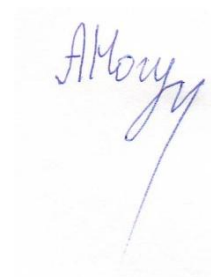


На правах рукописи



**МОГУЛКИН АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ**

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
**Обухов Владимир Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Марахтанов Михаил Константинович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана», заведующий кафедрой Э-8 «Плазменные энергетические установки»

**Павлов Владимир Борисович**  
кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», старший научный сотрудник кафедры физической электроники

Ведущая организация: Акционерное общество «Красная Звезда»

Защита состоится «14» декабря 2015 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)»,

[https://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=61351](https://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=61351)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.08

доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

На современном этапе развития электроракетных двигателей (ЭРД) одними из перспективных и наиболее эффективных в освоении космического пространства являются ионные двигатели (ИД) (управление ориентацией и положением на орбите, маршевые операции). ИД за рубежом успешно эксплуатируются в космической технике, и область их применения расширяется. В Российской Федерации также начата разработка двигателей этого класса. Применение ИД вследствие их высокого удельного импульса тяги и ресурса дает значительный эффект по экономии массы рабочего тела как при решении маршевых задач, так и при использовании в системах коррекции орбиты космических аппаратов (КА). Это справедливо как для малых КА, эксплуатируемых на околоземных орбитах, так и для геостационарных КА и автоматических межпланетных КА. С развитием космической ядерной энергетики роль ИД будет возрастать [1, 3, 6, 12].

В соответствии с общемировой тенденцией развития космической техники в проекте Федеральной космической программы до 2025 г. планируется разработка и производство ИД различной мощности: малой (до 1 кВт), средней (2-6) кВт и большой (свыше 10 кВт). В указанном диапазоне по мощности двигателя диаметр рабочей перфорированной части электродов ионно-оптической системы (ИОС), которая формирует ионный пучок, имеет величину от менее 100 мм до более 500 мм.

Узел ИОС ИД является наиболее ответственным и сложным в конструктивном и технологическом отношении. Более 95% подведенной к двигателю мощности реализуется в ИОС. Для надежной работы узла ИОС необходимо обеспечить стабильность зазора между эмиссионным электродом (ЭЭ) и ускоряющим электродом (УЭ) на рабочих режимах в жестких допусках. Особенность работы электродов в составе ИОС связана с существенно неравномерным нагревом и деформированием электродов, что может вызвать снижение характеристик двигателя (плотности ионного тока и тяги) и высоковольтный пробой. Необходимо принять во внимание, что электроды имеют разную толщину, могут быть выполнены из разного материала, а их нагрев может характеризоваться различными температурными профилями [2, 8, 9]. Одним из зарекомендовавших себя технических решений обеспечения стабильности работы узла ИОС является применение профилированных электродов с начальным прогибом (высота сегмента сферы электрода, заданная на чертеже). Неравномерный нагрев приводит к возникновению дополнительных прогибов электродов (подъем

сферического сегмента электрода). В связи с указанными проблемами важно на этапе конструирования уметь рассчитывать начальную форму электродов и их деформации при нагревании до рабочих температур, при которых обеспечивается стабильная работа ИОС. Все названное подчеркивает важность разработки механико-математической модели электродов ИОС и проведение численного моделирования на основе разработанных методов расчета деформированного состояния электродов в условиях реального теплового нагружения. Все сказанное определяет актуальность темы диссертации.

**Актуальность представляемой работы обусловлена:**

1. Необходимостью обеспечения стабильности характеристик ИД при неравномерном нагреве электродов.

2. Необходимостью выработки рекомендаций для проектирования электродов ИОС и узлов ИОС перспективных двигателей и реализации их в практических конструкциях ИД.

**Объект исследования**

Объектом исследования являются термомеханические процессы, вызывающие деформации электродов ИОС ИД при тепловом нагружении, температурные поля и деформации электродов узлов ИОС ИД при рабочих температурных нагрузках.

**Предмет исследования**

Предметом исследования является численное моделирование упругих деформаций профилированных электродов ИОС в условиях, приближенных к условиям их эксплуатации в составе ИД.

**Целью работы** является разработка механико-математической модели деформирования профилированных электродов ИОС перспективных ИД при их тепловом нагружении в сочетании с прогнозированием деформированного состояния на основе численного моделирования узлов ИОС ИД различной размерности.

**Основные задачи диссертации:**

В соответствии с целью работы ставятся и решаются следующие задачи:

1. Определение требований к узлам ИОС перспективных ИД различной размерности.

2. Разработка математической модели процесса деформирования профилированных электродов ИОС при тепловом нагружении, характерном для их работы в составе ИД.

3. Разработка методики и алгоритма расчетного обоснования процесса деформирования электродов ИОС на основе использования аппарата матричных краевых интегральных уравнений, адаптированных на проектирование различных вариантов электродов ИОС ИД.

4. Проведение расчетно-теоретических исследований деформирования профилированных электродов для различных перепадов температур по радиусу с оценкой влияния изменения величины дополнительного прогиба на плотность извлекаемого ионного тока.

5. Проведение верификации механико-математической модели ИОС, а также методики и алгоритма расчета с использованием экспериментальных данных и программно-вычислительного комплекса ANSYS.

6. Разработка рекомендаций для конструирования электродов и узла ИОС ИД для ряда перспективных ИД, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ, ФГУП ОКБ «Факел» и КБ «Химв Автоматики».

7. Разработка конструкции узлов ИОС с электродами разных типоразмеров, обеспечивающих выполнение требований к ним с учетом теплового нагружения при работе в составе ИД.

### **Методы исследования**

Метод исследования - расчетно-теоретический, включающий анализ деформаций электродов ИОС с учетом различных факторов воздействия на основе теории тонкостенных упругих оболочек при допущении о возможности использования гипотезы жесткой нормали в соответствии с гипотезами Кирхгофа-Лява.

Сравнительный анализ расчетных данных по разработанной методике с результатами расчетов, полученных с использованием программно-вычислительного комплекса численного моделирования ANSYS и с известными из литературы экспериментальными данными.

### **Научная новизна**

1. Разработана механико-математическая модель деформирования профилированных электродов ИОС при тепловом нагружении, на базе которой предложена методика определения деформаций профилированных электродов различной размерности при учете заданного начального прогиба для широкого круга перспективных материалов.

2. Предложен упрощенный алгоритм расчета безразмерного дополнительного прогиба электродов ИОС, основанный на итерационном процессе решения

интегральных уравнений в аналитическом виде, позволяющий производить расчеты, обеспечивающие оценку необходимого начального и дополнительного прогибов в центре электродов при разработке конструкции узлов ИОС ИД различной размерности, представленных в виде густо перфорированных сегментов сферы.

3. Получены данные по зависимости деформации электродов ИОС ИД, имеющих рабочую часть в виде сегментов сферы, от исходной формы (начального прогиба) при характерном распределении температуры и свойств материала электродов.

### **Практическая значимость результатов работы**

1. Разработана механико-математическая модель и методика расчета деформаций профилированных густо перфорированных электродов ИОС ИД, позволяющая рассчитать дополнительный прогиб электродов при их тепловом нагружении и определить начальный прогиб, при котором дополнительный прогиб находится в заданных пределах.

2. Проведено моделирование деформированного состояния ряда разработанных и разрабатываемых в настоящее время узлов ИОС ИД на основе разработанных рекомендаций.

3. По результатам выработанных решений разработан ряд моделей высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) разного типоразмера, предназначенных для решения транспортных задач в околоземном и дальнем космосе.

4. Разработана конструкторская документация на узлы ИОС ВЧИД разной мощности.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается корректным использованием математического аппарата интегральных и интегро-дифференциальных уравнений, обоснованным выбором граничных условий задачи, совпадением полученных результатов с данными численного моделирования по программно-вычислительному комплексу ANSYS, а также с экспериментальными данными.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ (НИР) «Исследования и разработка космических высокоимпульсных высокочастотных плазмодинамических электроракетных ионных двигателей», «Исследование характеристик и оптимизация конструкции модели ХД для работы на режиме с мощностью до 4 – 5 кВт и удельным импульсом тяги не менее 4000 с.

Разработка и исследование характеристик ВЧИД большой мощности, оптимизация конструкции основных узлов и системы электропитания ВЧ разряда», опытно-конструкторской работы (ОКР) «Разработка материалов технического предложения по обоснованию выбора электроплазменного двигателя с базовой мощностью 50...70 кВт», НИОКР «Проведение расчетов конструктивных и эксплуатационных параметров ВЧИД и его элементов. Разработка рабочей конструкторской документации ВЧИД малой мощности». На основании полученных результатов и разработанных рекомендаций разработаны и изготовлены модели ВЧИД различной размерности. Работа по испытаниям и доводке двигателей в настоящее время продолжается.

### **Апробация результатов**

Результаты исследований, изложенные в диссертации, представлены в 7 отчетах, 2 патентах, посвященных технологии изготовления электродов и узла ИОС ИД. Основные результаты работы обсуждались на семинарах НИИ прикладной механики и электродинамики «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», а так же докладывались на российских и международных конференциях: «12-ой и 13-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва 2013, 2014) [7, 10]; «5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsion – New Challenges» (Дрезден 2014) [11, 14]; «International 34th Electric Propulsion Conference» (Япония 2015) [13].

### **Личный вклад соискателя**

С личным участием автора проведена работа:

1. Сформулированы технические требования к узлу ИОС ИД и технологии изготовления электродов узла ИОС разрабатываемых ВЧИД.
2. Предложена механико-математическая модель для профилированных густо перфорированных электродов ИОС перспективных ИД, позволяющая рассчитать дополнительный прогиб электродов при тепловом нагружении и определить начальный прогиб, при котором дополнительный прогиб находится в заданных пределах.
3. Разработана методика определения дополнительного прогиба профилированных электродов ИОС ИД в зависимости от величины начального прогиба, свойств материалов и характера теплового нагружения.
4. Проведен анализ расчетно-теоретического исследования процесса теплового деформирования профилированных электродов ИОС ВЧИД различной размерности по

разработанному алгоритму итерационного процесса решения интегральных уравнений в аналитическом виде.

5. Проведены дополнительные исследования с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS по влиянию вида закрепления электродов на их устойчивость при тепловом нагружении.

6. Проведен расчет вариантов электродов, соответствующих известным из литературы экспериментальным исследованиям, и проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, подтвердившее их хорошее согласование (более 90%).

7. Разработаны рекомендации для проектирования узлов ИОС перспективных ИД.

8. На основе проведенного расчетного исследования определены допустимые значения дополнительного прогиба, разработаны конструкции узлов ИОС с профилированными электродами в виде сферических сегментов для ВЧИД различной размерности: с диаметром рабочей части электродов 80, 160, 450, 500 и 600 мм. Экспериментальные исследования показали работоспособность разработанных двигателей ВЧИД-8 и ВЧИД-16 без высоковольтных пробоев в межэлектродном зазоре. Проведено экспериментальное исследование рабочих режимов ВЧИД-16 с определением температурных полей электродов.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертационная работа изложена на 161 машинописных страницах, содержит 109 рисунков, 6 таблиц, список литературы включает в себя 113 наименований.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Механико-математическая модель деформирования профилированных электродов, описывающая термоустойчивость и нелинейный изгиб электродов ИОС, неравномерно нагретых по радиусу и толщине и имеющих начальные прогибы или несовершенство формы, основанная на теории конструктивно-ортотропных кольцевых пластин и непрерывности модели электродов, позволяющая рассчитать начальный и дополнительный прогиб электродов ИД.

2. Сравнительный анализ результатов численного моделирования, проведенного по разработанной методике и алгоритму, рассматриваемому в качестве первого приближения итерационного процесса решения интегральных уравнений в аналитическом виде, с результатами, полученными с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS и экспериментальными данными.



3. Рекомендации для конструирования профилированных электродов, электродов с начальными несовершенствами формы и узлов ИОС ИД, с определенными начальными прогибами или несовершенствами формы для профилированных электродов в виде сферических сегментов, с анализом влияния граничных условий и узлов ИОС ИД.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** посвящено обоснованию диссертационного исследования, краткому описанию проблемы устойчивой работы электродов в составе узла ИОС при существенно повышенных требованиях к перспективным ИД. Сформулированы актуальность темы исследования, объект и предмет исследования, цели, основные задачи, методы исследования, описана научная новизна, практическая значимость, реализация, внедрение, апробация и достоверность результатов работы, кратко рассмотрено содержание глав диссертации.

**В первой главе диссертации** представлен мировой опыт создания ИД с различными механизмами получения плазмы и сравнительно высокими удельными импульсами тяги, что делает ИД важным претендентом на применение в космических транспортных системах уже в настоящее время. Однако существуют проблемы разработки одного из критических элементов конструкции ИД, каким является ИОС. Одной из проблем разработки ИОС является преодоление в реальных конструкциях последствий деформаций электродов ИОС при тепловом неравномерном нагружении.

Рассмотрены физические процессы в ИОС и определен диапазон изменения основных геометрических параметров электродов для ИД различной размерности.

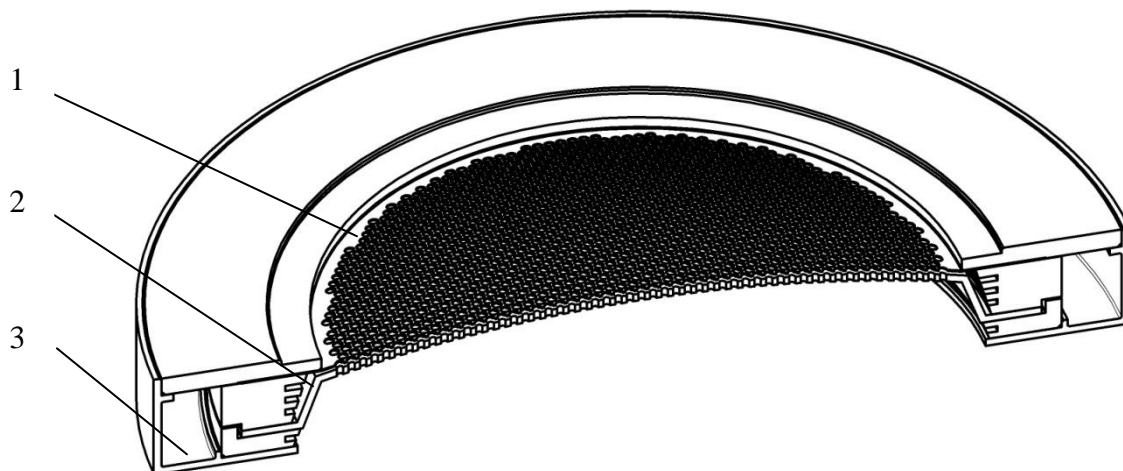
Обоснована в качестве основного технического решения в соответствии с мировой практикой форма электродов в виде сегментов сферы, расчетно-теоретическое исследование деформации которых является основным предметом исследования в диссертации.

На основе проведенного обзора работ по ИД обоснована актуальность исследования термомеханических процессов в ИОС ИД.

**Во второй главе** рассматривается аналитический обзор литературы по температурному деформированию густо перфорированных круглых и пологих сферических оболочек как профилированных электродов ИОС. Дан анализ деформирования электродов ИОС с использованием основных дифференциальных

уравнений теории тонкостенных оболочек, рассматривается решение осесимметричной задачи.

Схематично конструкция ИОС изображена на рисунке 1. Отверстия в электродах ИОС соосны, но диаметр их в ЭЭ существенно превышает диаметр отверстий в УЭ.



1 – эмиссионный электрод; 2 – ускоряющий электрод; 3 – замедляющий электрод

**Рисунок 1.** Конструкция узла ИОС

Так как электроды ИОС имеют сквозные отверстия, то коэффициенты заполнения элемента электрода материалом в радиальном и окружном направлениях  $k_r$  и  $k_\varphi$  полагаем постоянными по толщине. Тогда уравнения термоупругости для конструктивно-ортотропной модельной пластины круговой формы или сферического сегмента, которые изготовлены из изотропного материала, принимают следующий вид:

$$\varepsilon_{rz}(r, z) = \frac{1}{E(r)} \cdot [\sigma_r(r, z) - \mu \cdot k_\varphi(r) \cdot \sigma_\varphi(r, z)] + \alpha(r) \cdot T(r, z); \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\varphi z}(r, z) = \frac{1}{E(r)} \cdot [\sigma_\varphi(r, z) - \mu \cdot k_r(r) \cdot \sigma_r(r, z)] + \alpha(r) \cdot T(r, z), \quad (2)$$

где,

$\varepsilon_{rz}(r, z)$  и  $\varepsilon_{\varphi z}(r, z)$  – относительные деформации в радиальном и окружном направлениях для точек пластины, расположенных на расстоянии  $z$  от срединной поверхности;

$\sigma_r(r, z)$  и  $\sigma_\varphi(r, z)$  – нормальные напряжения в пластине, действующие по граням элементарного слоя, заполненного материалом, МПа;

$E(r)$  – модуль упругости материала электрода, МПа;

$\alpha(r)$  – коэффициент теплового линейного расширения материала электрода,  $1/^\circ C$ ;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$T(r, z)$  – изменение температуры электрода при нагреве по отношению к температуре его сборки в составе ИОС,  $^\circ C$ .

Для удобства дальнейших преобразований введем вместо напряжений статически эквивалентные им нормальные и поперечные усилия, а также изгибающие моменты по формулам:

$$N_r = \int_{-h/2}^{h/2} k_r \cdot \sigma_r(r, z) \cdot dz, \quad N_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} k_\phi \cdot \sigma_\phi(r, z) \cdot dz, \quad (3)$$

$$Q_r = \int_{-h/2}^{h/2} k_r \cdot \tau_{rz}(r, z) \cdot dz, \quad (4)$$

$$M_r = \int_{-h/2}^{h/2} k_r \cdot \sigma_r(r, z) \cdot z \cdot dz, \quad M_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} k_\phi \cdot \sigma_\phi(r, z) \cdot z \cdot dz, \quad (5)$$

где

$\tau_{rz}(r, z)$  – касательное напряжение, действующее в цилиндрическом сечении полого сферического сегмента, Н/мм<sup>2</sup>;

$N_r$  и  $Q_r$  – радиальные и окружные усилия, действующие в цилиндрическом сечении соответственно, Н/мм;

$N_\phi$  – нормальное усилие, действующее в меридиональном сечении, Н/мм;

$M_r$  и  $M_\phi$  – радиальный и окружной изгибающие моменты соответственно, Н·мм/мм;

$h$  – толщина густо перфорированного сферического сегмента, рассматриваемого в качестве модели электрода ИОС, мм.

Если ввести функцию мембранных усилий  $\phi$ , то

$$N_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr}, \quad N_\phi = \frac{d^2\phi}{dr^2}. \quad (6)$$

В результате введения в рассмотрение внутренних усилий и моментов (3), (4), (5), (6) задача о равновесии пространственного элемента конструктивно-ортотропной полой оболочки заметно упрощается, т.к. сводится к задаче о равновесии элемента срединной поверхности, к которому приложены эти усилия и моменты.

Первое основное дифференциальное уравнение рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \nabla^2 \phi - \frac{1}{k_\phi \cdot E \cdot h} \cdot \frac{d}{dr} (k_\phi \cdot E \cdot h) \cdot \frac{d^2\phi}{dr^2} + \left[ \frac{1}{r} \cdot \left( 1 - \frac{k_\phi}{k_r} \right) + \frac{\mu \cdot k_\phi}{E \cdot h} \cdot \frac{d}{dr} (E \cdot h) \right] \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr} + \\ + k_\phi \cdot E \cdot h \cdot \left\{ \frac{d}{dr} \left( \frac{N_T}{D_N} \right) + \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 + \frac{dw}{dr} \cdot \frac{dw_0}{dr} \right] \right\} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\nabla^2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{d}{dr} \right)$  – оператор Лапласа;

$N_T$  – мембранное усилие, вызванное тепловым воздействием на электрод, Н/мм;

$D_N$  – цилиндрическая жесткость конструктивно-ортотропной модели электрода на растяжение, Н/мм;

$w$  – прогиб сегмента, мм;

$w_0$  – начальный прогиб сегмента, мм.

После соответствующих преобразований получается второе разрешающее дифференциальное уравнение задачи:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left\{ r \cdot [k_r \cdot D_M \cdot \frac{d}{dr} \nabla^2 w + \frac{d}{dr} (k_r \cdot D_M) \cdot \frac{d^2 w}{dr^2} + \left( \frac{k_r - k_\varphi}{r} \cdot D_M + \mu \cdot \frac{d}{dr} (k_r \cdot k_\varphi \cdot D_M) \right) \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right\} + \\ + (k_r - k_\varphi) \cdot M_T + r \cdot \frac{d}{dr} [k_r \cdot (1 + \mu \cdot k_\varphi) \cdot M_T] - \frac{d\phi}{dr} \cdot \frac{d}{dr} (w + w_0) \} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

где

$D_M$  – цилиндрическая жесткость конструктивно-ортотропной модели электрода на изгиб, Н/мм;

$M_T$  – изгибающий момент, вызванный тепловым воздействием на электрод, Нмм/мм.

Уравнения (7) и (8) являются нелинейными. Они образуют систему, в общем случае описывающую осесимметричные конечные прогибы пологих конструктивно-ортотропных сферических сегментов переменной жесткости, неравномерно нагретых по радиусу и толщине, являющихся термомеханическими моделями густо перфорированных сферических электродов ИОС. В безразмерном виде эти уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\rho} \nabla^2 \Phi - \frac{1}{k_\varphi(\rho) \cdot D_1(\rho)} \cdot \frac{d}{d\rho} (k_\varphi \cdot D_1) \cdot \frac{d^2 \Phi}{d\rho^2} + \left[ \frac{1}{\rho} \cdot \left( 1 - \frac{k_\varphi(\rho)}{k_r(\rho)} \right) + \frac{\mu \cdot k_\varphi(\rho)}{D_1(\rho)} \cdot \frac{dD_1}{d\rho} \right] \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\Phi}{d\rho} + \\ + k_\varphi(\rho) \cdot D_1(\rho) \cdot \left\{ \frac{b^2}{h^2(1)} \cdot \frac{d}{d\rho} \left( \frac{N_T}{D_N} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{d\xi}{d\rho} \right)^2 + \frac{d\xi}{d\rho} \cdot \frac{d\vartheta}{d\rho} \right] \right\} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\rho} \left\{ \rho \cdot [k_r(\rho) \cdot D_2(\rho) \cdot \frac{d}{d\rho} \nabla^2 \xi + \frac{d}{d\rho} (k_r \cdot D_2) \cdot \frac{d^2 \xi}{d\rho^2} + \left( \frac{k_r(\rho) - k_\varphi(\rho)}{\rho} \cdot D_2(\rho) + \right. \right. \\ \left. \left. + \mu \cdot \frac{d}{d\rho} (k_r \cdot k_\varphi \cdot D_2) \right) \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\xi}{d\rho} \right\} + \frac{b^2}{h(1) \cdot D_M(1)} \cdot [(k_r(\rho) - k_\varphi(\rho)) \cdot M_T(\rho) + \\ + \rho \cdot \frac{d}{d\rho} (k_r \cdot (1 + \mu \cdot k_\varphi) \cdot M_T)] - k_0 \cdot \frac{d\Phi}{d\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} (\xi + \vartheta) \} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\nabla^2 = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} \left( \rho \cdot \frac{d}{d\rho} \right); \quad \rho = \frac{r}{b}; \quad \Phi(\rho) = \frac{\phi(\rho)}{E(1) \cdot h^3(1)};$$

$$\xi(\rho) = \frac{w(\rho)}{h(1)}; \quad g(\rho) = \frac{w_0(\rho)}{h(1)}; \quad D_1(\rho) = f_E(\rho) \cdot f_h(\rho);$$

$$D_2(\rho) = \frac{1 - \mu^2 \cdot k_r(1) \cdot k_\varphi(1)}{1 - \mu^2 \cdot k_r(\rho) \cdot k_\varphi(\rho)} \cdot f_E(\rho) \cdot f_h^3(\rho); \quad f_E(\rho) = \frac{E(\rho)}{E(1)};$$

$$f_h(\rho) = \frac{h(\rho)}{h(1)}; \quad k_0 = 12 \cdot [1 - \mu^2 \cdot k_r(1) \cdot k_\varphi(1)],$$

где  $\phi(\rho)$  – функция мембранных усилий;

$b$  – радиус внешнего контура электрода, мм.

Сформулируем граничные условия, соответствующие особенностям нагружения и закрепления электродов ИОС. Дифференциальное уравнение (9) будем решать при следующих граничных условиях на обоих контурах:

$$N_r(\rho_a) = -N_a, \quad N_r(1) = -N_b; \quad (11)$$

где  $\rho_a = \frac{a}{b}$ ,  $a$  – радиус внутреннего контура, мм;

$N_a$  и  $N_b$  – интенсивность равномерно распределенных на внутреннем и внешнем контурах радиальных сжимающих сил, Н/мм.

Для уравнения (10) зададим граничные условия на внутреннем и внешнем контурах электрода:

$$M_r(\rho_a) = M_a, \quad M_r(1) = M_b, \quad (12)$$

где  $M_a$  и  $M_b$  – интенсивность радиальных изгибающих моментов на внутреннем и внешнем контурах, Н·мм/мм.

Принимая во внимание выражение радиального изгибающего момента, представим граничные условия (11) и (12) в обобщенном виде:

$$\xi^{(2)}(\rho_a) + \frac{\mu}{\rho_a} \cdot k_\varphi(\rho_a) \cdot \xi^{(1)}(\rho_a) + \frac{b^2}{h(1)} \cdot [1 + \mu \cdot k_\varphi(\rho_a)] \cdot \frac{M_T(\rho_a)}{D_M(\rho_a)} -$$

$$- \frac{B_1}{\rho_a} \cdot \xi^{(1)}(\rho_a) - B_3 \cdot \lambda_{M1} = 0, \quad (13)$$

$$\xi^{(2)}(1) + \mu \cdot k_\varphi(1) \cdot \xi^{(1)}(1) + \frac{b^2}{h(1)} \cdot [1 + \mu \cdot k_\varphi(1)] \cdot \frac{M_T(1)}{D_M(1)} +$$

$$+ B_2 \cdot \xi^{(1)}(1) + B_4 \cdot \lambda_{M2} = 0, \quad (14)$$

где  $\xi^{(1)}(\rho) = \frac{d\xi}{d\rho}$ ,  $\xi^{(2)}(\rho) = \frac{d^2\xi}{d\rho^2}$ .

Дифференциальные уравнения (13) и (14) могут быть преобразованы в краевые интегральные и интегро-дифференциальные уравнения. С этой целью необходимо

последовательно проинтегрировать уравнения (13) и (14) в пределах от  $\rho_a$  до  $\rho$  соответствующее число раз и выполнить необходимые преобразования. Для обеспечения компактности представления интегральных уравнений использовалась безразмерная матричная форма их записи.

В общем случае рассматривались пять матричных краевых интегральных уравнений. Четыре из них являются линейными уравнениями вида:

$$[N_m] = [K] \cdot [N_m] + [F_m], \quad m = 1, 2, 3, 4. \quad (15)$$

где  $N_m$  – параметры нагружения электрода ИОС;

Пятое уравнение является нелинейным более сложной структуры:

$$[\tilde{N}] = [K][\tilde{N}] + [K_\xi][\xi] + [K_g][g]. \quad (16)$$

Обобщенное матричное краевое интегро-дифференциальное уравнение, непосредственно описывающее нелинейный изгиб электродов, которые имеют начальные прогибы, после уточнения граничных условий принимают вид:

$$[\xi] = \sum_{m=1}^4 \lambda_m \cdot \{ [K_m^{(2)}][\xi] + [F_{m,g}] \} + [K_0^{(2)}][\xi] + k_0 \cdot \{ [K_{\tilde{N}}^{(2)}][\xi] + [K_{\tilde{N}}^{(2)}][g] \} + \lambda_T \cdot [F_T]. \quad (17)$$

где  $\lambda_m$  - безразмерные параметры нагружений;

$\lambda_T$  – безразмерный параметр нагружения от перепада температуры по толщине электрода.

Решение полученной системы матричных краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений (15), (16), (17) может быть эффективно построено на итерационных методах расчета в сочетании с процессом пошагового температурного нагружения рассматриваемых электродов.

Применительно к задаче устойчивости целесообразно рассмотреть действие сжимающей контурной силы  $N_b$  (11) и изгибающего момента  $M_b$  (12). Равномерное сжатие конструктивно-ортотропного элемента электрода и  $k_r = k_\varphi$  позволяет записать:

$$N_r(\rho) = N_\varphi(\rho) = -N_b. \\ k_{r,N} = \frac{\frac{E^* \cdot (1 - \mu)}{E \cdot (1 - \mu^*)}}{1 - \mu \cdot \left[ 1 - \frac{E^* \cdot (1 - \mu)}{E \cdot (1 - \mu^*)} \right]}. \quad (18).$$

где  $E^*$  и  $\mu^*$  – приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Аналогичные преобразования выполним также для задачи изгиба элемента электрода:

$$k_{r,M} = \frac{\varphi_M}{1 - \mu \cdot (1 - \varphi_M)}. \quad (19)$$

где  $\varphi_M$  – коэффициент ослабления изгибной жесткости электрода.

Поскольку исследование устойчивости и изгиба электродов ИОС включает в себя одновременное решение задач сжатия (18) и изгиба (19), то в качестве окончательной зависимости между коэффициентами заполнения и отношением диаметра отверстий перфорации  $d_0$  к расстоянию между ними  $S_0$  приняты средние величины рассматриваемых коэффициентов:

$$k_r = \frac{1}{2} \cdot (k_{r,N} + k_{r,M}), \quad (20)$$

где  $k_r$  – коэффициент заполнения электрода материалом и коэффициент конструктивной ортотропии.

Для расчета температурного деформирования электродов ИОС была разработана новая методика расчета прогибов электродов [4, 5, 13] при их неравномерном нагреве по радиусу, которая построена на использовании первого приближения итерационного процесса реализации вычислений в аналитическом виде. В результате соответствующих преобразований вместо системы интегральных уравнений было получено алгебраическое уравнение третьей степени, позволяющее вычислить величину прогиба в центре сферического электрода, у которого на внешнем контуре реализуются граничные условия свободного закрепления.

Для повышения эффективности проводимых вычислений алгебраическое уравнение третьей степени записывается относительно безразмерного дополнительного прогиба  $\xi(\rho_a)$ , вычисляемого на внутреннем контуре электрода, и представлено в следующем безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \xi^3(\rho_a) + 3 \cdot \mathcal{G}(\rho_a) \cdot \xi^2(\rho_a) + \left[ 2 \cdot \mathcal{G}^2(\rho_a) - \frac{\lambda_3 - \lambda_{3,kr}}{k_o} \right] \xi(\rho_a) - \\ - \lambda_3 \cdot \frac{\mathcal{G}(\rho_a)}{k_o} = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $k_o = 12 \cdot (1 - \mu^2 \cdot k_r \cdot k_\varphi)$  – вспомогательный безразмерный параметр (20);

$$\lambda_3 = k_o \cdot \alpha \cdot \Delta T_r \cdot \frac{b^2}{h^2} - \text{безразмерный параметр нагружения};$$

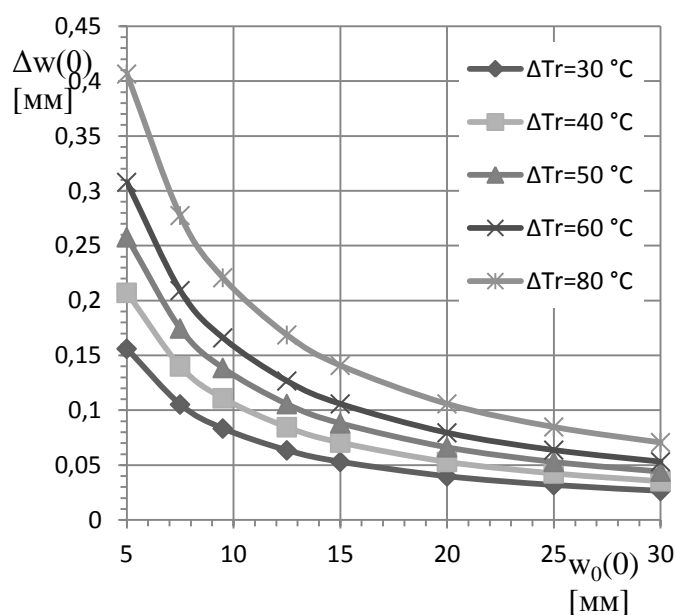
$\Delta T_r$  – разность температур между двумя произвольными точками срединной поверхности электрода, °С;

$\lambda_{3,kr}$  – критическое значение параметра нагрузки.

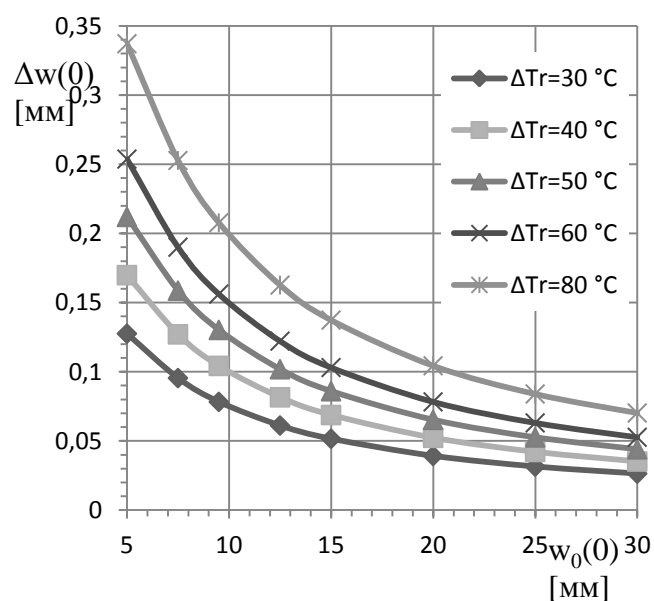
В третьей главе представлены результаты численного моделирования по разработанной механико-математической модели температурного деформирования профилированных электродов узла ИОС, отличающихся по диаметру и толщине, изготовленных из разных конструкционных материалов.

Предложенная методика и алгоритм позволяют производить расчеты дополнительных прогибов электродов, а также прогнозировать изменения межэлектродного зазора в узле ИОС при выходе на заданный режим работы двигателя. С помощью этой методики для электродов разного диаметра, при варьируемом начальном прогибе, были численно определены значения дополнительных прогибов.

Проведено расчетное исследование зависимости дополнительного прогиба от начального прогиба и от радиального градиента температуры для ЭЭ, изготовленных из титановых (рис. 2), титан-ниобиевых и молибденовых сплавов толщиной 0,3...0,6 мм, и для УЭ толщиной 1,5...2,0 мм, выполненных из титанового (рис.3) и молибденового сплава, а также из углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) (рис.3.4).



**Рисунок 2.** Зависимость дополнительного прогиба ЭЭ ВЧИД-16, изготовленного из ВТ1-0, от начального прогиба



**Рисунок 3.** Зависимость дополнительного прогиба УЭ ВЧИД-16, изготовленного из ВТ1-0, от начального прогиба

Показана эффективность и простота численного моделирования при одновременном использовании термомеханической модели электродов ИОС и аналитической методики для расчета дополнительных прогибов профилированных электродов и определена их зависимость от начального прогиба. Выявлено влияние изменения межэлектродного зазора на изменение плотности ионного тока (рис. 4). Предельная плотность ионного тока оценена по формуле, предложенной в статье



«Ионно-оптические системы для формирования интенсивных пучков тяжелых ионов»  
авторами: Обухов В.А., Григорьян В.Г., Латышев Л.А.:

$$j_{пред} = k \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{M}\right)^{1/2} \frac{U_e^{3/2}}{l_{эф}^2}, \quad (22)$$

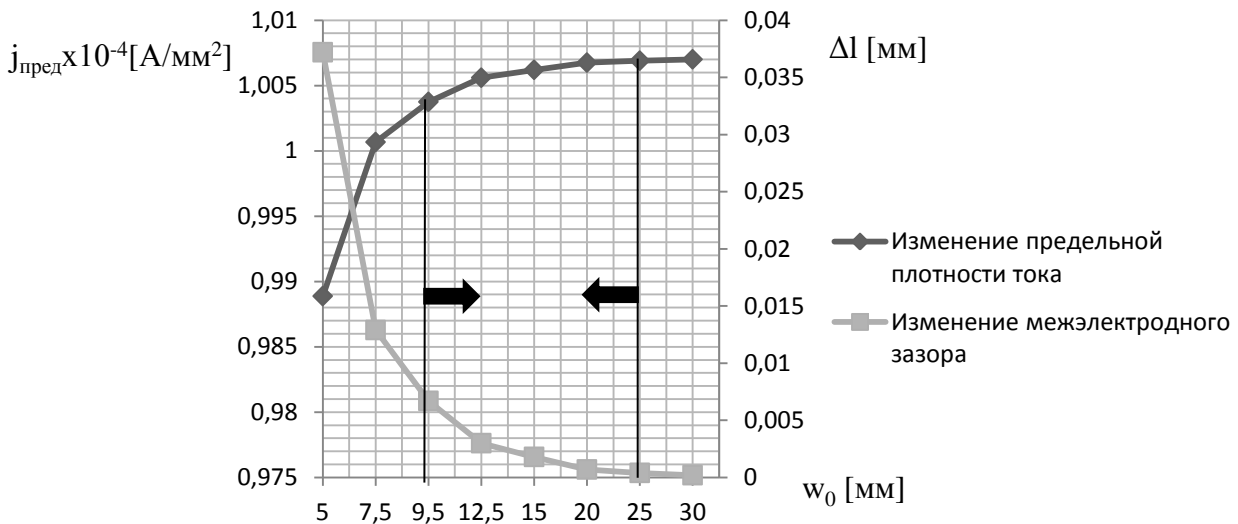
где

$M$  – молярная масса ксенона;

$e$  – заряд электрона;

$\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная.

На основании проведенного исследования разработаны рекомендации для конструирования электродов узла ИОС для перспективных ИД, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ, ФГУП ОКБ «Факел» и КБ «Химв Автоматики». В рекомендации включены таблицы значений рекомендуемых начальных прогибов электродов, изготовленных из указанных материалов для диаметров 160 мм и 500 мм.



**Рисунок 4.** Зависимость плотности ионного тока и межэлектродного зазора от величины начального прогиба для ИОС ВЧИД-16 с ЭЭ и УЭ из ВТ1-0

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования тепловых деформаций электродов в программном комплексе ANSYS и их сравнения с результатами численного моделирования.

Были рассмотрены модели электродов двигателей ВЧИД-16 и ВЧИД-45М диаметром 160 мм и 500 мм соответственно. Моделирование производилось для широкого диапазона перепада температур по радиусу от 30 °С до 80 °С и температуры центра электрода от 272 °С до 330 °С. В качестве основных материалов были

рассмотрены: титановый сплав BT1-0, титан-ниобиевый сплав ТВ-36, молибденовый сплав ВМ-2, углерод-углеродный композитный материал УУКМ .

Построенные кривые изменения начального прогиба электродов от температурного перепада по результатам численного моделирования в ANSYS и в расчетно-теоретическом исследовании, по предложенному алгоритму, продемонстрировали высокую степень согласования результатов (свыше 90 %) при существенном уменьшении времени расчета.

**В пятой главе** проведено сравнение расчетных результатов, полученных по предложенной термомеханической модели, с результатами трех экспериментальных исследований, взятых из литературных данных:

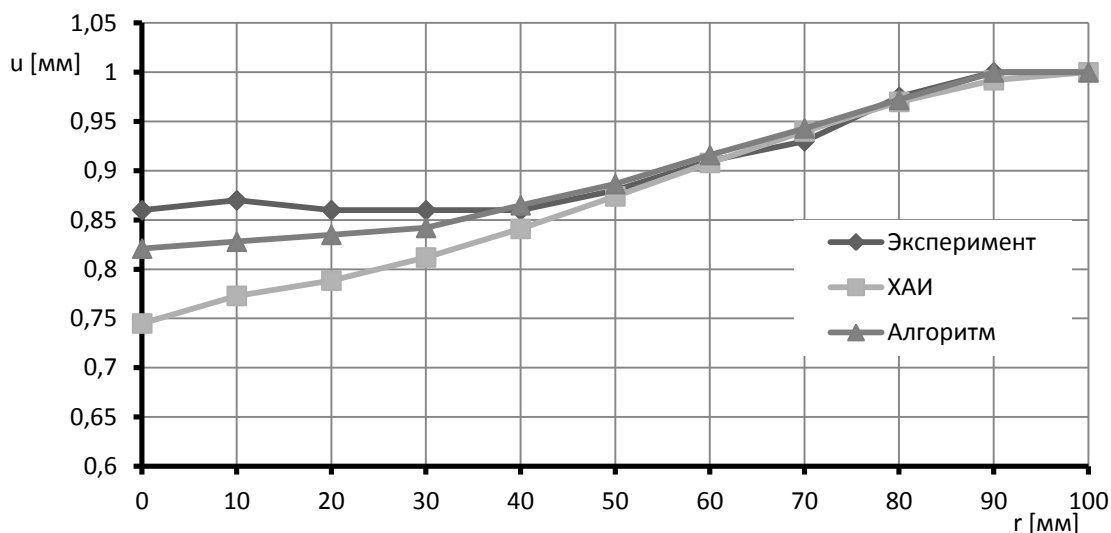
В первом эксперименте, представленном в разделе 1 Главы V, разница между результатами расчетов и экспериментальными данными измерений деформаций УЭ двигателя RIT-22 вышла существенной: дополнительный прогиб УЭ, рассчитанный по экспериментальным данным, равен 0,24 мм; дополнительный прогиб, полученный при расчете по предложенному алгоритму, равен 0,0032 мм. Это несоответствие, прежде всего, обусловлено недостаточной корректностью эксперимента, отмеченной авторами статьи «In Situ Thermal Characterization of the Accelerator Grid of an Ion Thruster» Bundesmann C., Tartz M., Neumann H., Leiter H.J.

Во втором эксперименте, представленном в разделе 2 Главы V, численное моделирование дополнительного прогиба электродов диаметром 300 мм произведено двумя методами: в ANSYS (для ЭЭ - 1,02 мм и для УЭ - 0,5 мм) и по разработанному алгоритму (для ЭЭ - 0,83 мм и для УЭ - 0,44 мм). Результаты численного моделирования не совпали с экспериментальными данными по измерению деформаций аналогичных электродов, полученными на кафедре 208 ФГБОУВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Предположительно, это обусловлено технологией производства электродов (штамповка).

В третьем эксперименте, представленном в разделе 3 Главы V, расхождение расчетных результатов с экспериментальными данными измерений деформаций ЭЭ и УЭ диаметром 200 мм двигателя ПИД-200, полученными в НАУ им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», составило: для межэлектродного зазора (рис. 5) от 3,7 %, в центре электродов, до 1,4 % к внешнему диаметру электродов; для центральной точки ЭЭ20 - 4,9% и УЭ20 – 2,4 %. Сравнение расчетных результатов и экспериментальных измерений, проведенных в НАУ им. Н.Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт», показали расхождение: по деформациям электродов около 15 % и по величине межэлектродного зазора в зоне сферических частей до 20%.

Основываясь на представленной разнице, сделан вывод о большем соответствии экспериментальных данных результатам расчета по предложенному в диссертации алгоритму.



**Рисунок 5.** Изменение межэлектродного зазора между ЭЭ20 и УЭ20 по радиусу

Также в Главе V на основании разработанных в Главе III рекомендаций разработаны конструкции ВЧИД ряда: 80, 100, 160, 450, 500 мм. Конструкторская документация была передана заказчикам. Проведенные исследования и лабораторная отработка показали работоспособность узлов ИОС, изготовленных лабораторных моделей ВЧИД-8 и ВЧИД-16.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке механико-математической модели деформаций профилированных электродов ИД при тепловом нагружении, расчетному исследованию и выработке рекомендаций по рациональной форме электродов ИОС ИД различной размерности, разработке узлов ИОС ВЧИД различной мощности от 100 Вт до 30 кВт.

В результате исследований, проведенных в рамках поставленных задач, получены следующие результаты:

1. Разработана механико-математическая модель деформации электродов ИОС, основанная на использовании аппарата матричных краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений и теории тонкостенных оболочек, описывающая устойчивость и нелинейный изгиб электродов ИОС с учетом начальной формы

электродов. Электроды представлены в виде конструктивно-ортотропных элементов, сегментов сферы.

2. Разработаны методика и алгоритм решения системы уравнений, составляющих модель, основанные на использовании аппарата матричных краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Для первого приближения итерационного процесса решения интегральных уравнений в аналитическом виде получено решение в виде алгебраического уравнения третьей степени в безразмерном виде, на основе которого предложен алгоритм расчетного определения деформирования электродов, позволяющий рассчитать рациональный начальный и дополнительный прогиб профилированных электродов ИОС.

3. Проведено расчетно-теоретическое исследование влияния неравномерного по радиусу нагрева электродов из материалов с различными физико-механическими свойствами на изменение величины прогиба профилированной части электродов ИОС и на плотность извлекаемого ионного тока из двигателя. Проанализированы зависимости деформаций электродов при различных температурных профилях.

4. Проведено численное моделирование теплового деформирования электродов ИОС в программно-вычислительном комплексе ANSYS. Рассмотрена корреляция величин деформирования электродов по разработанному алгоритму и по результатам численного моделирования в комплексе ANSYS.

5. Проведено сравнение результатов численного моделирования в комплексе ANSYS с результатами, полученными в расчетно-теоретическом исследовании. При использовании разработанного алгоритма рассогласование результатов расчетов дополнительных прогибов с результатами численного моделирования в комплексе ANSYS не превысила 10 % при сокращении времени расчета с 2 часов, при расчете в ANSYS, до режима реального времени.

6. Составлены таблицы значений рекомендуемых начальных прогибов электродов для материалов с различными физико-механическими свойствами и размерного ряда: 160 мм и 500мм.

7. Проведен анализ по литературным данным независимых экспериментальных исследований тепловых деформаций электродов. Проведена верификация экспериментальных данных с результатами численного моделирования по механико-математической модели и разработанному алгоритму расчета дополнительного прогиба электрода. Получена высокая степень согласования полученных при расчете величин с представленными экспериментальными данными, составившая более 90 %.

8. На основании расчетно-теоретического исследования разработаны рекомендации для проектирования электродов и узлов ИОС перспективных ИД мощностью от 2 кВт до 35 кВт, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ, ФГУП ОКБ «Факел» и КБ «Химавтоматики».

9. С учетом выработанных рекомендаций разработаны конструкции ИОС ряда лабораторных моделей ВЧИД: ВЧИД-8 с плоскими электродами и ВЧИД-16 с профилированными электродами. Обе модели показали работоспособность на номинальных режимах, определенных предъявляемыми к ним техническими требованиями.

### Список публикаций по теме диссертации

#### В изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Анализ многоразового лунного транспортного корабля, использующего ядерную энергетическую установку [Электронный ресурс] / Х.В. Лёб, А.И. Могулкин, В.А. Обухов, В.Г. Петухов // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2013. - № 70. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44497>, (дата обращения: 01.06.2015).
2. Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей [Электронный ресурс] / Е.А. Антипов, В.В. Балашов, А.И. Могулкин, А.И. Панков // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2013. - № 65. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35964>, (дата обращения: 01.06.2015).
3. Крупногабаритные высокочастотные ионные двигатели [Электронный ресурс] / Х.В. Лёб, Г.А. Попов, В.А. Обухов, А.И. Могулкин // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2012. - № 60. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35371>, (дата обращения: 01.06.2015).
4. Федоров, В.А., Обухов, В.А., Могулкин, А.И. Исследование температурного деформирования электродов ионно-оптической системы на основе континуальной термомеханической расчетной модели [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2014. - № 77. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=52975>, (дата обращения: 01.06.2015).
5. Федоров, В.А., Обухов, В.А., Могулкин, А.И. Расчетная термомеханическая модель электродов ионно-оптической системы ионных двигателей // Известия Российской академии наук. Энергетика. - 2015. - №1. – С. 123-128.

## **В рецензируемых иностранных изданиях:**

6. A realistic concept of a manned Mars mission with nuclear-electric propulsion / H.W. Loeb, V.G. Petukhov, G.A. Popov and A.I. Mogulkin // Journal «Acta Astronautica». - 2015. – 116. - 299-306 p.

## **Другие публикации:**

7. Моголкин, А.И., Обухов, В.А., Федоров, В.А. Термомеханическая расчетная модель узла ионно-оптической системы: Тез. Докл. 12-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 2013. – Москва: АиК. – 2013. – С. 407-409.
8. Патент – 116273 РФ. Источник ионов/ С.А. Хартов, А.И. Моголкин, В.А. Обухов; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - №2011148979; Заяв. 02.12.2011; Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 12.
9. Патент – 2543063 РФ. Способ изготовления электродов ионно-оптической системы/ В.В. Балашов, А.И. Моголкин, Г.А. Попов, Е.А. Антипов; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - №2013145245; Заяв. 09.10.2013; Оpubл. 27.02.2015; Бюл. № 6.
10. Федоров, В.А., Обухов, В.А., Моголкин, А.И. Исследование температурного деформирования электродов ИОС на основе континуальной термомеханической расчетной модели: Тез. Докл. 13-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 2014. – Москва: АиК. – 2014. – С. 269-270.
11. A realistic concept of a manned Mars mission with Nuclear-Electric Propulsion / H.W. Loeb, V.G. Petukhov, G.A. Popov, A.I. Mogulkin // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsion – New Challenges», Dresden, 2014. – P.27.
12. Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster / H.W. Loeb, D. Feili, G.A. Popov, A.I. Mogulkin et al. // International Electric Propulsion Conference, 2011. - IEPC-2011-290.
13. Fedorov, V.A., Obukhov, V.A., Mogulkin, A.I. Simulation of Temperature Deformation of Ion Thruster Electrodes // International 34th Electric Propulsion Conference, Japan, 2015. – IEPC-2015-444p/ISTS-2015-b-444p. – 9 p.
14. Mogulkin, A.I., Obukhov, V.A., Fedorov, V.A. Investigation of Temperature Deformation of the IES Electrodes Based on the Continuum Thermo-Mechanical Calculation Model // Proceedings of the 5th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application «Electric Propulsion – New Challenges», Dresden. – 2014. – P. 72.