

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Чернышёва Тимофея Владимировича

«Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 «Физика плазмы»

### **Современное состояние вопроса и актуальность темы**

Диссертационная работа Т.В. Чернышёва посвящена исследованию переходных процессов, колебаний и неустойчивостей в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Ускорители этого типа используются в составе электроракетных двигательных установок космических аппаратов, главным образом, для коррекции параметров орбиты.

По мере роста энерговооруженности современных космических аппаратов, увеличением срока их активного существования, а также в связи с возникновением новых типов задач, таких, как полёты к дальним объектам Солнечной системы или создание низкоорбитальных группировок лёгких спутников, требования к плазменным двигателям постоянно повышаются. Однако разработка новых двигателей затрудняется тем, что до настоящего времени не создано замкнутой физико-математической модели, которая позволила бы с необходимой для практического применения точностью рассчитывать параметры разряда в этих двигателях и их тягово-энергетические характеристики. Поэтому разработка двигателей ведётся, как правило, с использованием полуэмпирических численных моделей и доведением выходных характеристик до требуемого уровня методом проб и ошибок.

Одной из самых сложных проблем, с которой сталкиваются разработчики двигателей, является обеспечение устойчивости горения разряда. Неустойчивые режимы работы часто возникают при попытках оптимизации магнитного поля, изменении напряжения разряда и расхода рабочего тела, а также в ходе ресурсной отработки. Проблеме возникновения неустойчивости, а также исследованию переходных процессов, происходящих при зажигании разряда, посвящено сравнительно небольшое количество работ. Исследования в этом направлении важны как с точки зрения понимания физики разряда в скрещенных полях, так и с практической точки зрения. В частности, интерес представляет влияние переходных процессов на ресурс двигателя, а также оценка возможностей использования двигателя в импульсных режимах. Поэтому выбранная тема диссертационного исследования является актуальной, а её результаты будут востребованы при создании новых образцов электроракетных двигателей с замкнутым дрейфом электронов.

### **Основные результаты, их новизна, достоверность и практическая ценность**

Диссертация состоит из 4 глав и заключения. Каждая глава завершается перечнем полученных в ней результатов и промежуточных выводов.

Первая глава носит обзорный характер. Автор рассматривает основные физические процессы в плазменных двигателях с замкнутым дрейфом электронов, описывает аналитические модели слоя ионизации и ускорения, делает обзор типов колебаний и неустойчивостей, возникающих в разряде, анализирует имеющиеся данные о влиянии катода на характер разряда, выделяет проблему переходных процессов, сопровождающих зажигание разряда. Подборка проанализированных автором литературных источников достаточно полно отражает современное состояние проблемы.

Вторая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию переходных процессов, происходящих в момент зажигания разряда, и исследованию условий устойчивого поддержания разряда. Автор впервые провёл систематическое исследование динамики изменения параметров разряда после включения двигателя при различных предельных значениях тока эмиссии катода-компенсатора. Новой является выявленная автором закономерность, состоящая в том, что суммарное количество электронов, которое испускается катодом в течение времени установления стационарного состояния, не зависит от тока эмиссии катода и определяется количеством атомов, заполняющих газоразрядную камеру перед включением двигателя.

Полученные автором условия стационарного горения разряда в зависимости от приложенного напряжения, расхода рабочего тела и величины магнитного поля, могут оказаться полезными для практического применения при создании двигателей с анодным слоем. Кроме того, полученный систематизированный экспериментальный материал может быть использован для верификации различных расчётно-теоретических моделей разряда. Это же относится и к результатам измерений локальных параметров катодной плазмы.

Интересными являются результаты измерений переменной составляющей ЭДС, индуцируемой в катушках намагничивания холловским током, протекающим в разряде. Установленная корреляция между колебаниями ЭДС и ионизационными колебаниями тока разряда указывает на перспективность дальнейшего развития методики бесконтактного измерения величины и положения кольцевых токовых слоёв в плазме холловского двигателя.

Экспериментальные результаты, полученные в диссертации, не противоречат известным закономерностям протекания физических процессов в разряде холловского типа. Данные экспериментов проанализированы, сопоставлены между собой и подтверждены аналитическими оценками. Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

В третьей главе автор описывает разработанную им одномерную кинетическую модель плазмы разряда в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Одномерные модели довольно часто применяются для анализа основных закономерностей разряда холловского типа. Однако в этих моделях обычно не учитывается магнитное поле, индуцированное протекающим в разряде холловским током, так как при стационарном характере разряда это поле мало по сравнению с

внешним полем, создаваемым магнитной системой. Достоинством модели, разработанной в диссертации, является учёт эффекта размагничивания, который может играть заметную роль в переходных процессах при включении двигателя, при возникновении сильных ионизационных колебаний и при неустойчивых режимах работы.

В четвёртой главе описаны результаты численных экспериментов, проведённых при помощи разработанной автором численной модели. В расчётах получено несколько типов режимов горения разряда, отличающихся характером колебаний тока разряда и их интенсивностью. Автор приводит подробный качественный анализ полученных численных решений, который может быть полезен при поиске и формулировке количественных критериев условий устойчивости разряда.

### Замечания

- 1) При экспериментальном исследовании работы двигателя с регулируемой эмиссионной способностью катодов недостаточно подробно рассмотрены электрические цепи и характер протекающих в них токов. Например, электрический ток в катодной цепи интерпретируется как ток эмиссии электронов, хотя на катоды с развитой поверхностью может идти и ионный ток из катодной плазмы. Также не рассмотрен эффект вторичной ион-электронной эмиссии со стенок корпуса двигателя и вакуумной камеры. Известно, что в некоторых случаях этой эмиссии хватает для поддержания горения разряда, и после зажигания разряда двигатель способен работать при выключенном катоде;
- 2) В тексте диссертации содержится излишне много качественных рассуждений, и некоторые из них не совсем корректны. Например, на стр.48 утверждается: «...в больших магнитных полях электронные циклотронные радиусы много меньше характерных размеров канала, и движение электронов становится гидродинамическим», хотя известно, что гидродинамический характер течения определяется не относительной величиной ларморовского радиуса, а эффективным числом Кнудсена;
- 3) Имеются небрежности в описании уравнений численной модели. Так, кинетические уравнения (1.3) на стр. 64 записаны в виде суммы скалярных и векторных величин. В системах уравнений (3.2) и (3.3) одно и то же обозначение используется для напряжённости электрического поля и для поправки к скорости электрона;
- 4) Выбранный автором метод итераций для решения уравнения Пуассона в одномерной задаче не является оптимальным. Известны более эффективные способы решения, например метод прогонки;
- 5) Одним из наиболее важных экспериментальных результатов работы являются зависимости, определяющие границы существования так называемого «ускорительного» режима. К сожалению в диссертации не приведены результаты расчётов этих зависимостей при помощи разработанной одномерной модели.

Отмеченные недостатки не снижают практическую ценность работы и не влияют на обоснованность защищаемых положений.

### Заключение

В диссертации содержится решение задачи экспериментального и численного исследования переходных процессов и нестационарных режимов горения разряда в плазменных ускорителях с замкнутым дрейфом электронов, которая имеет важное значение в области разработки новых образцов электроракетных двигателей. Полученные автором результаты являются достаточно новыми, обоснованными и достоверными. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям ВАК, установленным п.9 Положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г., а её автор Чернышёв Т.В. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник отдела 120 (электрофизики)  
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
кандидат физико-математических наук



Шагайда Андрей Александрович

14 марта 2016 г.

Адрес: 125438, Москва,  
Онежская ул., д. 8  
Эл.почта: shagayda@kerc.msk .ru  
Телефон: +7(495)456-9693 доб. 126

Подпись А.А. Шагайды удостоверяю

Учёный секретарь ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»



Смирнов Юрий Леонидович