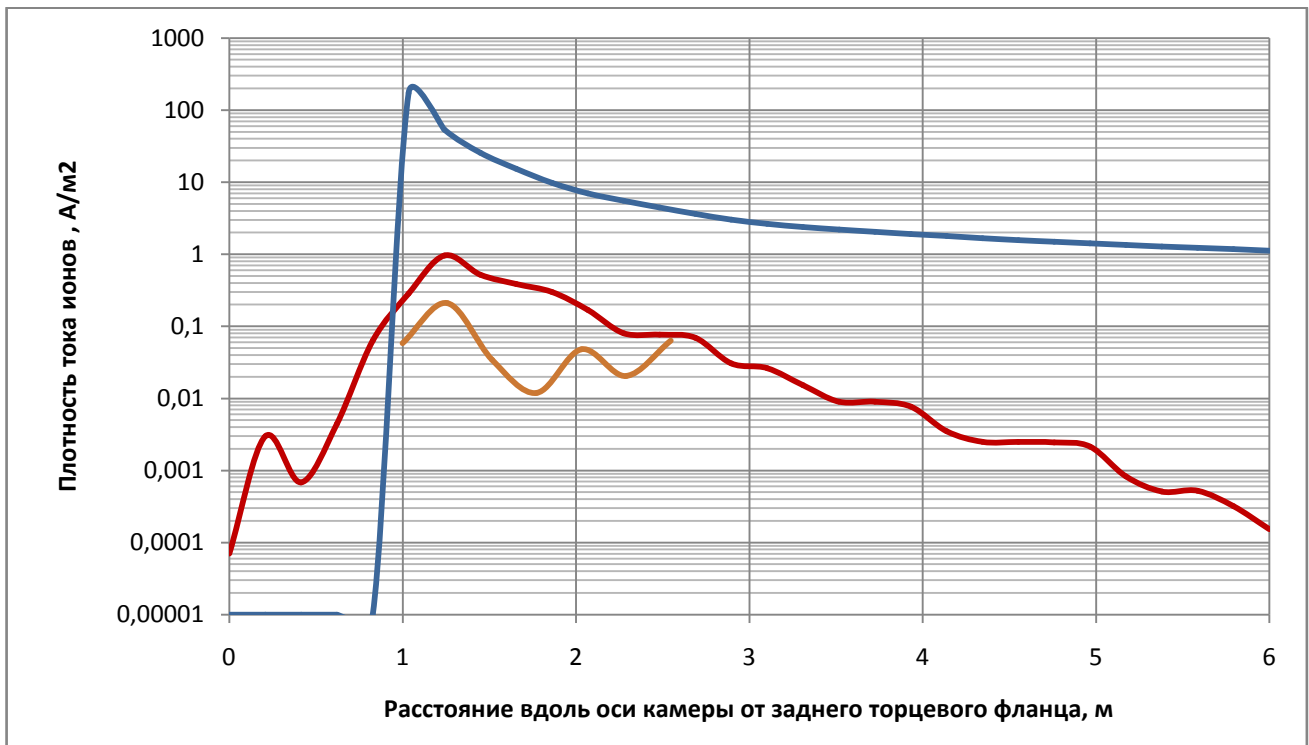


Рисунок 9. Результаты расчета распределения плотности тока ионов вдоль оси камеры б (первичные ионы – синяя линия; перезарядившиеся ионы на ПМА, повернутых к двигателю – коричневая линия; перезарядившиеся ионы на ПМА, повернутых от двигателя – оранжевая линия)

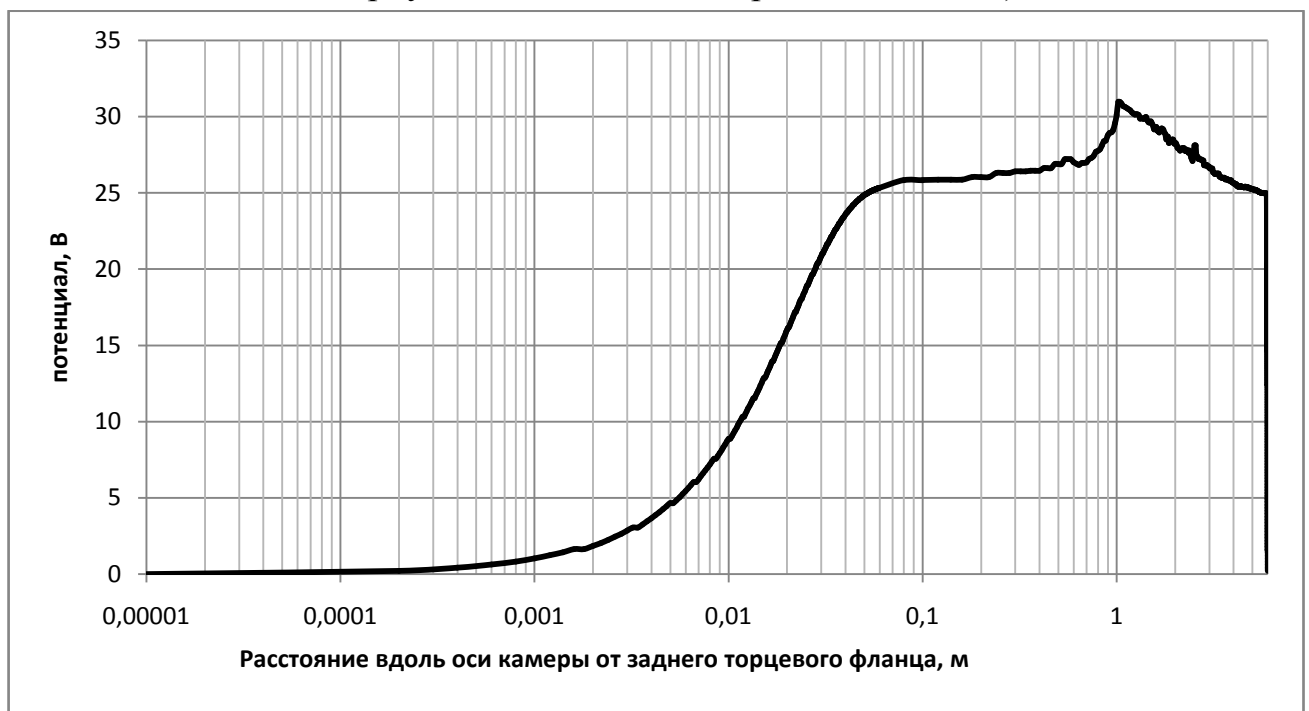


Рисунок 10. Результаты расчета распределения потенциала вдоль центральной оси камеры б

Разница в распределении перезарядившихся ионов (рис.9) обусловлена влиянием электрического поля, препятствующего их движению в направлении двигателя. При этом соотношение между перезарядившимися ионами,

движущимися от двигателя и к нему, в сечении близкому к срезу разрядной камеры равняется приблизительно 5.

Расчитанное распределение потенциала на оси камеры показано на рис.10. При построении данного распределения использовалось одно экспериментально измеренное значение потенциала в точке, смещенной от центральной оси на 60 градусов и на удалении от двигателя 0,5м. Расчетное поле потенциалов имеет хорошую сходимость с экспериментальными данными (порядка 1В).

На рисунке 11 представлено сравнение с экспериментальными данными результатов расчета распределения ионов в струе по радиусу камеры. Данный график можно считать обобщающим тестом, подтверждающим выполнение в разработанной модели заявленных требований к погрешностям вычисления распределения ионов перезарядки.

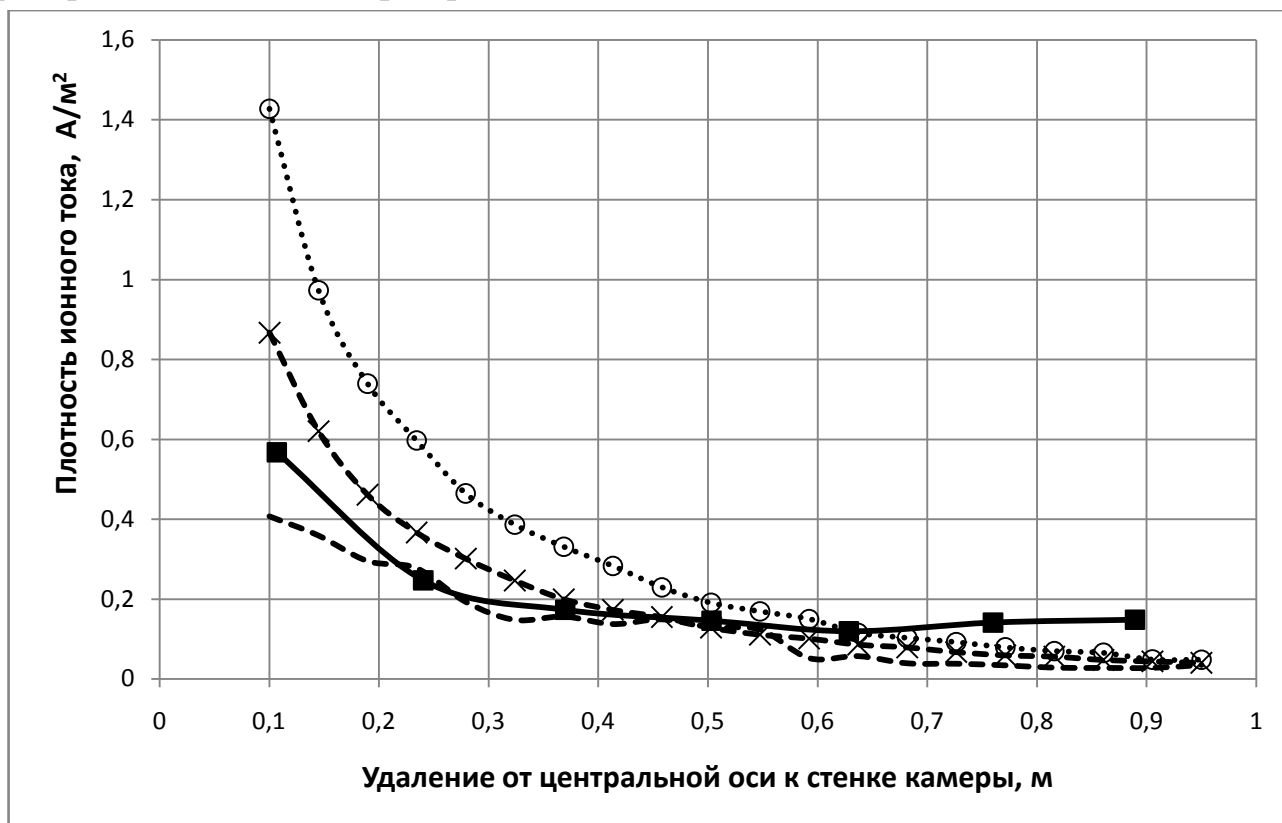


Рисунок 11. Распределение плотности ионного тока поперек струи (экспериментальные данные – сплошная линия; моделирование без учета перезарядки и электрического поля – пунктир с крестиками; с учетом перезарядки но без поля – пунктир с кружками; моделирование с учетом поля и с учетом повторной перезарядки – пунктир)

На основании проведенных численных исследований можно заключить, что разработанные модели и программные продукты дают возможность с приемлемой точностью описывать распространение струи СПД в вакуумных камерах с учетом конкретной конфигурации их поверхностей и расположения средств откачки.

Предложенные модели позволяют эффективно учитывать и «фильтровать» пререзарядившиеся ионы и тем самым повышать достоверность данных при обработке измерений пространственного распределения ионных потоков в струе двигателя, как по величине токов, так и по энергии. Полученные результаты по использованию ПМА для расчета тяги дают возможность определять тяговое усилие моделей СПД на стендах, не оборудованных тягоизмерительными устройствами, по результатам измерения параметров струи. Разработанные модели можно использовать для оценок при модернизации существующих или проектировании новых вакуумных камер с целью выбора их оптимальной формы и конфигурации, площади и расположения откачных средств, конструкции мишени-ионоприемника. Созданное математическое обеспечение позволяет оценить пригодность той или иной установки для организации конкретных испытаний СПД с учетом требований к их проведению.

В заключении диссертации сформулированы следующие выводы:

1. Разработана трехмерная математическая модель и программные продукты для численного моделирования процессов: распределения нейтрального газа в объеме вакуумной камеры при работе СПД, движения первичных ионов, их взаимодействия с остаточной атмосферой и распространения пререзарядившихся частиц с учетом влияния электрического поля.
2. Проведено сравнение результатов расчета с данными измерений отдельных параметров в вакуумных камерах различной формы и размеров. Получена сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными на уровне 10...30%.
3. Разработан алгоритм для расчета интегральных характеристик СПД (тяги, суммарный ионный ток), а также параметров в локальных областях струи и камеры. Достигнуто расхождение результатов расчета с экспериментальными данными менее 10%.
4. Разработана трехмерная математическая модель процессов распыления и перепыления материалов конструкций вакуумной камеры под действием ионной струи СПД, в которой впервые был применен алгоритм построения пространственного распределения распыленных частиц с помощью сплайн аппроксимации по заданным измерениям в двух плоскостях. С использованием данной модели выработаны рекомендации по уменьшению потока продуктов распыления для камеры конкретной геометрии.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Торопов Г.П. Методика численного анализа распределения частиц в струе источника ионов // Сб. тез. докл. 9 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика». – М.: МЭИ, 2003. – стр. 78, 79.
2. Торопов Г.П., Хартов С.А. Моделирование процессов распространения струи плазменного двигателя в вакуумной камере // Сб. трудов Федеральной итоговой научно-технической конференции «Всероссийского конкурса на лучшие научные работы студентов по естественным, техническим наукам (проекты в области высоких технологий) и инновационным научно-образовательным проектам». – М.: МИЭМ. – 2004. – стр.37-39.
3. Торопов Г.П. Моделирование процессов распространения струи плазменного двигателя в вакуумной камере // Сб. тез. докл. 11 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика». – М.: МЭИ, 2005. – стр. 112,113.
4. Toropov G.P. Khartov S.A. A 3D model calculating sputtering and depositing processes under Electric Propulsion thruster testing in a vacuum chamber IEPC-2005-074 // Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, 31 Oct. – 5 Nov. 2005, Princeton University, Princeton, USA.
5. Chervakov V., Khartov S., Toropov G. Numerical procedure permitting calculation of how a vacuum chamber influences Electric Propulsion thruster jet expansion. IEPC-2007-2 // Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, 17-20 Sept. 2007, Florence, Italy.
6. Toropov G.P. Khartov S.A. A 3D model of electron dynamics near the outlet section of SPT thruster IEPC-2007-343 // Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, 17-20 Sept. 2007, Florence, Italy.
7. Toropov G.P. A 3D boundary sheath analysis on Faraday probe measurements in a non-equilibrium plasma. IEPC-2007-4 // Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, 17-20 Sept. 2007, Florence, Italy.
8. Переславцев А.А., Торопов Г.П., Хартов С.А. Исследования процесса переноса электронов в прикатодной области разряда стационарного плазменного двигателя // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – Т.52. – №3. – с. 84-90.
9. Торопов Г.П., Хартов С.А. Математическая модель распространения струи плазменного ускорителя в объеме вакуумной камеры // Вестник Московского авиационного института. – 2008. – Т.15. – №4. – с. 25-34.

