

На правах рукописи



МАДЕЕВ Сергей Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ
ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в государственном научном центре Российской Федерации - федеральном государственном унитарном предприятии «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Ловцов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Ермошкин Юрий Михайлович**, доктор технических наук, доцент, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», начальник лаборатории
Самойлов Владимир Маркович, доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», начальник управления

Ведущая организация: АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится «22» марта 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» https://mai.ru/upload/iblock/2e8/Madeev-_-dissertatsiya.pdf

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Увеличение электрической мощности современных космических аппаратов (КА) расширяет возможности применения на них электроракетных двигателей (ЭРД), включая использование для транспортных операций на околоземных орбитах, а также в качестве маршевых двигателей при полетах к Луне и удаленным телам Солнечной системы. Для решения указанных задач необходимы двигатели с экономичным расходом рабочего тела, обладающие удельным импульсом от 3000 с, а также ресурсом от 20000 ч. Среди известных электроракетных двигателей только ионные двигатели (ИД) соответствуют приведенным выше критериям.

Одной из основных проблем при разработке ИД на данный момент является обеспечение ресурса. Узлом, имеющим наименьший ресурс, а, следовательно, определяющим срок активного существования двигателя, является ионно-оптическая система (ИОС). В процессе работы двигателя происходит распыление поверхностей ускоряющего электрода (УЭ) ИОС ионами перезарядки. Основным способом снижения скорости распыления является замена традиционных металлических УЭ из молибдена или титана на более эрозионно-стойкие электроды из материалов на основе углерода.

УЭ из углеродных материалов можно использовать совместно с эмиссионным электродом (ЭЭ) из молибдена или титана. Однако, в двигателях с диаметром пучка от 150 мм с плоскими электродами ИОС под действием тепловых нагрузок происходит неконтролируемое изменение межэлектродного зазора. В худшем случае это приводит к электрическому замыканию цепи ЭЭ – УЭ. Этот эффект можно контролировать, используя сферические электроды. При изготовлении сферических электродов из титана или молибдена известно направление прогиба, и, следовательно, можно предсказать изменения зазора и смещение координат центров отверстий в зоне перфорации при переходе из холодного состояния в горячее. Поэтому перед включениями пучка необходимо проводить предварительный прогрев сборки ИОС, чтобы металлический ЭЭ

принял рабочее положение, т.е. отверстия в электродах сборки ИОС стали сосны, а величина межэлектродного зазора соответствовала расчётному значению.

Недостатками данного подхода являются увеличение угла расходимости пучка, что снижает тяговый КПД и повышает степень воздействия плазменной струи на элементы КА, а также необходимость расходовать рабочее тело (РТ) на прогрев ЭЭ. Кроме того, при изготовлении сферических электродов необходимо обеспечить заданный радиус сферичности и прорезать отверстия в зоне перфорации по нормали к поверхности сферы, что существенно усложняет технологию изготовления по сравнению с технологией изготовления плоских электродов.

Одним из способов решения указанных выше проблем является создание плоского ЭЭ из углеродных материалов. Благодаря низким значениям коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР), смещениями координат центров отверстий электродов ИОС из углеродных материалов при переходе из холодного состояния в горячее можно пренебречь, что позволяет исключить затраты топлива на предварительный прогрев узла ИОС и обеспечить минимальную угловую расходимость ионного пучка. Однако, при создании ЭЭ, в целях повышения эффективности работы ИД, необходимо обеспечить максимальную эффективную прозрачность для ионов, что достигается уменьшением толщины электрода и увеличением геометрической прозрачности в зоне перфорации. Увеличение эффективной прозрачности плоского ЭЭ приводит к существенному снижению его механической прочности, что может привести к разрушению электрода под воздействием стартовых вибрационных нагрузок.

Среди известных углеродных материалов наибольшей механической прочностью обладают углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), представляющие собой углеродную матрицу, армированную углеродными нитями. Наличие армирующего наполнителя позволяет существенно повысить стойкость электрода к вибрационным и ударным

нагрузкам. Однако, при создании традиционных плоских электродов, обладающих максимальной эффективной прозрачностью, с круглыми отверстиями, расположенными в узлах гексагонального паттерна в зоне перфорации, происходит разрезание нитей наполнителя в перемычках между отверстиями, что приводит к существенному снижению их механической прочности.

Одним из возможных способов сохранения неповрежденных нитей в перемычках между отверстиями является использование щелевых ИОС. Однако, данный подход приводит к существенному снижению рабочего диапазона первеанса ИОС. Попытки применения технологии навивки для сохранения неповрежденных нитей наполнителя в перемычках показали невозможность получения качественной формы отверстий.

Таким образом, можно заключить, что в настоящее время существует проблема создания плоских электродов ИОС из УУКМ для ИД с диаметром зоны перфорации от 150 мм, обеспечивающих одновременно стойкость к вибрационным механическими нагрузкам и рабочий диапазон первеанса, сравнимый с традиционными круглыми апертурами. Вышесказанное определяет актуальность темы данной научно-квалификационной работы (диссертации).

Объектом исследования являются ИОС с электродами из УУКМ с альтернативной формой апертур.

Предметом исследования являются механические и оптические свойства ИОС с электродами из УУКМ с альтернативной формой апертур.

Цель работы – разработка плоской двухэлектродной ионно-оптической системы ионного двигателя с электродами из углерод-углеродных композиционных материалов с диаметром зоны перфорации более 150 мм, обладающей стойкостью к вибрационным механическими нагрузкам, и имеющей рабочий диапазон первеанса, сравнимый с рабочим диапазоном первеанса ИОС с традиционными круглыми апертурами.

Основные задачи диссертации:

1. Расчётным путём определить форму апертур электродов ИОС, позволяющую сохранить неповреждённые нити в перемычках между отверстиями и рабочий диапазон первеанса, близкий к рабочему диапазону эталонной ИОС с круглыми апертурами.
2. Определить основные требования к заготовкам электродов ИОС из УУКМ и отработать технологию создания электродов.
3. Провести сравнительные механические испытания электродов ИОС из УУКМ с традиционными круглыми и альтернативными апертурами.
4. Провести сравнительные экспериментальные исследования рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми апертурами и альтернативной ИОС с новой формой апертур.

Новизна результатов исследований

1. Разработана новая конструкция плоских электродов ИОС ИД из УУКМ с квадратными апертурами со скругленными углами.
2. Рассчитаны и экспериментально подтверждены рабочие диапазоны первеанса ИОС с квадратными апертурами со скруглёнными углами и показано, что эти диапазоны близки по абсолютным значениям к рабочим диапазонам первеанса эталонной ИОС с круглыми апертурами.
3. Проведены сравнительные экспериментальные исследования, подтверждающие повышение жёсткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглой формы апертур к апертурам квадратной формы со скругленными углами.

Практическая значимость результатов исследований

1. Отработана технология создания и сформированы основные требования к заготовкам из УУКМ для создания электродов ИОС.
2. Получены экспериментальные данные о плотности, пористости, теплопроводности и коэффициентах линейного температурного расширения для различных УУКМ отечественного производства, которые могут быть использованы при разработке новых перспективных ИОС с повышенными

прочностными и ресурсными характеристиками.

3. Оработана технология создания пластин толщиной менее 0,5 мм из УУКМ на основе однонаправленных лент.

4. Результаты работы были использованы при разработке ионного двигателя ИД-200КР с диаметром пучка 200 мм, с толщиной ЭЭ 0,5 мм и геометрической прозрачностью 0,63. Изготовленные опытные образцы плоских электродов ИОС ИД-200 из УУКМ, которые успешно прошли огневые, вибрационные и ударные испытания.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе применялись как эмпирические, так и расчетные методы исследования. Расчетными методами определялись рабочие диапазоны первеанса, прозрачность для нейтральных атомов, угол расхождения ионного пучка, потенциальный барьер в апертурах ускоряющего электрода и скорости распыления поверхностей УЭ. Экспериментальными методами определялись перемещения электродов под действием сканирующей синусоидальной нагрузки, радиальное распределение плотности тока ионов перед ИОС и рабочие диапазоны первеанса ИОС.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая форма апертур электродов ИОС из УУКМ, обладающая прозрачностью, сходной с прозрачностью традиционных круглых апертур, и обеспечивающая повышенную стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам по сравнению с традиционными ИОС с круглыми апертурами.

2. Результаты сравнительного расчетно-экспериментального исследования диапазонов первеансов ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами и эталонной ИОС с круглыми апертурами.

3. Результаты сравнительных экспериментальных исследований стойкости электродов ИОС к вибрационным нагрузкам.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов диссертации обусловлена использованием корректных методик измерений, основанных на апробированных ранее подходах; проведением

экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании; совпадении полученных экспериментальных данных с данными численного моделирования, а также с экспериментальными данными других исследователей.

Вклад автора в проведенное исследование

Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями. В процессе выполнения диссертации соискатель самостоятельно выполнил следующие виды научно-исследовательских работ:

- анализ современного состояния исследований и разработок ионно-оптических систем ионных двигателей с электродами из материалов на основе углерода;

- расчетные исследования с целью определения формы апертур, позволяющую сохранить неповрежденные нити в перемычках между отверстиями без существенного снижения рабочего диапазона первеанса;

- отработка технологии изготовления электродов;

- формирование требований к заготовкам из УУКМ;

- анализ механизмов разрушения электродов ИОС;

- подготовка и проведение автономных механических испытаний электродов с традиционной и альтернативной формами апертур;

- подготовка и проведение огневых испытаний для сравнения рабочих диапазонов первеансов.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при создании электродов ИОС для ионных двигателей ИД-200 и ИД-200КР.

Апробация работы

Основные результаты данной работы докладывались на НТС отдела электрофизики ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»; на 7-ой европейской конференции по аэронавтике и космическим наукам (Милан, 2017); на 7-ой российско-германской конференции по электроракетным двигателям и их

применению (Гиссен, 2018).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 119 страницах машинописного текста, включает в себя 70 рисунков, 12 таблиц, а также список литературы, содержащий 79 наименований. Работа разделена на введение, 5 глав содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

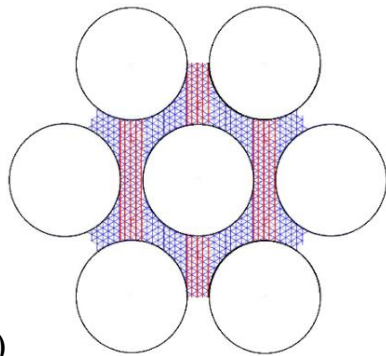
Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор литературных источников по теме диссертации, показано современное состояние научной проблемы, проанализированы и критически оценены существующие подходы и методы ее решения. На основе проведенного анализа опубликованных ранее работ были сформулированы задачи данного исследования и выработан подход к их решению.

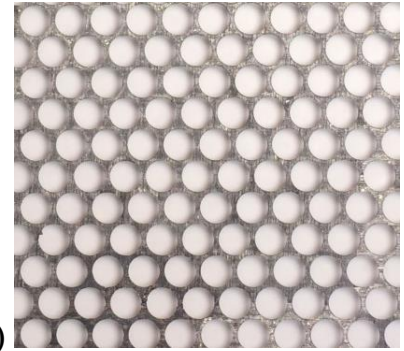
Во второй главе приводятся результаты расчетного исследования с целью поиска формы апертур, которая бы позволяла увеличить стойкость электродов, изготовленных из УУКМ, к вибрационным нагрузкам без существенного сужения рабочего диапазона первеанса.

В традиционных ионных двигателях используются электроды с круглыми отверстиями в зоне перфорации, но для электродов из УУКМ это приводит к перерезанию волокон в перемычках между отверстиями и снижению стойкости к вибрационным нагрузкам. Схема армирования электрода с круглыми отверстиями представлена на рисунке 1. Красным цветом выделена

максимальная длина неповрежденных нитей наполнителя в одном из трех направлений армирования заготовки.



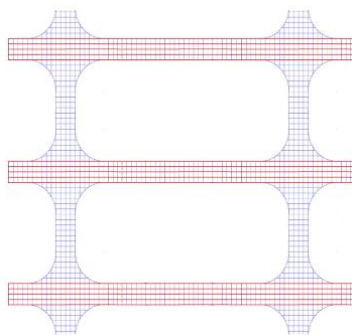
а)



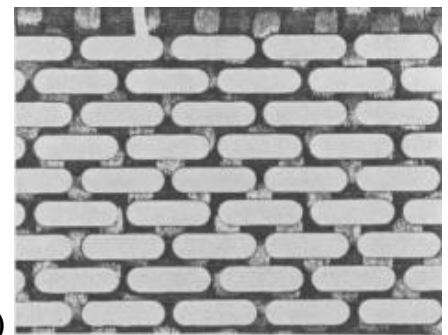
б)

Рисунок 1: а) схема армирования электродов с круглыми апертурами; б) общий вид области перфорации электродов из УУКМ с круглыми апертурами.

Главной альтернативой круглым апертурам рассматривались щелевые апертуры, позволяющие сохранить большее число неповрежденных нитей наполнителя в перемычках между отверстиями (рисунок 2). Однако, основным недостатком применения ИОС с щелевыми апертурами является существенное снижение рабочего диапазона первеанса по сравнению с ИОС с круглыми апертурами. Рабочий диапазон первеанса – диапазон плотностей тока, при котором не происходит попадание ионов, вытягиваемых из газоразрядной камеры, на ускоряющий электрод.



а)



б)

Рисунок 2: а) схема армирования электродов с щелевыми апертурами; б) общий вид области перфорации электродов из УУКМ с щелевыми апертурами.

Расчетные исследования проводились в программе IOS-3D, предназначенной для расчета электрических полей и ионных потоков в

трёхмерном пространстве с произвольной формой граничных поверхностей. В качестве эталонной ИОС с круглыми апертурами была выбрана ИОС двигателя ИД-200. Расположение отверстий и геометрия расчётной области представлены на рисунке 3.

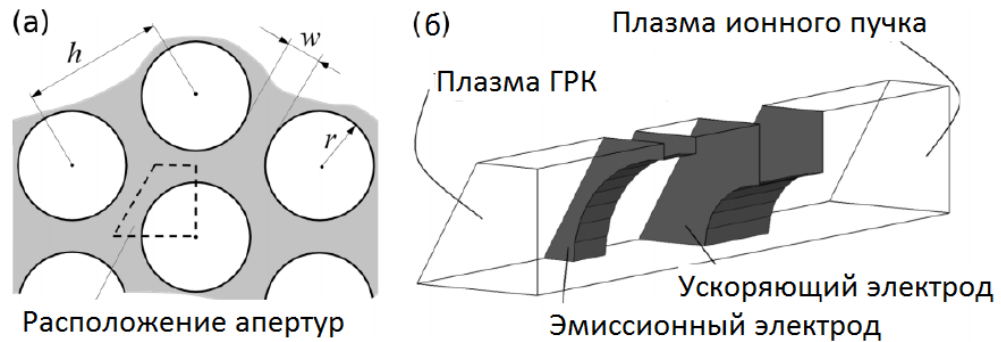


Рисунок 3: Эталонный вариант ИОС: (а) расположение апертур, (б) расчетная область.

В проведённых расчётах варьировалась плотность тока ионов J_i , движущихся к ИОС из объёма ГРК, и отыскивались предельные значения плотности тока, при которых начинается попадание ионов пучка на ускоряющий электрод. Для обеспечения общности получаемых результатов рассчитанные значения плотности тока представлялись в безразмерном виде $P \equiv J_i/J_0$, где в качестве масштаба использовалась плотность ионного тока, определённая по уравнению Чайлда-Ленгмюра $J_0 = (4\epsilon_0/9)\sqrt{2q/M}(U_t^{3/2}/d^2)$; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; q – заряд иона; U_t – полное ускоряющее напряжение; d – величина зазора между эмиссионным и ускоряющим электродами. Также при численном моделировании вычислялась эффективная прозрачность ионно-оптической системы для ионов, которая была определена как отношение тока ионного пучка I_{beam} к полному току, входящему в расчетную область, I_{enter} .

В качестве альтернативных ионно-оптических систем с некруглой формой апертур рассматривались квадратные апертуры, квадратные апертуры со скругленными углами и прямоугольные апертуры со скругленными углами.

Размеры квадратных апертур выбирались таким образом, чтобы ширина перемычек между апертурами и геометрическая прозрачность электродов совпадали с аналогичными параметрами традиционной ИОС. Диапазон допустимых значений плотности тока у ИОС с квадратными апертурами оказался существенно меньше, чем у эталонной ИОС. Согласно результатам моделирования, верхний предел безразмерной плотности тока в ИОС с квадратными апертурами примерно в 3.4 раза меньше, чем у ИОС с круглыми апертурами. Причиной прямого перехвата пучка в ИОС с квадратными апертурами при высокой плотности тока является появление группы слабо сфокусированных ионов в угловой части ионного пучка.

Исследование апертур квадратной формы со скругленными углами проводилось для разных радиусов скругления отверстий в эмиссионном и ускоряющем электродах (рисунок 4).

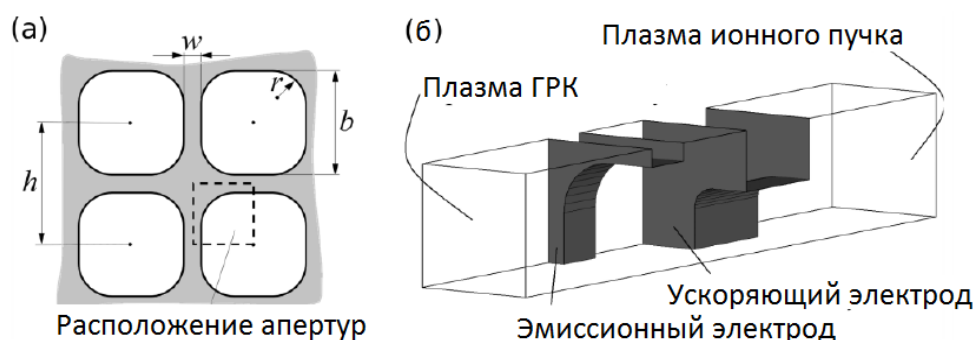


Рисунок 4: ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами: (а) расположение апертур; (б) расчетная область.

Расстояние между центрами отверстий было выбрано таким же, как и в эталонной ИОС. Сторона квадрата b , при выбранном радиусе скругления r , для каждой серии расчетов определялась из выражения для геометрической прозрачности $Y_G = (b^2 - (4 - \pi)r^2)/h^2$ таким образом, чтобы сохранялось равенство геометрических прозрачностей новой и эталонной ИОС.

В результате последовательного изменения радиусов скругления в эмиссионном и ускоряющем электродах была найдена оптимальная геометрия (рисунок 5), в которой диапазон первеанса ($P_{\min} = 0.034$; $P_{\max} = 0.328$) наиболее

близок к этому диапазону для ИОС с круглыми апертурами: ($P_{\min} = 0.022$; $P_{\max} = 0.343$).

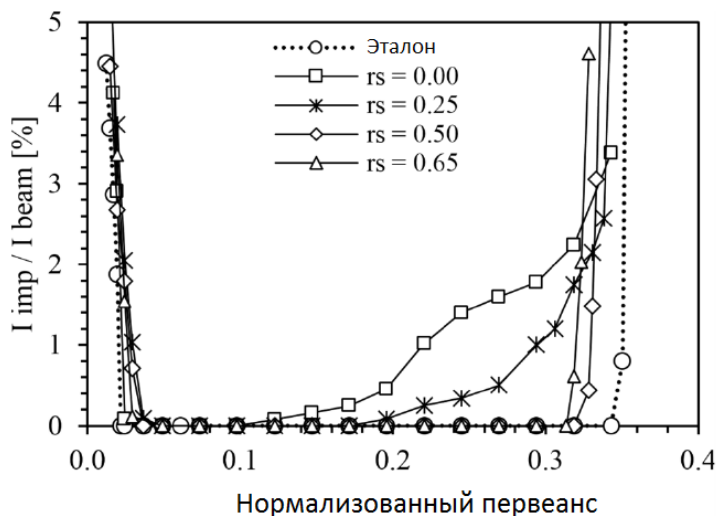


Рисунок 5: Поведение тока перехвата в ИОС с квадратными отверстиями со скругленными углами в эмиссионном электроде в зависимости от нормализованного первеанса при нескольких значениях радиуса скругления (r_s).

Исследования коротких щелевых апертур показали, что вблизи центра щели группа ионов нижней границы диапазона первеанса формируется раньше, чем на краю отверстия. Эти ионы напрямую соударяются с ускоряющим электродом в центральной части щели. Таким образом можно заключить, что ИОС с щелевыми апертурами даже с относительно небольшим соотношением длины к ширине щели плохо подходит для использования в составе ионного двигателя, радиальное распределение плотности плазмы в котором часто характеризуется падением от центра к периферии ГРК.

Во третьей главе описываются этапы отработки технологии создания УУКМ электродов ионно-оптических систем.

Технология создания электродов ионно-оптических систем из УУКМ начала разрабатываться для двигателей ИД-200 и ИД-500. Были проведены исследования плотности, пористости, теплопроводности и коэффициентов линейного температурного расширения УУКМ с наполнителями на основе однонаправленной ленты, двунаправленной ткани и войлока.

Измерения кажущейся плотности проводились гидростатическим методом. Плотность образца при использовании гидростатического взвешивания находится по следующей формуле:

$$\rho_{\text{гидр}} = \frac{m_{\text{возд}}(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}})}{m_{\text{возд}} - m_{\text{жидк}}} + \rho_{\text{в}}$$

где $m_{\text{возд}}$ – масса образца, измеренная на воздухе; $m_{\text{жидк}}$ – масса образца, измеренная в жидкости с известной плотностью (в данном случае – дистиллированная вода); $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости при температуре измерения; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха.

Измерения истинной плотности проводились на автоматическом гелиевом пикнометре Ultraspnometer 1200e в соответствии с прилагаемой методикой исследований. Пористость рассчитывалась по формуле:

$$\Pi = \frac{\rho_{\text{пик}} - \rho_{\text{каж}}}{\rho_{\text{пик}}} \cdot 100\%$$

Измерения коэффициента теплопроводности проводились на Модуле DiscoveryXenonFlash (DXF) по методу вспышки. Образцы для исследований имели форму плоских дисков, и измерение теплопроводности анизотропного материала можно было провести только по оси z (нормаль к поверхности диска). Для получения теплопроводности в плоскости xy, полученные результаты по оси z сравнивались с коэффициентами теплопроводности известных УУКМ с аналогичной структурой и типом наполнителя. Результаты измерений и сравнительного анализа приведены в таблице 1

Таблица 1. Коэффициенты теплопроводности УУКМ.

Т, °С	ОБРАЗЕЦ КМ		
	Войлок	Пек	Двунаправленная ткань
	Теплопроводность λ_z / λ_{xy} , Вт/(м·К)		
190	14,90/11,7	5,03/132	2,7/132
241	14,62/13,1	5,38/128	3,01/128
292	15,29/14,3	5,58/124	3,17/124
344	14,96/15	5,77/120	3,34/120

Измерение КЛТР материалов проводились на dilatометре NETZSCH DIL 402 E/7-Ру. Образцы нагревались (или охлаждались) до заранее заданной температуры в однородной температурной зоне управляемой печи. Печь приближается к конечной температуре с определенной скоростью нагревания (или охлаждения). Изменение длины образца Δl измерялось при помощи индукционного считывающего датчика перемещения. Диапазоны КЛТР различных УУКМ в диапазоне температур от 200 °С до 400 °С приведены в таблице 2.

Таблица 2. КЛТР образцов УУКМ.

УУКМ	Толщина заготовки	
	1 мм	2 мм
Войлок	$1,6 \cdot 10^{-6} \div 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$0,9 \cdot 10^{-6} \div 1,72 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$
Пек	$0,3 \cdot 10^{-6} \div 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$-0,8 \cdot 10^{-6} \div -0,2 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$
Аспро А-80	$1,45 \cdot 10^{-6} \div 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$1,5 \cdot 10^{-6} \div 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$

Исходя из результатов литературного обзора и имеющегося в доступе оборудования, отверстия в электродах ИОС и эталонных образцах было решено прорезать на лазерном станке. Отработка технологии создания отверстий методом лазерной резки показала, что в образцах с низкими значениями плотности ($\rho_{\text{каж}} \approx 1,2 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{пик}} \approx 1,4 \text{ г/см}^3$) и пористостью более 8% происходит перегорание стенок между отверстиями и расслоение заготовок. В итоге для изготовления электродов ИОС были выбраны заготовки из УУКМ с наполнителями на основе однонаправленных лент или двунаправленных тканей с кажущейся плотностью более $1,6 \text{ г/см}^3$ и пористостью менее 7 %.

Первыми были изготовлены сферические электроды ИОС из УУКМ с наполнителем Аспро А-80. По форме, зонам перфорации, толщинам стенок отверстий электроды были идентичны титановым электродам. Проведенные испытания на вибрационном стенде ВЭДС-1500 сборки из титановых электродов и электродов из УУКМ на основе двунаправленной ленты показали, что амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) у титановых электродов и электродов из УУКМ совпадают. Существенных изменений АЧХ до и после

нагрузки нет. По результатам внешнего осмотра электродов из УУКМ механических повреждений и ослабления креплений не обнаружено.

Затем из УУКМ на основе двунаправленной ленты и пека изготавливались плоские электроды с выкладкой монослоев $0^0/90^0$ и $-60^0/0^0/60^0$. Толщины и геометрическая прозрачность плоских электродов была такой же, как у сферических электродов. Электроды с выкладкой монослоев $0^0/90^0$ перфорировались квадратными отверстиями со скругленными углами, а электроды с выкладкой $-60^0/0^0/60^0$ – круглыми отверстиями. Форма отверстий была заранее рассчитана в программном продукте IOS-3D. Все сборки ИОС успешно прошли огневые и вибрационные испытания.

При разработке ионно-оптической системы двигателя ИД-200 КР для обеспечения проектных характеристик необходимо было изготовить плоские эмиссионные электроды с геометрической прозрачностью 63% и толщиной не более 0,5 мм. Для обеспечения заданных параметров и механической прочности было необходимо использовать УУКМ с толщиной монослоя не более 0,12 мм. Поэтому были изготовлены электроды из уже отработанного материала на основе двунаправленной ленты и нового материала на основе однонаправленной ленты. Плотность и пористость заготовок соответствовала требованиям, приведенным выше.

Все электроды успешно прошли огневые испытания. После вибрационных испытаний произошло разрушение электродов с круглыми отверстиями. Электроды с квадратными отверстиями со скругленными углами прошли вибрационные испытания без внешних повреждений и изменений АЧХ.

В четвертой главе содержатся результаты сравнительных механических испытаний электродов ИОС из УУКМ с круглыми и квадратными апертурами со скругленными углами.

По результатам обзора вибрационных испытаний ИОС с электродами из углеродных материалов было выделено два подхода к проектированию узла ИОС с электродами из УУКМ. В первом случае не допускались соударения между электродами. Данный подход был реализован при проектировании

ускорительных систем для двигателей NSTAR и NEXIS. Соударения между электродами предотвращались путем увеличения жесткости электродов. Второй подход допускал межэлектродные соударения и был реализован при проектировании ИОС с плоскими электродами из УУКМ двигателей $\mu 10$ и $\mu 20$. В ускорительных системах этих двигателей основным механизмом разрушения скорее всего были низкоскоростные удары.

Повторяющиеся низкоскоростные удары приводят к усталостному разрушению композиционного материала, которое начинается с матрицы. Проведение сравнительного экспериментального исследования стойкости электрода к усталостному разрушению в зависимости от схемы армирования затруднено в силу ряда причин. Во-первых, матрица УУКМ, представляющая собой смесь коксового остатка и пироуглерода, обладает большим количеством пор, скрытых дефектов и малоразмерных трещин. Во-вторых, технология изготовления электродов не позволяет получить двух одинаковых заготовок: отличия в свойствах матрицы и неравномерности укладки армирующих углеродных нитей приводит к появлению локальных неоднородностей.

В настоящем исследовании проверялось предположение об увеличении жесткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглых отверстий к квадратным отверстиям со скругленными углами. Повышение жесткости при изменении схемы армирования должно привести к повышению значения первой резонансной частоты и уменьшению амплитуды перемещения.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 7. Электрод жестко закреплялся на фланце с усилием 1,1 Н/см. Фланец с электродом установлен на вибрационный стол стенда ВЭДС-1500. Поскольку крепление вибрационного датчика в области зоны перфорации электрода ИОС могло привести к разрушению перемычек между отверстиями в процессе крепления/снятия датчика, измерения перемещения перфорированной области электрода осуществлялось лазерным дальномером Opto NCDT 1030. Колебания вибростенда, фланца и балки дальномера отслеживались акселерометрами. В качестве исследуемых образцов были выбраны эмиссионные электроды

двигателя ИД-200КР толщиной 0,5 мм из УУКМ на основе однонаправленной ленты. К исследуемым образцам прикладывалась сканирующая синусоидальная нагрузка величиной $1g$, в диапазоне частот от 50 до 200 Гц. Данные с акселерометров и дальномера собирала автоматическая согласованная система с частотой 6000 Гц.

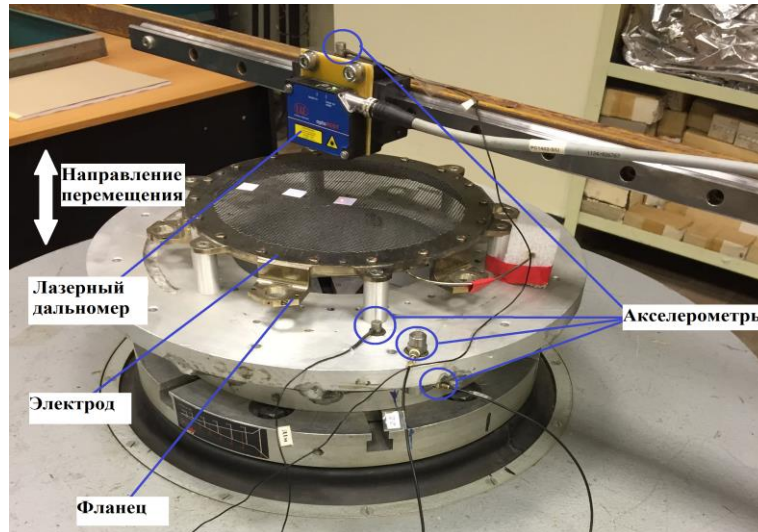


Рисунок 6: Схема экспериментальной установке по определению перемещения электродов ИОС под действием сканирующей синусоидальной нагрузки.

Результаты сравнительных вибрационных испытаний приведены на рисунке 8. Сравнительные автономные вибрационные испытания эмиссионных электродов с круглой формой апертур и эмиссионных электродов с квадратной формой апертур со скругленными углами показали, при одинаковых условиях вибрационных нагрузок показали, что собственная частота сборки фланца и электрода с круглыми отверстиями составила 140 ± 10 Гц, а у электродов с квадратными отверстиями со скругленными углами - 190 ± 10 . Перемещение центра эталонной ИОС с круглыми апертурами на 30% больше перемещения центра альтернативной ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами, что подтверждает повышение жёсткости при переходе к новой схеме армирования.

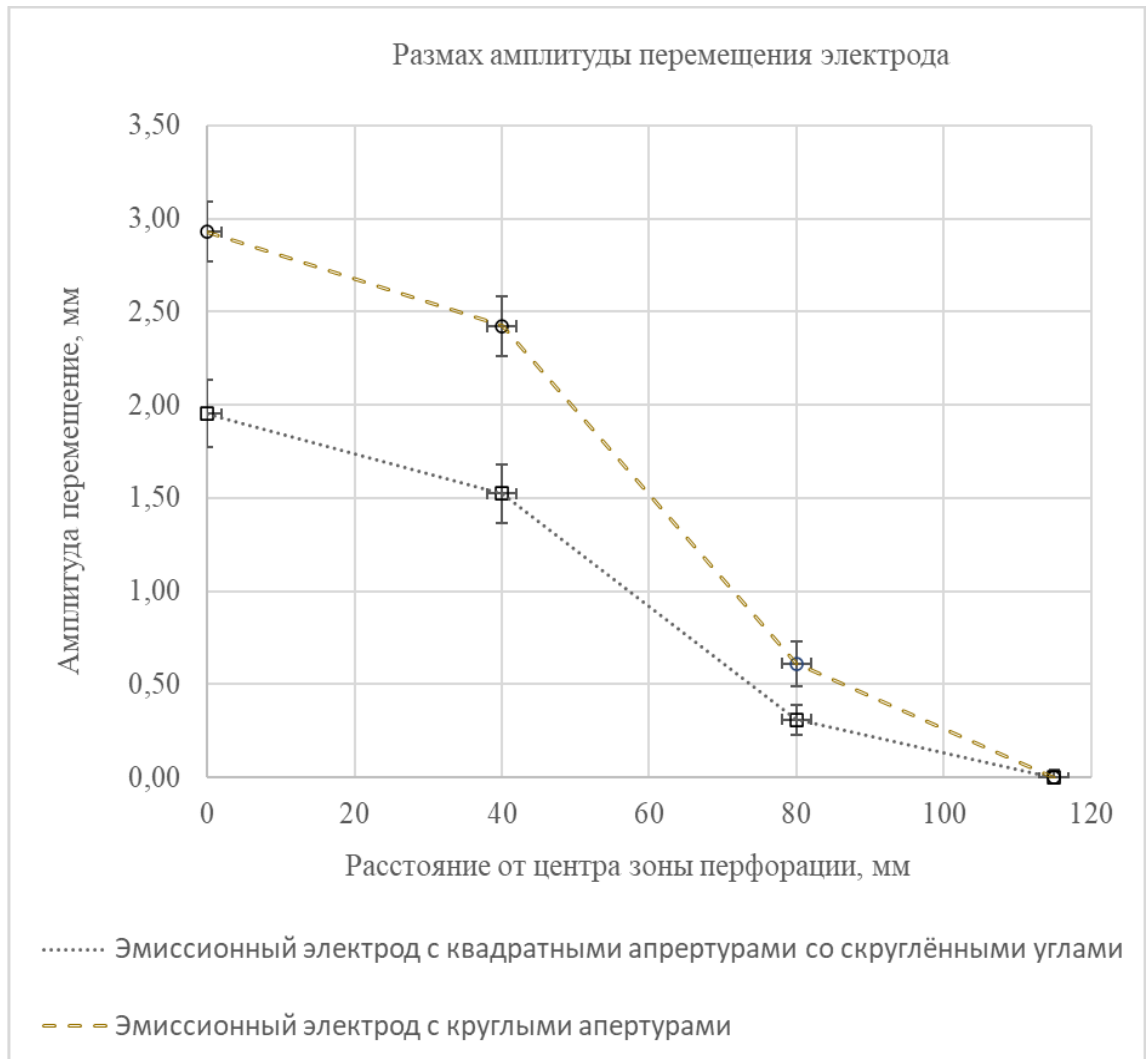


Рисунок 7: Результаты сравнительных вибрационных испытаний.

В пятой главе приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми апертурами и альтернативной ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами. Испытания проводились на ионном двигателе ИД-200. В номинальном режиме при работе на ксеноне двигатель имеет мощность 5 кВт, тягу 100 мН и удельный импульс 65000 м/с. Диаметр ИОС двигателя равен 200 мм. Испытания проводились на установке КВУ-90 Центра Келдыша.

Из-за того, что плотность плазмы и плотность ионного тока внутри ГРК существенно изменяется в радиальном направлении, для сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования была определена зависимость от радиуса плотности ионного тока, поступающего из объёма ГРК к внутренней поверхности ИОС.

Основной эксперимент по определению диапазонов первеанса ИОС состоял в измерении тока ионного пучка и тока ионов на ускоряющий электрод при изменении мощности разряда в ГРК и полного ускоряющего напряжения. Во всех экспериментах задавался фиксированный расход рабочего тела, равный 1.5 мг/с. Потенциал ускоряющего электрода фиксировался на уровне -430 В. Ток ионного пучка задавался путём регулировки мощности разряда в ГРК. При нескольких значениях полного тока пучка были измерены зависимости тока на ускоряющий электрод от величины потенциала эмиссионного электрода.

Результаты измерений, полученные при значениях токах пучка 0.25, 0.5, 0.75, и 1.0 А для ИОС с круглыми и с квадратными отверстиями со скругленными углами представлены на рисунке 9. На графиках видно, что экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами расчетов. Наблюдаемое отличие вызвано главным образом тем, что при моделировании не учитывались процессы перезарядки и ток вторичных ионов, поступающих на ускоряющий электрод из области нейтрализации пучка.

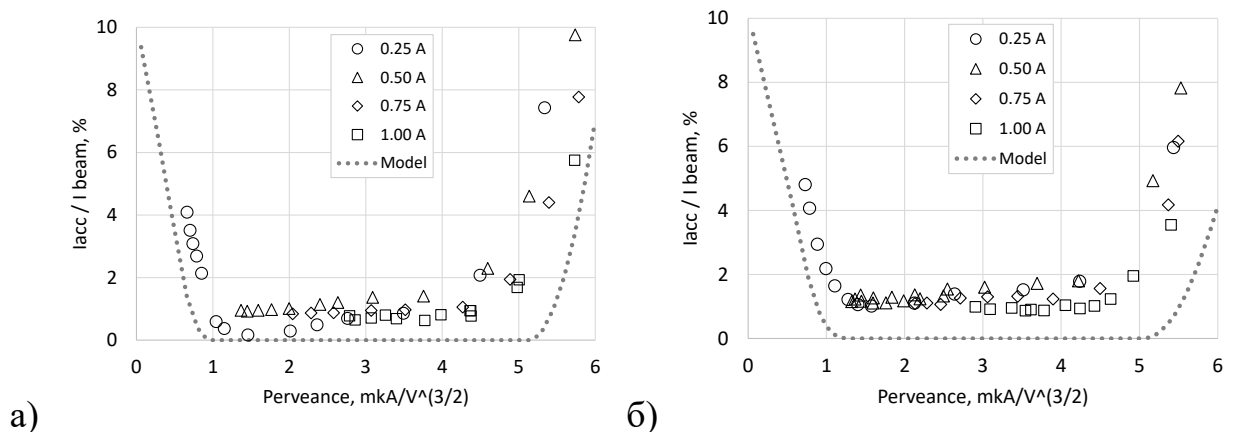


Рисунок 8: Отношение тока на ускоряющий электрод к току пучка в зависимости от первеанса: а) ИОС с круглыми апертурами; б) ИОС с апертурами в форме квадратов со скруглёнными углами

Заключение

В ЗАКЛЮЧЕНИИ диссертации обобщены полученные результаты и сформулированы следующие выводы:

1. Разработана ИОС нового типа с плоскими электродами ИОС из УУКМ с квадратными апертурами, обеспечивающая повышенную механическую прочность, при сохранении высоких функциональных характеристик, свойственных традиционным ИОС с круглыми апертурами.

2. Расчётным путём определены оптимальные параметры новой ИОС, при которых достигаются максимальный диапазон рабочих значений первеанса ИОС при минимальной прозрачности ИОС для потока атомов рабочего тела.

3. Отработана технология создания и сформированы основные требования к заготовкам из УУКМ для создания электродов ИОС. Отработана технология создания пластин толщиной менее 0,5 мм из УУКМ на основе однонаправленных лент.

4. Получены экспериментальные данные о плотности, пористости, теплопроводности и КЛТР для различных УУКМ отечественного производства, которые могут быть использованы при разработке новых перспективных ИОС с повышенными прочностными и ресурсными характеристиками.

5. Проведены сравнительные экспериментальные исследования, подтверждающие повышение жёсткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглой формы апертур к апертурам квадратной формы со скругленными углами.

6. Изготовлены опытные образцы плоских электродов, использованные при разработке ионного двигателя ИД-200КР с диаметром пучка 200 мм, с толщиной ЭЭ 0,5 мм и геометрической прозрачностью 0,63. Электроды успешно прошли огневые, вибрационные и ударные испытания.

7. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили широкий диапазон первеанса ИОС с квадратными апертурами и их близость к соответствующим диапазонам традиционных ИОС с круглыми апертурами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Мадеев С.В., Ловцов А.С., Лаптев И.Н., Ситников Н.Н. Определение эксплуатационных характеристик образцов конструкционных материалов из углерод-углеродного композита для электродов ионных двигателей // Композиты и наноструктуры. 2016. № 2. С. 140-150.
2. Shagayda A., Madeev S. Performance limits of ion extraction systems with non-circular apertures // Review of Scientific Instruments. 2016. Vol. 87. Issue 4. Article 043301. DOI: 10.1063/1.4945565.
3. Madeev S., Selivanov M., Shagayda A., Lovtsov A. Experimental study of ion optics with square apertures for high-power ion thrusters // Review of Scientific Instruments. 2019. Vol. 90. Issue 4. Article 043302. DOI: 10.1063/1.5090590.

Другие публикации:

4. Madeev S.V., Lovtsov A.S., Selivanov M.Yu. Experimental studies of an ion optics system with improved mechanical strength // 7th the European Conference for Aeronautics and Space Science (EUCASS), Milan, Italy, June 03-06, 2017. URL: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-139.pdf> (дата обращения 07.12.2020)
5. Мадеев С.В., Селиванов М.Ю., Шагайда А.А., Ловцов А.С., Бушуев С.В. Расчетно-экспериментальное определение коэффициента распыления углерод-углеродного композиционного материала по результатам ресурсных испытаний ионного двигателя ИД-200КР // Сб. тез. докл. 18-ой международной конф. «Авиация и космонавтика – 2019», 18-22 ноября 2019, Москва. – М.:МАИ, 2019. С. 61.