

ОТЗЫВ

официального оппонента Козлова Андрея Николаевича
на диссертационную работу Нечаева Ивана Леонидовича
«Исследование перспективных схем абляционного импульсного плазменного
двигателя с повышенными характеристиками», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

Диссертационная работа Нечаева И.Л. посвящена комплексным исследованиям абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД), являющихся уникальными в своем классе электрореактивными двигательными установками (ЭРДУ), предназначенными для использования на космических аппаратах, включая малые космические аппараты. Данные электрореактивные плазменные двигатели могут выполнять задачи поддержания и коррекции орбиты космических аппаратов в условиях постоянного аэродинамического торможения при взаимодействии с верхними слоями земной атмосферы, могут обеспечить выведение космических аппаратов на более высокие орбиты, а также могут быть использованы в качестве маршевых двигателей для межпланетных перелетов.

В настоящее время для космических целей используются различные электрореактивные плазменные двигатели. Достаточно широкое распространение в космонавтике получили отечественные стационарные плазменные двигатели и их различные зарубежные модификации, а также ионные двигатели, разработанные в США. В данных установках используется разреженная плазма. Ускорение немагнитной ионной компоненты обусловлено электрическим полем, а описание процессов проводится в рамках кинетических уравнений для функции распределения. Уникальность установки АИПД состоит, в частности, в том, что в ней используются более плотная плазма и перспективный механизм ускорения, основанный на силе Ампера, отвечающей векторному произведению тока в плазме и магнитного поля. Соответственно исследование плазмодинамических процессов в АИПД может быть проведено на основе системы уравнений магнитной газодинамики. В рассматриваемых установках АИПД плазма образуется из рабочего тела, как правило, фторопласта в результате абляции или испарения под воздействием кратковременного высоковольтного разряда. Электрический ток в системе токоподвода приводит к образованию магнитного поля, которое с учетом конструкции рельсотронного типа направлено преимущественно ортогонально току в плазме, протекающему между электродами установки. В результате ионизованная среда ускоряется до больших значений скорости, превышающих 15 км/с. В диссертации отмечено, что на самом деле в установке реализуется смешанный механизм ускорения, включая газодинамическое ускорение среды при ее расширении в пространстве. Поэтому установки АИПД имеют большой потенциал для развития, во многом реализованный в результате исследований,

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 28 / 11 2018

представленных в диссертации. Соответственно научные задачи, поставленные в диссертации, связаны с увеличением удельного импульса тяги и снижением суммарной массы двигателя, включая массу рабочего тела.

Актуальность представленной тематики связана с необходимостью разработок, направленных на совершенствование установок данного класса и повышение их конкурентоспособности в космических приложениях. При этом речь идет о целом ряде параметров, включая высокий удельный импульс двигателя, суммарный импульс тяги, тяговый КПД, массу установки и ее надежность при длительной эксплуатации в условиях ограниченного электропотребления. Автор диссертационной работы провел исследования модернизированных установок АИПД в соответствии с рядом требований, к которым относятся малая потребляемая мощность в пределах 300 Вт, тяга установки более 3 мН для одиночного разряда, удельный импульс более 15 км/с. Представленные исследования соответствуют Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642. Актуальная тема диссертации отвечает Стратегии НТР РФ в той ее части, в которой говорится об "освоении и использовании космического и воздушного пространства".

Новизна представленных исследований, научных положений диссертации, ее выводов и рекомендаций обусловлена, в первую очередь разработкой новых подходов и модернизаций экспериментальной установки АИПД. На основе этого был получен ряд новых уникальных результатов, разработан АИПД нового типа и даны рекомендации для разработки новых моделей двигателей. Хорошо известно, что отечественные ученые обладают непревзойденным даром новаторства. В данной диссертационной работе представлен целый ряд новаторских идей, включая повышение удельного импульса тяги АИПД при неизменной энергии разряда с помощью асимметричной схемы разряда, а также схему питания с «двойным обратным токоподводом». Наиболее впечатляющие успехи достигнуты в результате реализации идеи двухступенчатой системы ускорения.

Степень обоснованности научных положений определяется высоким уровнем экспериментальных исследований, представленных в диссертации Нечаева И.Л. Автор использовал апробированные методики для измерения интегральных и локальных параметров установки АИПД, адаптировав их для решения конкретных задач. Обоснованность результатов подтверждается их сравнением для различных модификаций установки АИПД, рассмотренных в диссертации, а также сравнением с результатами численных исследований, представленных в диссертации для отдельных задач. Кроме того, проводилось сопоставление с данными, опубликованными в работах других авторов.

Достоверность результатов исследования, научных положений и выводов диссертации подтверждается рядом факторов. Во-первых, экспериментальные исследования были проведены на сертифицированном оборудовании, и автор провел большую работу, которая обеспечила корректность методик измерения различных экспериментальных параметров. Оценке погрешностей и достоверности экспериментальных результатов

посвящен отдельный параграф 3.2 в диссертации. Автор обеспечил детальный учет приборных и физических погрешностей, которые могут быть внесены в процессы измерения параметров установки. Кроме того, продемонстрировано удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с результатами численного моделирования, а также с данными других экспериментов.

Диссертация хорошо структурирована и иллюстрирована, написана на 166 страницах понятным языком. Она состоит из введения, четырех глав и заключения. Список литературы содержит 69 позиций. Далее необходимо кратко изложить содержание диссертации и отметить основные результаты.

Введение в основном повторяет стандартные разделы автореферата, в частности, обсуждается актуальность выбранной темы, формулируются цели исследования и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней представлены сведения о состоянии современных исследований и применении АИПД в космических аппаратах, рассмотрены принцип и особенности работы установки. Проводится сравнение АИПД с другими типами российских и зарубежных электрореактивных двигателей, а также определены параметры оптимизации установки. Показано, что характеристики установки АИПД отвечают конкурентоспособности данного типа двигателей по сравнению с другими ЭРДУ в условиях ограниченной мощности бортовой энергетики.

Вторая глава посвящена анализу возможных способов модернизации установки, направленных на снижение ее массы за счет применения новых высокотехнологичных материалов и новых типов конденсаторов с повышенным значением удельной энергоемкости, а также благодаря различным модификациям АИПД, обеспечивающим повышенные значения удельного импульса тяги. Приведена структура массы АИПД на примере конкретных конструкций и дана оценка возможности улучшения массогабаритных характеристик. Обоснованы способы повышения удельного импульса тяги АИПД, детально рассмотренные в последующих главах.

В третьей главе рассмотрены характеристики АИПД с асимметричным разрядом, когда вместо двух симметрично расположенных частей рабочего тела, называемых шашками, используется только одна часть. Дано описание лабораторного стенда и экспериментального оборудования. Проведена оценка погрешности экспериментальных результатов. Много внимания в данной главе уделено методике определения отклонения потока плазмы от продольной плоскости канала в асимметричном разряде. Указаны способы минимизации потерь по скорости и расходу рабочего тела. Приведены тяговые и расходные характеристики для модели с асимметричным разрядом и для базового варианта двигателя. Кроме того, представлены фотоснимки, иллюстрирующие процесс разряда. В результате проведенных исследований сделан вывод о том, что использование асимметричного разряда позволяет повысить удельный импульс тяги в среднем на 15% по сравнению с классической схемой. По сути, речь идет об уникальном случае, когда отказ от симметрии приводит к лучшим результатам.

Четвертая глава является наиболее объемной по содержанию. В ней представлены результаты исследования АИПД с «двойным обратным токоподводом». Здесь также рассмотрены наиболее перспективные модификации установки для реализации двухступенчатого процесса ускорения плазмы. Проведена диагностика с использованием магнитных зондов для измерения магнитного поля в моделях с различными схемами токоподвода. Эксперименты подтвердили выводы теоретических исследований, которые показали возможность увеличения электромагнитной составляющей ускорения плазмы в модели с двойным обратным токоподводом. В этом случае были получены более высокие тяговые характеристики при тех же параметрах конденсаторной батареи, отвечающих стандартному варианту токоподвода. Уникальные результаты получены для двухступенчатых систем. Установлено, что использование двухступенчатой схемы ускорения плазмы позволяет примерно в два раза увеличить удельный импульс тяги по сравнению с одноступенчатой схемой ускорения в установке АИПД с той же энергией разряда. Полагаю, что данный результат является наиболее существенным в диссертационной работе Нечаева И.Л.

Таким образом, представлены новаторские идеи, реализованные в различных модификациях АИПД, выявлены особенности процессов, получен ряд уникальных результатов, а также даны рекомендации, которые могут быть использованы при разработке новых двигателей на профильных предприятиях космической отрасли.

Замечания по диссертационной работе

1. На стр. 25 и 26 используются системы уравнений (1.1)-(1.4) и (1.5)-(1.6), которые являются следствием простой «модели Арцимовича». Следует заметить, что плазмодинамические процессы в АИПД могут быть исследованы в рамках системы МГД уравнений, дополненных уравнением электрической цепи. На стр. 89 повторно представлена система уравнений (4.8)-(4.11), отвечающая «модели Арцимовича». Данные уравнения идентичны уравнениям (1.5)-(1.6).
2. На стр. 47 представлены графики зависимости полной массы АИПД от энергии разряда. Полная масса с учетом массы рабочего вещества вычисляется с помощью формулы (2.7), из которой напрямую не следует, что зависимости могут быть немонотонными. Каких либо пояснений относительно данного факта не представлено. В то же время, особенности в поведении кривых и наличие локального минимума используются для вывода соотношения (2.8).
3. В конце стр. 76 для 8-го кадра фотоснимков разряда, представленных на рис. 40, делается вывод о том, что «потoki плазмы ... имеют меньшую скорость истечения, нежели основной поток». Такой вывод невозможно сделать на основе представленных фотографий.
4. На рисунке 60 (стр. 102) неправильно изображено положение магнитного зонда для измерения магнитного поля в межэлектродном промежутке.

5. На стр. 108-125 представлены три серии рисунков 66-98 для трех различных модификаций АИПД. На рисунках, в основном однотипных, изображены диаграммы изменения магнитной индукции по длине канала для различных моментов времени. Однако далее три серии объединены в одну и еще раз рассмотрены на рисунках 100-112 уже совместно для «безразмерного времени». Возникает вопрос. Какой был смысл представления рисунков 66-98 на 17 страницах? Кроме того, среди рисунков 100-112 на стр. 128-140 также много однотипных.

Данные замечания, в основном редакционного плана, не снижают научную и практическую ценность диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой и содержит новые результаты, представляющие научный и прикладной интерес.

Работа соответствует специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты работы полностью опубликованы в печати, включая 3 статьи из перечня рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК, а также два патента на изобретение.

Диссертационная работа удовлетворяет критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, Нечаев Иван Леонидович, заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент
главный научный сотрудник
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»,
доктор физико-математических наук

125047, Москва, Миусская пл., д. 4, тел. 8-499-220-78-88
E-mail: ankoz@keldysh.ru

Козлов Андрей Николаевич

Подпись Козлова Андрея Николаевича заверяю

Ученый секретарь Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



Маслов А.И.

27.11.2018