

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.14

Соискатель: Абгарян Микаэл Вартанович

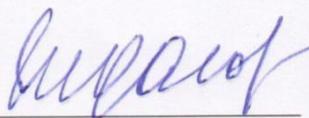
Тема диссертации: Численное моделирование струи разреженной плазмы, исходящей из электрореактивного двигателя.

Специальность: 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Решение диссертационного совета по результатам защиты: На заседании 26 июня 2019 года, протокол № 4, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Абгаряну Микаэлу Вартановичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Бардин Б.С., Бишаев А.М., Буров А.А., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников В.А., Котельников М.В., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Формалев В.Ф., Ципенко А.В., Шамолин М.В..

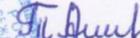
Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент



В.Ю. Гидаспов

И.о. начальника отдела УДС МАИ

Т.А. Аникина



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26 июня 2019 г. № 4.

О присуждении Абгаряну Микаэлу Варгановичу, гражданину РФ,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование струи разреженной плазмы,
исходящей из электрореактивного двигателя» по специальности 01.02.05 –
«Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите «23» апреля 2019 года,
протокол № 2, диссертационным советом Д 212.125.14 на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ,
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы
Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета № 714/нк от
02.11.2012.

Соискатель Абгарян Микаэл Варганович 1988 года рождения, окончил
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Московский государственный горный университет» в 2011 году,
была присуждена степень магистра техники и технологии по направлению
«Информатика и вычислительная техника».

В период с 2014-го по 2018 г являлся аспирантом Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО «МАИ
(НИУ)»).

С 2012 г по настоящее время работает в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики при Московском авиационном институте (НИИ ПМЭ МАИ) в должности инженера.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики при Московском авиационном институте (НИИ ПМЭ МАИ) в отделе №11 «Стационарные плазменные двигатели». Научный руководитель – профессор кафедры «Высшая математика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Бишаев Александр Михайлович.

Официальные оппоненты:

1. Кузнецов Михаил Михайлович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая физика» Государственного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Московский государственный областной университет».

2. Богданов Андрей Николаевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник 112 лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем НИИ механики МГУ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.

Ломоносова» (МГУ им М.В. Ломоносова.)

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП «ЦНИИМаш»), в своем положительном

заклучении, подписанном доцентом, доктором физико-математических наук, начальником отдела 1403, А.В. Карелиным, кандидатом физикоматематических наук, заместителем начальника отдела 1205, М.Ю. Куршаковым, и утвержденном доктором технических наук, профессором, генеральным конструктором по автоматическим космическим системам и комплексам, В.В. Хартовым, указала, что диссертация представляет собой высококвалифицированную научную работу в области исследования струи разреженной плазмы. Тематика диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация удовлетворяет всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней» и заслуживает положительной оценки, а её автор, Абгарян Микаэл Варганович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

На диссертацию поступили отзывы:

Отзыв на диссертацию ведущей организации.

Замечания по диссертации:

1. Небрежность оформления работы (пропуски слов, несогласования родов и падежей, написание формул шрифтом разного размера, присутствие двух рисунков с одинаковым номером 4.20.)
2. В ряде случаев автор вводит буквенные обозначения, не раскрывая их значения.
3. Утверждается, что результаты, полученные по кинетической модели с частотами столкновений частиц, зависящими от скоростей ионов и нейтралов, практически совпали с результатами, полученными с помощью модели с частотами, не зависящими от этих скоростей, но никаких сравнений, подтверждающих это, не приведено;

4. Отсутствуют сравнения с зарубежными работами по созданию и использованию трехмерным моделей плазменных струй (например, Y.Lu et al. Physics of Plasmas, 26, 022902 (2019) <http://doi.org/10.1063/1.5050924>.)

Отзыв на диссертацию официального оппонента, д.ф.-м.н., доцента Кузнецова Михаила Михайловича.

Замечания по диссертации:

1. В диссертации дано обоснование применения кинетической теории для анализа струйного течения, но недостаточно внимания уделено анализу альтернативных методов
2. Модель существенно использует гипотезу «термализованного потенциала». Желательно было бы дать обоснование использования этой гипотезы.
3. Число расчетов по модели с частотами, зависящими от скорости ионов и нейтралов целесообразнее было бы увеличить.
4. Численную схему, выбранную в диссертации, следовало бы сопроводить расчетами, иллюстрирующими точность используемой в диссертации схемы.
5. Имеются погрешности в оформлении рисунков.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Богданова Андрея Николаевича.

Замечания по диссертации:

1. В диссертации проводится обоснование применения кинетической теории для анализа струйного течения, но мало внимания уделено анализу альтернативных методов.

2. Модель существенно использует гипотезу «термализованного потенциала», обоснование которой в диссертации отсутствует.
3. Мало расчетов проведено по модели с частотами, зависящими от скорости ионов и нейтралов.
4. Не проведены расчеты, иллюстрирующие точность используемой в диссертации схемы.
5. Излишне включение в диссертацию задачи о влиянии магнитного поля на струю.

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва.

1. **Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Физическая электроника» физического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), Кралькина Е.А.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. При описании полученных результатов в главе 2 указывается, что согласие между экспериментальными и расчетными значениями угловой плотности ионного тока в струе достигается при значениях температуры ионов 25 эВ. Температура является мерой хаотического движения частиц. Непонятен механизм нагрева ионов до такой достаточно высокой температуры. Казалось бы, более правильным явилось бы предположение о наличии направленной скорости ионов на выходе из газоразрядной камеры СПД.
2. При описании результатов расчетов отсутствует описание конкретных внешних параметров, при которых проводились расчеты. В связи с этим непонятно, чем вызвано появление сгустков ионов в струе: изменением во времени граничного распределения плотности ионов или

самоорганизацией движения ионов при постоянном во времени граничным распределении.

3. При описании результатов в главе 4 отсутствуют данные о влиянии постоянного внешнего магнитного поля на параметры струи. Вместе с тем, в заключении указано, что построена модель и выполнены первичные расчеты, проясняющие влияние магнитного поля.

2. **Заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ» по научной работе, доктор технических наук, профессор В.Я. Геча, главный конструктор КА, кандидат технических наук, А.В.Хромов.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. На с. 8 автореферата (глава 1) при описании принципиальной схемы СПД-100 как источника плазменной струи, не выделены существенные для дальнейшей математической постановки задачи параметры самого СПД или ионного потока в струе. Поэтому из автореферата не вполне ясно, при каких ограничениях на диапазон расхода рабочего тела, значение напряженности электрического поля и др. параметры решаются уравнения (1) для распределения ионов и нейтралов, или же такие ограничения отсутствуют и полученные в работе результаты применимы ко всем типам СПД и режимам их работы.

3. **Главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный Исследовательский Центр «Информатика и управление Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор Зубов В.И.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Информативная часть на Рисунке 3 занимает крайне малую часть рисунка. В описании рисунка, приведенном на стр. 17, неточно указаны соответствующие цвета, что вводит читателя в заблуждение.

2. На Рисунке 4 следовало бы оставить только поле вторичных ионных потоков и сделать его крупнее, ведь именно рассчитанное распределение вторичного потока являлось основной целью выполненного исследования
 3. На Рисунках 7 и 8 численные значения линий уровня плотностей ионного тока трудно различить. Можно было сделать линии уровня более «разреженными», либо оставить только их цветовую дифференциацию, добавив при этом цветовую шкалу.
4. **Начальник отдела 300 ФГУП «ОКБ «Факел», кандидат технических наук, Приданников С.Ю., старший научный сотрудник отдела 300, Гниздор Р.Ю.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. На стр. 11 в последнем абзаце упоминается, что расчеты проводились по двум вариантам расчетной модели, а именно с учетом зависимости частот столкновений от относительных скоростей ионов и атомов, так и при независимости частот от относительных скоростей. Однако результат приведенного сравнения результатов расчетов по обоим вариантам отсутствует, и не сделан четкий вывод из проведенного сравнения о применимости того или иного варианта расчета.
2. В формулах (3), (4) и (5) ряд использованных величин не описан. В тех же формулах следовало бы упомянуть, что обозначения u , по видимому, относятся к средним скоростям ионов и нейтральных атомов в потоке на срезе сопла двигателя.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая физика» Государственного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Московский государственный областной университет». Кузнецов Михаил Михайлович – автор более 58 работ. Область научных интересов: кинетические уравнения, неравновесные процессы, ударные волны, молекулярная кинетика.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник 112 лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем НИИ механики МГУ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова) – автор более 21 работы. Область научных интересов: математическое моделирование, асимптотические методы, пограничные слои, горение и детонация горючих газовых смесей, трансзвуковые течения.

Выбор ведущей организации – ФГУП «ЦНИИМаш – обусловлен ее положением как головного предприятия космической отрасли, проводящих исследования, эксперименты, разработку и производство новейших космических аппаратов. Данная организация является одним из ведущих ракетно-космических предприятий России и также осуществляет военнотехническое сотрудничество с зарубежными партнерами.

Соискатель имеет 9 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них 3 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, входящих в список,

рекомендуемый ВАК, а также индексируемые в международных реферативных базах данных, а именно: Scopus, Web of Science и др., в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Работы опубликованы в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим, а опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. В опубликованных работах излагаются основные положения диссертационной работы: система модельных кинетических уравнений, описывающих резонансную перезарядку ионов в плазменной струе стационарного плазменного двигателя (СПД), математическая постановка задачи о струе плазмы в нестационарном трехмерном представлении с оригинальными граничными и начальными условиями, численный метод расщепления по физическим процессам, использованный для решения построенной системы модельных кинетических уравнений в широком диапазоне изменения входных параметров, модифицированная физикоматематическая модель струи для определения влияния зависимостей частот столкновения ионов и нейтралов от их скоростей, расчетная модель для определения влияния управляющего внешнего магнитного поля на характеристики течения плазменной струи, результаты численных расчетов, позволивших определить влияние геометрических параметров выходного сопла на характер течения струи СПД, результаты расчетов динамики концентрации ионов основного потока плазмы и обратных потоков ионов перезарядки.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Абгарян М.В., Бишаев А.М., Иванова Е.П., Ким В., Меркурьев Д.В., Фоменков А.И., Wartelsk M., Theroude Ch. Нестационарная модель струи разреженной плазмы, истекающей из стационарного плазменного двигателя // Журнал «Физика плазмы» 2018. Т. 44. №2.

C. 278-288. DOI: 10.7868/S0367292118020014

2. Абгарян М. В., Бишаев А. М. Модернизация метода расщепления для решения системы кинетических уравнений, описывающих поведение струи разреженной плазмы // Журнал вычислительной математики и математической физики 2018. Т. 58. №7. С. 1134-1148. DOI: 10.31857/S004446690000331-5
3. Абгарян М. В., Бишаев А. М., Рыков В. А. H-теорема и уравнение состояния для кинетической модели неидеального газа // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2018. №1. С. 73–81. DOI: 10.18384/2310-72512018-1-73-81.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Путем оценки чисел Кнудсена **показано**, что для решения поставленной задачи наиболее адекватным является использование методов кинетической теории.
- **Разработана** кинетическая модель, значительно расширяющая возможности моделирования течения плазмы из СПД и позволяющая моделировать нестационарные эффекты в струе.
- **Разработан** оригинальный метод расщепления процесса истечения струи плазмы на более простые одномерные физические процессы для решения системы модельных уравнений, что позволило решить составленную систему применительно к данной задаче. В отличие от аналогичных моделей, в расчет введены частоты столкновения ионов и нейтралов при резонансной перезарядке в зависимости от относительных скоростей частиц.

- **Получено** численное решение системы модельных кинетических интегро-дифференциальных уравнений относительно функций распределения ионов основного пучка и ионов перезарядки, а также нейтральных атомов.
- **Разработана** модель для определения влияния постоянного внешнего магнитного поля на истечение струи плазмы из СПД и проведены первичные расчеты с применением данной модели.
- **Верифицированы** разработанные модели посредством сравнения расчетных данных с экспериментально полученными. С применением созданного пакета прикладных программ получено наглядное отображение развития течения струи плазмы из СПД в пространстве и времени.
- Детально **исследовано** течение плазменной струи в нестационарной трехмерной постановке задачи, что позволило рассчитывать распределения ионов и нейтралов в струе как на квазистационарном режиме работы двигателя, так и на переходных режимах работы, включая режимы включения и выключения двигателей.

Практическая ценность результатов обусловлена тем, что предлагаемая работа на данный момент представляет собой наиболее полное исследование струи плазмы, истекающей из СПД. Разработанная трехмерная нестационарная модель позволяет динамически отображать течение плазменной струи по мере её развития и исследовать влияние внешних воздействий на параметры струи. В первую очередь, это относится к актуальному вопросу о возможности изменении вектора тяги СПД с помощью внешнего управляющего магнитного поля.

Наличие адекватной расчетной модели струи СПД дает возможность сформулировать рекомендации по расположению СПД на космическом аппарате.

На основе предлагаемой модели построен программный пакет, с помощью которого выполнены расчеты основных интегральных технических характеристик СПД, таких как тяга и ионный ток. Созданный пакет прикладных программ представляет собой мощный инструмент для моделирования, расчета и визуализации течения плазменной струи СПД.

Достоверность результатов исследования, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается непротиворечивостью построенной модели известным уравнениям и методам их решения в кинетической теории газов. Результаты численных расчетов параметров струи, полученные с помощью разработанной расчетной модели, сравнивались с экспериментально полученными данными. Отличие расчетных значений параметров плазменной струи, полученных при численном моделировании, от измеренных в экспериментах составило не более 5%.

Личный вклад. Соискателем была проведена модернизация существующей стационарной модели в трехмерной постановке задачи и разработана физико-математическая модель для решения задачи в более общей трехмерной нестационарной постановке. Автор настоящей работы осуществил разработку, отладку, тестирование и последующую

модернизацию программного продукта, позволяющего осуществить численное моделирование струи плазмы, исходящей из СПД, а также визуализировать полученные результаты.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», так как является самостоятельно выполненной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи численного моделирования истечения струи разреженной плазмы из стационарного плазменного двигателя.

На заседании «26» июня 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Абгаряну Микаэлу Вартановичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 13, против 0, недействительных бюллетеней 2.

Председатель диссертационного совета
Д 212.125.14, д.ф.-м.н., профессор

П.С. Красильников

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент

В.Ю. Гидаспов

26 июня 2019 г.

И.о.начальника отдела УДС МАИ
Т.А. Аникина

