

## ОТЗЫВ

о диссертации М. В. Абгаряна «Численное моделирование струи разреженной плазмы, исходящей из электрореактивного двигателя», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Рецензируемая работа посвящена моделированию течения струи плазмы, выходящей из стационарного плазменного двигателя (СПД). Для решения поставленной задачи строятся кинетические уравнения, которые потом решаются численно, для чего были разработаны численные методы.

### 1. Актуальность работы

Актуальность работы не вызывает сомнения, поскольку электрореактивные двигатели (ЭРД) широко применяются в космонавтике на протяжении более сорока лет. Одной из наиболее распространенных разновидностей ЭРД являются стационарные плазменные двигатели (СПД), которые используются в настоящее время как в России, так и за рубежом для стабилизации и коррекции орбит космических аппаратов. В последнее время наметилось также использование СПД на заключительном этапе выведения спутников на геостационарную орбиту.

Ряд вопросов, касающихся состава и эволюции плазменной струи, остается недостаточно изученным и по этой причине слабо освещенным в публикациях. Также недостаточно исследовано воздействие струи СПД на различные по составу элементы конструкции космического аппарата. Кроме этого отсутствуют общепринятые методики расчета характеристик «обратных» потоков ионов, возникающих в области среза ускорительного канала разрядной камеры СПД, несмотря на то, что в общих чертах механизм образования потоков понятен. Совершенно недостаточно исследовано влияние магнитного поля на течение струи, что представляется достаточно важным, учитывая рассматриваемую в настоящее время возможность управления вектором тяги СПД с помощью внешнего магнитного поля.

Наконец, воспроизведение космических условий в наземном эксперименте является крайне затратной по времени и дорогостоящей ввиду необходимости проведения экспериментов по измерениям параметров струи СПД на экспериментальных стендах в условиях высокого вакуума. Поэтому численное моделирование параметров плазменной струи, исходящей из СПД, является актуальной задачей.

### 2. Краткая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и список литературы.

В первой главе дается общее описание стационарных плазменных двигателей как подтипа электрореактивных двигателей. Приводится принципиальная схема стационарного плазменного двигателя на примере двигателя СПД-100 отечественного производства, широко используемого как в России, так и за рубежом в космических исследованиях. Описываются физические процессы, протекающие при работе двигателя и приводящие к образованию плазменного разряда с последующим движением плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Приводится

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 30 05 2019

обзор состояния исследований в области моделирования плазменной струи СПД, в частности, рассматривается молекулярно-кинетический подход, методы статистического моделирования типа Монте-Карло, методы модельных кинетических уравнений и проводится анализ существующих преимуществ и недостатков используемых методов моделирования. Проводятся оценки чисел Кнудсена, рассчитываемых из численных значений интегральных характеристик СПД и параметров течения плазмы. Значения  $K_n$  для ион-ионного и нейтрал-нейтрального взаимодействий в струе СПД составляют  $\sim 100$ . В то же время значение числа  $K_n$  для ион-нейтрального взаимодействия по известному механизму резонансной перезарядки составляет несколько единиц, что указывает на определяющее влияние данного механизма взаимодействия между компонентами плазменной струи на функции распределения компонент плазменной струи. На основании проведенного анализа сделан выбор метода моделирования плазменной струи СПД, основанный на построении и численном решении системы модельных кинетических уравнений. Формулируются требования к разрабатываемой численной модели.

Во второй главе приводится описание физико-математической модели. Подробно описывается механизм резонансной перезарядки ионов: столкновение быстрого иона с медленным нейтральным атомом того же химического элемента, при котором электрон с атома перескакивает на пролетающий мимо ион, нейтрализуя его. Таким образом, в результате столкновения образуется быстрый нейтральный атом, имеющий те же импульс и энергию, что и налетающий ион. Также образуется медленный ион, имеющий энергию порядка тепловой энергии первоначального нейтрального атома. Сечение резонансной перезарядки существенно велико и достигает значений  $\sim 10^{-14} \text{ см}^2$ , что значительно превышает значения сечений упругих и неупругих столкновений между ионами и атомами одного сорта, которые находятся в диапазоне  $10^{-16} \text{ см}^2$ . Механизм резонансной перезарядки является источником медленных положительных ионов, движущихся в окружающем СПД пространстве, включая обратную полусферу. В итоге приводится вывод двух типов систем модельных кинетических уравнений для резонансной перезарядки для функции распределений ионов  $f$  и нейтралов  $g$ . Электрического поля  $\vec{E}$  определяется с помощью обобщения гипотезы «термализованного потенциала» и привлечения уравнения движения для электронной компоненты. Показывается, что обе построенные модели удовлетворяют всем основным требованиям, предъявляемым к создаваемым кинетическим уравнениям.

В третьей главе формулируется задача для нахождения решения в трехмерной нестационарной постановке построенных в главе 2 интегро-дифференциальных кинетических уравнений. Она включает постановку граничных и начальных условий и определения входящих в модель моментов от функций распределения ионов и нейтралов. Для решения поставленной задачи был создан численный метод, при помощи которого были получены численные решения для обоих упомянутых выше модельных кинетических уравнений. Используемый в диссертации численный метод есть модификация часто используемого в динамике разреженного газа метода расщепления по физическим процессам. Модификация заключалась в том, что влияние силового члена учитывалась на этапе релаксации. Также, в представленном в диссертации методе ионы, имеющие большую по оси  $z$  компоненту макроскопической

скорости, рассматриваются отдельно от ионов, родившихся в результате перезарядки. Первая группа ионов – ионы, непосредственно выходящие из двигателя. Предполагается, что такие ионы не рождаются в результате перезарядки. Это подтверждено как экспериментальными исследованиями, так и расчетами, проведенными в стационарном случае. Основная трудность, с которой столкнулся диссертант – это учет в численном решении сингулярности в граничном условии. Как показано в диссертации не учет сингулярности в граничных условиях приводит к неправильной картине течения. Диссертантом был создан вариант равномерно пригодной численной схемы вычисления трехкратных интегралов, который позволил, как показали сравнения результатов вычислений с экспериментальными данными, решить эту проблему. Таким образом, созданный в диссертации численный метод позволяет исследовать принципиально нестационарные эффекты, возникающие в струе стационарных плазменных двигателей, также решать стационарные задачи методом установления.

Все результаты расчетов, которые представлены в четвертой главе диссертации были выполнены для системы модельных кинетических уравнений с частотами столкновений, не зависящими от скоростей ионов и нейтралов. Были выполнены также расчет модели с частотами столкновений, зависящими от микроскопических скоростей ионов и нейтралов. Сравнение обеих расчетов не выявило принципиальных отличий. В этой главе также четвертой главе разработана методика проведения сравнения результатов вычислений с проведенными экспериментами. Рассматривается также задача о струе плазмы в постоянном магнитном поле.

### **3. Основные результаты диссертации**

1. Оценки чисел Кнудсена показали, что для решения поставленной задачи наиболее адекватным является использование методов кинетической теории.

2. Построенная кинетическая модель значительно расширяет возможности моделирования течения плазмы из СПД и позволяет моделировать нестационарные эффекты в струе.

3. Для решения системы модельных уравнений разработан оригинальный метод расщепления процесса истечения струи плазмы на более простые одномерные физические процессы. В отличие от аналогичных моделей, в расчет введены частоты столкновения ионов и нейтралов при резонансной перезарядке в зависимости от относительных скоростей частиц.

4. Получено численное решение системы модельных кинетических интегродифференциальных уравнений относительно функций распределения ионов основного пучка и ионов перезарядки, а также нейтральных атомов.

5. Получены для определения влияния постоянного внешнего магнитного поля на истечение струи плазмы из СПД и проведены первичные расчеты с применением данной модели.

6. Разработанные модели верифицированы сравнением расчетных данных с экспериментально полученными. С применением созданного пакета прикладных программ получено наглядное отображение развития течения в пространстве и времени.

