

Федеральное космическое агентство
Государственный научный центр Российской Федерации -
Федеральное государственной унитарное предприятие
«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

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»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Ловцов Александр Сергеевич

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Обзор ИОС с электродами из углеродных материалов.....	12
1.1 Эрозионные процессы в ИОС ИД	12
1.2 Способы замедления эрозии	15
1.3 Конструкторско-технологические решения при проектировании ИОС с электродами из углеродных материалов	18
1.3.1 Разработки Германии.....	19
1.3.2 Разработки Великобритании.....	22
1.3.3 Разработки США	24
1.3.4 Разработки Японии	40
1.3.5 Разработки Китая	44
Глава 2. Расчетные исследования рабочих диапазонов первеансов ионно-оптических систем с альтернативной формой апертур.....	46
2.1 Ограничения эксплуатационных характеристик ИОС с некруглыми апертурами	46
2.2 Численная модель	54
2.3 Расчёт традиционной ионно-оптической системы с круглыми апертурами	55
2.4 Моделирование ионно-оптических систем с некруглой формой апертур.....	58
2.5 Сравнение эффективности традиционной и альтернативной ионно-оптических систем	67
Глава 3. Технология изготовления электродов ИОС ИД.....	73
3.1 Изучение свойств УУКМ на технологических образцах.....	73
3.1.1 Измерение коэффициента линейного температурного расширения УУКМ..	73
3.1.2 Измерение коэффициентов теплопроводности.....	74
3.1.3 Измерение плотности и пористости материалов	76
3.2 Оценка возможности применения разработанных УУКМ в ИОС со сферическими электродами большого диаметра	79
3.3 Изготовление электродов для ионного двигателя ИД-200	85
3.4 Изготовление электродов для ионного двигателя ИД-200 КР.....	88
Глава 4. Сравнительные механические испытания электродов ИОС с различными схемами армирования из углеродных композиционных материалов.....	93
4.1 Механизмы разрушения электродов ИОС под действием вибрационных нагрузок.	93

4.2 Автономные вибрационные испытания ИОС из УУКМ с различными схемами армирования.....	96
Глава 5. Экспериментальные исследования рабочих диапазонов первеансов ионно-оптических систем с круглыми и квадратными апертурами.....	100
5.1 Ионно-оптическая система.....	100
5.2 Двигатель ИД-200	102
5.3 Экспериментальная установка.....	103
5.4 Распределение плотности ионного тока	103
5.5 Диапазоны первеанса.....	105
Заключение.....	109
Список сокращений и условных обозначений.....	111
Список литературы	112

ВВЕДЕНИЕ

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 [1-8]. Для решения указанных задач необходимы двигатели с экономичным расходом рабочего тела, обладающие удельным импульсом от 3000 с, а также ресурсом от 20000 ч [9-11]. 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 [12] 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 [13]. 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 [14], 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 [15].

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 [16]. Рабочим диапазоном первеанса ИОС называется диапазон значений плотностей ионного тока, вытягиваемого из ГРК, при котором нет прямого попадания вытягиваемых ионов на ускоряющий электрод. Попытки применения технологии навивки для сохранения неповрежденных нитей наполнителя в перемычках показали невозможность получения качественной формы отверстий [17-19].

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 (прозрачность ИОС для ионов, вытягиваемых из ГРК) 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.

Научная новизна

1. Разработана новая конструкция плоских электродов ИОС ИД из УУКМ с квадратными апертурами со скругленными углами.
2. Впервые 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. Впервые 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 и теоретическая значимость результатов работы

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. Отработана 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.

Реализация и внедрение результатов работы

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

Апробация работы и научные публикации

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 18-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, 2019). Результаты также отражены в отчетах Центра Келдыша для государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос».

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 5-и печатных работах.

Личный вклад соискателя

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, эффективной прозрачности для ионов, эффективной прозрачности для потока нейтральных атомов, высоты потенциального барьера, отражающего электроны пучковой плазмы, угловой расходимости элементарного пучка и скорости распыления поверхностей УЭ;

- отработка технологии изготовления электродов;
- формирование требований к заготовкам из УУКМ;
- анализ механизмов разрушения электродов ИОС под действием вибрационных нагрузок и последующее формирование критерия выбора между электродами с традиционными круглыми апертурами и электродами ИОС нового типа с квадратными апертурами со скругленными углами;
- подготовка и проведение автономных механических испытаний электродов с традиционной и альтернативной формами апертур;
- подготовка и проведение огневых испытаний ИОС с электродов из УУКМ с традиционными круглыми апертурами и ИОС нового типа с квадратными апертурами со скругленными углами для сравнения рабочих диапазонов первеансов.

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.

Во введении показана актуальность исследования, определены цели и задачи, сформулированы новизна и практическая значимость 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.

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

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

В пятой главе приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми апертурами и альтернативной ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами.

В заключении диссертации обобщены полученные результаты и сформулированы выводы.

Работа проведена при активном участии сотрудников отдела электрофизики федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша».

Основные результаты диссертации приведены в следующих работах:

1. *Мадеев С.В., Ловцов А.С., Лантев 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. and Madeev S.* Performance limits of ion extraction systems with non-circular apertures // *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87. Issue 4. Article 043301.
3. *Madeev S., Selivanov M., Shagayda A., and 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.
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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ИОС С ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Эрозионные процессы в ИОС ИД

Главным фактором, который ограничивает ресурс ИД, является эрозия ускоряющего электрода в результате ионного распыления. Даже в том случае, когда обеспечена правильная фокусировка ионных пучков, и все ионы, извлекаемые из ГРК, проходят через апертуру ускоряющего электрода, этот электрод подвергается бомбардировке вторичными ионами, возникающими в области ускорения и в пучковой плазме. Вторичные ионы образуются в результате резонансной перезарядки при столкновениях между первичными ионами и нейтральными атомами рабочего тела, выходящими из ГРК. Резонансная перезарядка – это процесс взаимодействия положительного иона с нейтральным атомом или молекулой газа, при котором один из электронов нейтральной частицы переходит к иону. Если при перезарядке ионов внутренняя энергия системы взаимодействующих частиц не меняется, то перезарядка называется резонансной. Примером такой симметричной резонансной перезарядки является обмен электроном между атомарным ионом и атомом того же элемента.

Вероятность перезарядки определяется эффективным сечением перезарядки, которое зависит от рода сталкивающихся частиц и их относительной скорости. Сечение перезарядки монотонно растёт с уменьшением скорости столкновения и при тепловых энергиях может значительно превышать газокинетическое сечение. При энергиях, характерных для ионов, ускоряемых в ионно-оптической системе, сечение перезарядки достигает 10^{-18} м². При столкновении перезарядки атом, движущийся с небольшой, тепловой скоростью, и быстрый ускоренный ион обмениваются одним или несколькими электронами, причём энергия самих частиц при таком столкновении изменяется незначительно. В результате образуются быстрый нейтральный атом, движущийся со скоростью, которую ион имел до столкновения, и медленный ион, имеющий начальную скорость, которую до столкновения имел атом. Медленные ионы притягиваются к ускоряющему

электроду, который находится под отрицательным потенциалом. Большая часть из этих ионов приобретает энергию, достаточную для распыления материала электрода.

Ионы перезарядки можно разделить на две группы [16]. К первой группе относятся ионы перезарядки, образующиеся в ускоряющем зазоре (рисунок 1а).

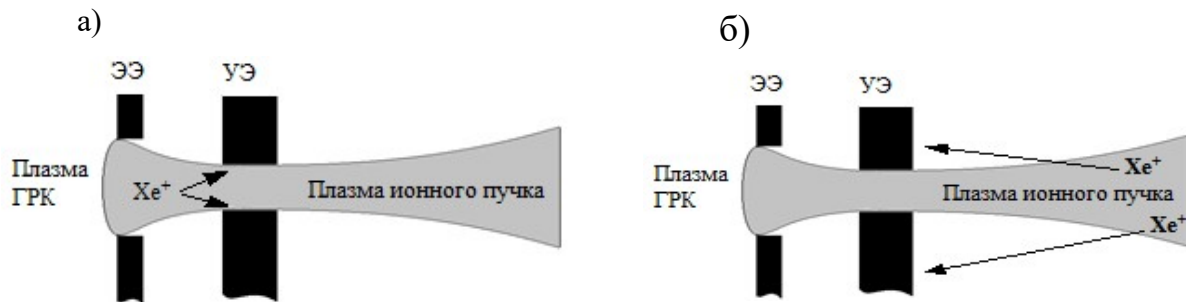


Рисунок 1 - Области возникновения ионов перезарядки и соответствующие зоны бомбардировки на примере двухэлектродной ИОС (ИОС состоящей из эмиссионного и ускоряющего электродов в виде двух густо перфорированных пластин и кольцевого замедляющего электрода).

Ионы этого типа бомбардируют внутреннюю поверхность отверстий УЭ, что приводит к увеличению их диаметров (рисунок 2) и, как следствие, ослаблению потенциального барьера, препятствующего попаданию в двигатель электронов из пучковой плазмы. Попадание электронов в двигатель приводит к критическому повышению тока в цепях источников питания, перегреву и температурным деформациям элементов двигателя [21-22]. Если высота потенциального барьера становится недостаточной для удержания электронов, необходимо увеличивать по модулю отрицательный потенциал электрода. Это приводит к увеличению энергии вторичных ионов,

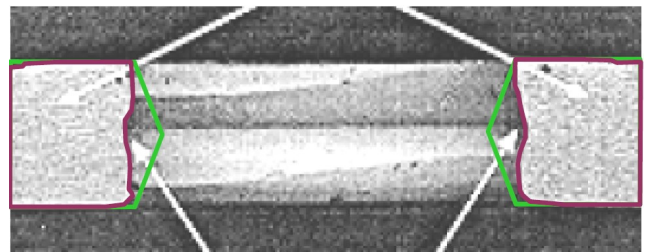


Рисунок 2 - Сечение центрального отверстия УЭ после 8200 часов ресурсных испытаний [20]. Начальная геометрия отверстия обозначена зеленой линией.

бомбардирующих электрод, и росту скорости распыления. Двигатель выходит из строя в тот момент, когда высота потенциального барьера при максимальном напряжении, которое способен обеспечить источник питания, становится недостаточна для удержания электронов.

Вторую группу составляют ионы, возникшие в процессе столкновения ионов и нейтральных атомов в пучковой плазме (рисунок 1б). Энергия ионов второй группы определяется потенциалом УЭ. Эти ионы бомбардируют главным образом внешнюю поверхность УЭ. Типичная картина этой эрозии [21-22] показана на рисунке (рисунок 3). Она характеризуется наличием сравнительно глубоких «ямок», расположенных в центрах между тремя соседними апертурами, и менее глубоких «канавок», пролегающих в перемычках между отверстиями.

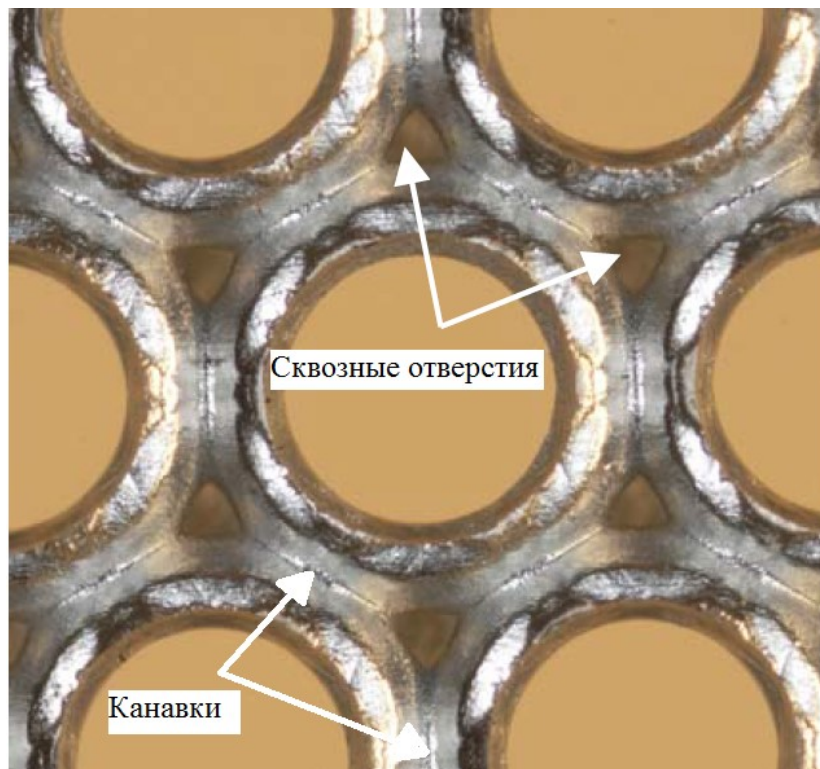


Рисунок 3 - Картина эрозии на поверхности УЭ, созданная ионами перезарядки из пучковой плазмы за 30352 часа [22].

Для оценки ресурса, обусловленного поверхностной эрозией, в настоящее время не существует единого подхода. Иногда в качестве признака окончания ресурса принимают момент, когда глубина «ямки» становится равна толщине

электрода, т.е. в ускоряющем электроде появляются сквозные отверстия. Однако известны результаты длительных ресурсных испытаний, в которых ИОС сохраняла работоспособность и после возникновения сквозных отверстий. Так, в процессе 30000-часовых наземных испытаний двигателя NSTAR, использовавшегося в программе США «Deep Space 1» [22], в ускоряющем электроде на месте «ямки» образовались сквозные отверстия. Внешний вид сквозных отверстий в ускоряющем электроде и характер его эрозии со стороны, обращённой к эмиссионному электроду, показаны на рисунке 3. Несмотря на появление сквозных отверстий двигатель сохранял свою работоспособность, так как высота потенциального барьера внутри отверстий была достаточна для отсечки электронов пучковой плазмы. Иногда более серьёзную опасность для ИОС представляют так называемые «канавки». Если их глубина сравнивается с толщиной ускоряющего электрода, то электрод будет разрушен.

1.2 Способы замедления эрозии

Существует несколько способов снижения скорости эрозии поверхностей ускоряющего электрода и увеличения ресурса ионно-оптической системы.

Во-первых, это снижение максимальной плотности ионного тока, поступающего к ИОС из объёма ГРК. Снижение плотности тока можно обеспечить повышением однородности радиального распределения плотности ионного тока перед ИОС, либо увеличением площади поперечного сечения пучка при сохранении полного тока пучка. Распределение плотности тока по радиусу определяется типом и режимом работы ГРК ИД. Повышение однородности радиального распределения плотности ионов перед ЭЭ приводит к более равномерному выгоранию нейтральных атомов рабочего тела по радиусу ГРК и препятствует ускоренной эрозии в центральной области УЭ.

Пример влияния радиального распределения плотности тока на скорость эрозии представлен в работе [23]. На рисунке 4 показаны радиальные распределения плотности тока пучка и глубин ямок эрозии на внешней поверхности УЭ двухэлектродной ИОС двигателя NSTAR. Из приведенного графика видно, что при снижении плотности тока ионного пучка к периферии

наблюдается уменьшение глубины ямок. Небольшое снижение глубины ямок в области на расстоянии от оси двигателя до 2 см скорее всего говорит о выгорании нейтральных атомов и как следствие снижении тока ионов перезарядки из пучковой плазмы.

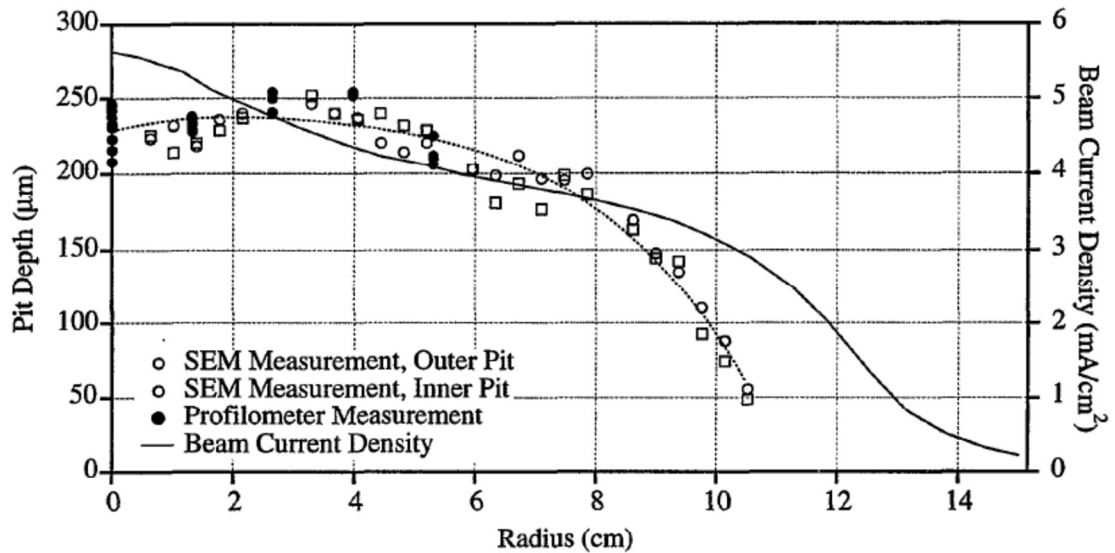


Рисунок 4 - Глубина ямок как функция от радиуса УЭ [23]. По левой оси ординат отложена глубина ямок в мкм, по правой – плотность тока пучка в mA/cm^2 , по оси абсцисс – расстояние от оси двигателя.

Увеличение площади вытягиваемого пучка приводит к росту массогабаритных характеристик двигателя и снижению механической прочности электродов ИОС.

Другим способом увеличения ресурса ИОС является использование трёх-электродной ИОС, включающей кроме ЭЭ и УЭ перфорированный замедляющий электрод (ЗЭ). ЗЭ располагается на пути ионов перезарядки, движущихся из пучковой плазмы в сторону УЭ, и препятствует распылению УЭ со стороны этой группы ионов. Поскольку ЗЭ находится под потенциалом близким к потенциалу плазмы пучка, энергия ионов перезарядки, бомбардирующих его внешнюю поверхность снижается, и, соответственно, существенно замедляется процесс поверхностной эрозии [13]. Однако, использование трёх-электродной ИОС не позволяет решить проблемы апертурной эрозии УЭ.

Одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса ИОС является

замена материала ускоряющего электрода на более эрозионно-стойкий. Скорость эрозии материала определяется объёмным коэффициентом распыления. Молибден и титан в течение долгого времени являлись наиболее употребительными материалами для изготовления электродов. Эти металлы обладают довольно низкой по сравнению со многими другими металлами скоростью ионного распыления, поддаются химическому травлению и механической обработке, посредством которых в них можно создавать массивы отверстий, обладают хорошими тепловыми и прочностными характеристиками. В настоящее время в связи с появлением задач, требующих от ионных двигателей повышенного ресурса, для изготовления электродов начинают использовать пироуглерод или композиты на основе углерода. Это обусловлено тем, что углеродные материалы обладают более высокой стойкостью к ионному распылению, чем большинство тугоплавких металлов.

На рисунке 5 приведены объёмные коэффициенты распыления материалов, используемых при создании УЭ ИОС, ионами Хе, падающими по нормали к поверхности мишени. Для примера можно отметить, что при энергии ионов ксенона 400 эВ они составляют для обычно используемых молибдена и титана $62 \cdot 10^{-3}$ мм³/Кл и $38 \cdot 10^{-3}$ мм³/Кл соответственно. Использование материалов на основе углерода позволяет снизить объёмный коэффициент распыления до $\approx 9 \cdot 10^{-3}$ мм³/Кл при той же энергии ионов ксенона [24-28]. Ранее проведенные исследования показали незначительное расхождение коэффициентов распыления для различных материалов на основе углерода [26-28]. Использование материалов на основе углерода позволяет существенно снизить скорость объёмного распыления поверхностей УЭ без добавления перфорированного замедляющего электрода [29].

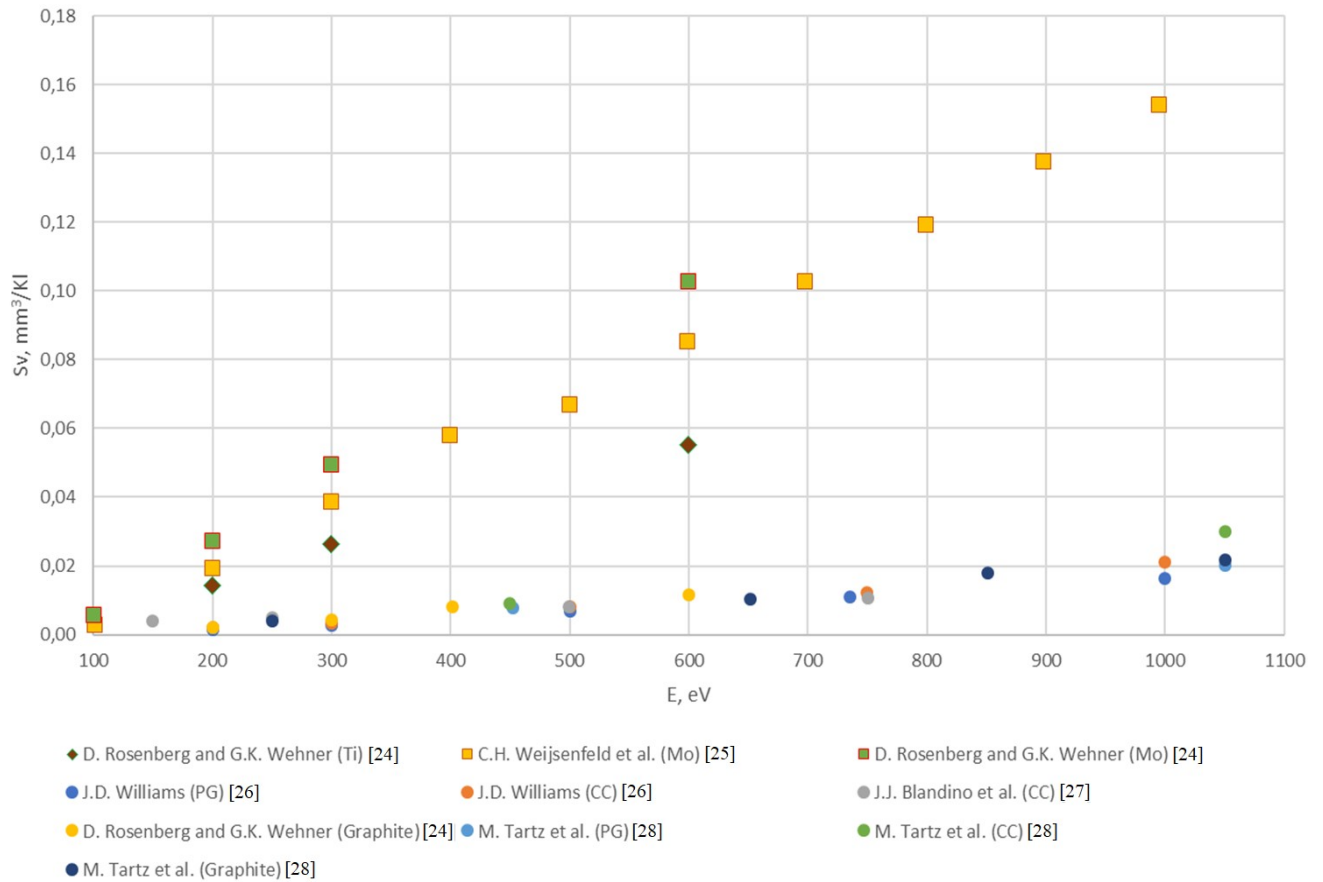


Рисунок 5 - Объёмные коэффициенты распыления материалов, используемых при создании электродов ИОС ИД, при бомбардировке Xe^+ по нормали к мишени. СС – углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), PG – пироуглеродный материал, Mo – молибден, Ti – титан. По оси ординат отложен объёмный коэффициент распыления S_v [mm^3/Kl], по оси абсцисс – энергия ионов ксенона E [eV].

1.3 Конструкторско-технологические решения при проектировании ИОС с электродами из углеродных материалов

Активное внедрение углеродных материалов в состав ионно-оптических систем ионных двигателей началось в начале 90-х годов прошлого века. При этом способы замедления эрозии комбинировались в целях обеспечения требуемого ресурса. Поскольку финансирование работ велось преимущественно по государственным грантам и контрактам, удобно проследить изменение подходов к проектированию узлов ИОС в зависимости от страны производителя.

1.3.1 Разработки Германии

Разработка ИД с ионизацией атомов рабочего тела в радиочастотном разряде (Radiofrequency Ion Thruster – RIT) началась в Гиссенском университете (Германия) в 60-х годах. После перехода работ на стадию ОКР было создано семейство двигателей RIT с диаметрами пучка от 9 см до 35 см.

До 1998 года все разрабатываемые двигатели RIT имели в составе ионно-оптической системы три перфорированных электрода. Наиболее известными двигателями малой и средней мощности с трех-электродными ионно-оптическими системами являются RIT-10 и RIT-15. В составе ИОС каждого из двигателей использовались плоские электроды. RIT-10 – единственный вч-ионный двигатель, который прошел летные испытания. Для обеспечения требуемого ресурса в составе ИОС RIT-10 использовался графитовый ускоряющий электрод [30].

Двигатель RIT-15 (рисунок 6) стал платформой для отработки технологии создания электродов ИОС из различных комбинаций материалов [31]. Результатов вибрационных испытаний этого двигателя в публикациях найти не удалось, но в работе [32] отмечается, что с увеличением диаметра зоны перфорации с 87 мм до 140 мм прочностные свойства графита перестали удовлетворять требованиям к электродам для RIT-15. Для сохранения ресурса и увеличения механической прочности графит был заменен на углерод-углеродный композиционный материал. В [33] отмечалось, что при использовании в составе ИОС плоского ЭЭ из молибдена под действием тепловых нагрузок вследствие температурного расширения происходило неконтролируемое изменение межэлектродного зазора. В худшем случае, это приводило к замыканию цепи ЭЭ - УЭ. Этот эффект можно было контролировать, используя сферические электроды, но их недостатком стало существенное увеличение стоимости изготовления. При создании ИОС RIT-15 (рисунок 7) было решено использовать материалы с малыми коэффициентами линейного температурного расширения (КЛТР) и обеспечивающие необходимую механическую прочность, что позволяло сократить стоимость и время изготовления.

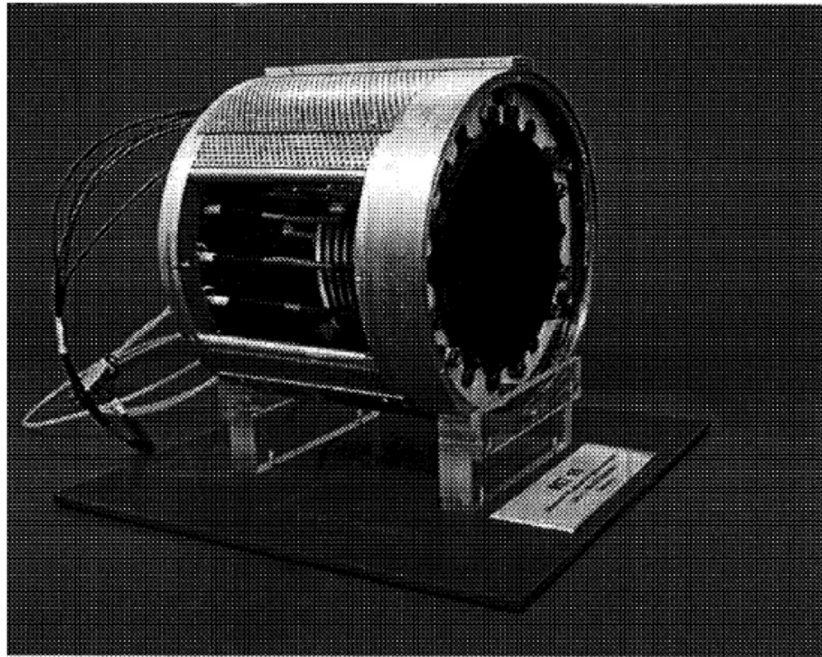


Рисунок 6 - RIT-15 инженерная модель.

В качестве материалов электродов ИОС RIT-15 были выбраны инвар и УУКМ. Критерием отбора стали низкие КЛТР этих материалов. Инвар был выбран в качестве материала эмиссионного и замедляющего электродов. В зависимости от толщины электрода выбирались различные технологии перфорации: химическое травление для электродов толщиной до 0,5 мм, для электродов толщиной более 0,5 мм – лазерная обработка. УУКМ показал незначительный отрицательный КЛТР в направлении слоя и незначительный положительный КЛТР в направлении перпендикулярном слою в рабочем температурном диапазоне электродов ИОС. Выбранный УУКМ обладал высоким модулем упругости и низким коэффициентом распыления. Электроды вырезались из пластин композиционного материала на лазерном станке. Также рассматривались варианты создания ЭЭ из УУКМ.

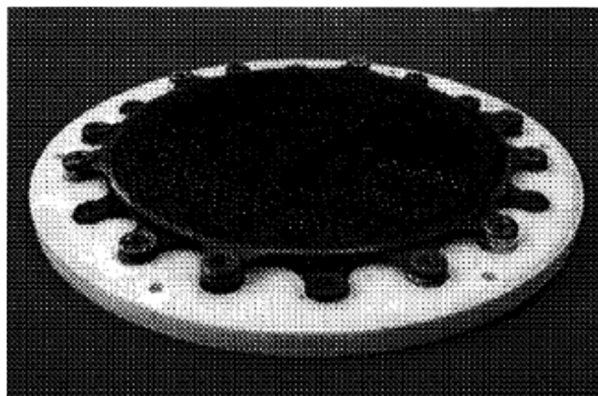


Рисунок 7 - Узел ИОС двигателя RIT-15 с электродами из УУКМ.

На последних моделях RIT-15 испытывались двухэлектродные системы с плоскими ЭЭ и УЭ из УУКМ. Данных о механических испытаниях электродов ИОС для RIT-15 найти не удалось. Результаты проведенных исследований способствовали переходу к двухэлектродным системам [32,33]. Трехэлектродные системы давали явное преимущество в виде защиты внешней поверхности ускоряющего электрода от распыления ионами перезарядки. Однако, двухэлектродные ионно-оптические системы дешевле в производстве и с меньшей вероятностью могут разрушиться под воздействием механических нагрузок. Разработчики RIT-15 рассматривали возможность возврата к трёхэлектродным системам при работе на высоких плотностях тока.

Одной из первых разработок ВЧ двигателей большой мощности стал RIT-35 [34] с трехэлектродной ИОС с диаметром пучка 33,5 см. Изначально была изготовлена ИОС с плоскими электродами из молибдена, но при повышении плотности тока начали проявляться температурные деформации, и было принято решение о переходе к сферической форме электродов. Для обеспечения необходимого ресурса в качестве материала УЭ рассматривался графит. Продолжение работа получила при создании двигателя ESA-XX на базе лабораторной модели RIT-35 [35]. Разработки двигателя начались в 1995. В проекте участвовали Великобритания, Германия и Италия. ИОС для двигателя разрабатывали и изготавливали в Великобритании по аналогии с ранее разработанной ИОС для двигателя с ионизацией в разряде постоянного тока UK-25 [36]. ИОС состояла из трех сферических молибденовых электродов, с направлением стрелы прогиба внутрь ГРК. Несмотря на то, что УЭ был изготовлен из молибдена, в [36] было отмечено, что проведенные расчетные исследования показали возможность повышения ресурса в 3-6 раз при замене материала ускоряющего электрода на графит.

Через 5 лет с начала работ над ESA-XX, в Германии началась разработка двигателя RIT-XT с диаметром пучка 21 см [31]. По сравнению с ESA-XX узел ИОС подвергся существенным изменениям. Рассматривались варианты как 3-х электродной, так и 2-х электродной ИОС. Выбор был сделан в пользу 2-х

электродной схемы из-за её простоты и прочности. Направление прогиба было изменено в сторону плазмы ионного пучка. В первом варианте сборки ИОС эмиссионный электрод был сделан из инварного сплава, а ускоряющий электрод из графита. Но, несмотря на то, что данная пара материалов хорошо зарекомендовала себя в составе RIT-10, материал эмиссионного электрода была заменен на молибден. Толщина эмиссионного электрода составила 0,25 мм, ускоряющего – 1,2 мм. Информации о вибрационных испытаниях двигателя RIT-XT не найдено.

1.3.2 Разработки Великобритании

В 1993 году в Великобритании стартовала программа по созданию двигательной установки T5 на основе двигателя UK-10 схемы Кауфмана (рисунок 8) для систем ориентации околоземных космических аппаратов [36]. Изначально для T5 проектировалась ионно-оптическая система с тремя сферическими молибденовыми электродами, стрела прогиба которых направлена в сторону ГРК [37]. Однако, из-за неготовности замедляющего электрода первые испытания проводились с двухэлектродной ИОС. В ходе испытаний определялись скорость распыления УЭ, угол расходимости пучка, вектор тяги и стабильность работы двигателя. Проведенные исследования двухэлектродной ионно-оптической системы показали невозможность обеспечить требуемый для миссии ARTEMIS ресурс. Однако, при анализе трёхэлектродной ИОС выяснилось, что основным ограничением ресурса является не механическое разрушение ИОС вследствие бомбардировки ионами перезарядки из плазмы ионного пучка, а апертурная эрозия УЭ, приводящая к ослаблению потенциального барьера, препятствующего попаданию электронов из плазмы ионного пучка в двигатель. Для решения данной проблемы рассматривались возможности изменения диаметров отверстий в электродах ИОС, а также возможность замены материала УЭ на более эрозионно-стойкий. В итоге было принято решение уменьшить диаметры отверстий в ускоряющем электроде, что привело к бомбардировке центральной области УЭ первичными ионами. Для предотвращения попадания первичных ионов на УЭ, диаметры отверстий в ЭЭ также были уменьшены.

Стоит отметить, что данное техническое решение было опубликовано в 1997 году. В 1998 в работе [38] приведены оценки ресурса УЭ, указывающие на

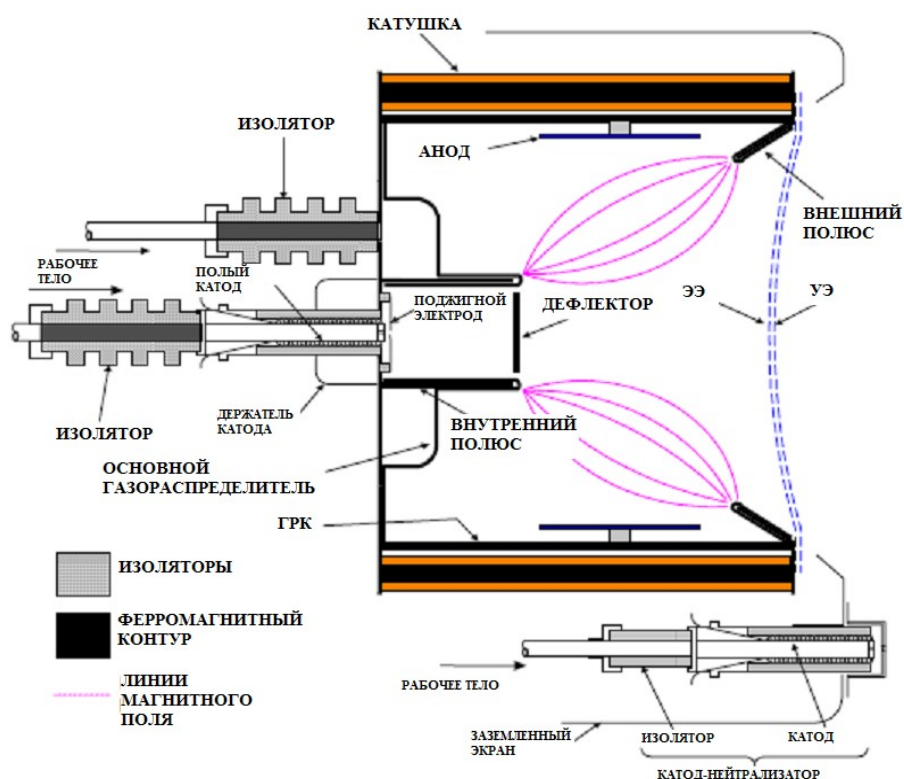


Рисунок 8 - Схема ионного двигателя постоянного тока по схеме Кауфмана на примере двигателя Т5.

преимущества использования углеродных материалов по сравнению с молибденом. В 2001 году при подготовке двигателя Т5 к миссии GOCE [2] было проведено численное моделирование узла ИОС, по результатам которого решение было принято в пользу двухэлектродной системы, оптимизированной для возможности дросселирования тяги в диапазоне от 1 до 20 мН. Для обеспечения ресурса ИД материал УЭ был изменен с молибдена на графит.

Успех миссии GOCE дал основания для выбора ИД Т6 в качестве маршевого двигателя для аппарата VeriColombo, предназначенного для исследования Меркурия [39] (рисунок 9). Мощность двигателя Т6 составляла 5 кВт, диаметр пучка 22 см. Ионно-оптическая система двигателя Т6 спроектирована в соответствии с принятыми модификациями узла ИОС двигателя Т5 на аппарате GOCE. Электроды ИОС Т6, также, как и в Т5, имели сферическую форму, стрела

прогиба была направлена внутрь ГРК, ЭЭ выполнен из молибдена, УЭ – из аморфного графита.

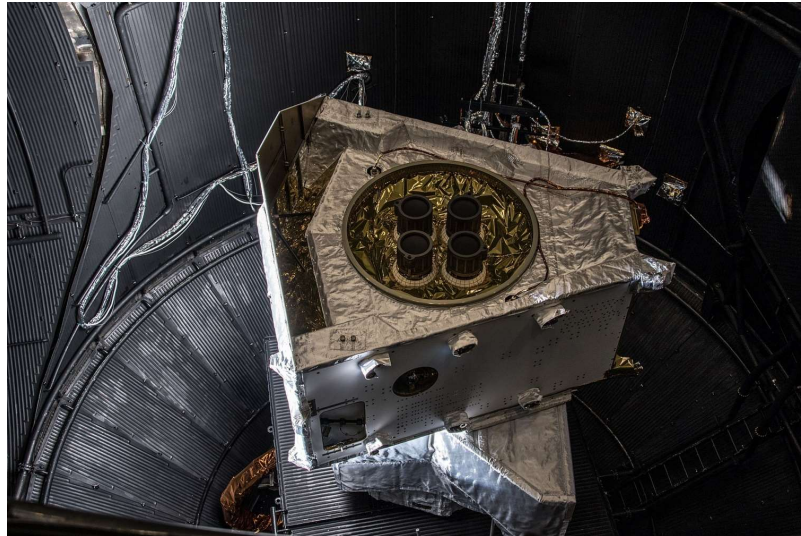


Рисунок 9 - Двигательный модуль VeriColombo в большом космическом симуляторе в ESTEC. Двигательная установка состоит из 4-х двигателей Т6.

Аппарат VeriColombo был запущен в 20 октября 2018 года и на сегодняшний день успешно завершил первый гравитационный маневр на пути к Меркурию.

1.3.3 Разработки США

ИД диаметром 15-см

Первые публикации о возможности использования материалов на основе углерода в составе ионно-оптических систем появились в США 1992 году [40]. В работе изучалась возможность повышения плотности тяги ионных двигателей при фиксированном удельном импульсе. Факторами, препятствующими повышению плотности тяги, были скорость эрозии ускоряющего электрода и температурные деформации электродов, изменяющие величину межэлектродного зазора и нарушающие соосность отверстий в области вытягивания пучка. Скорость эрозии поверхностей УЭ возрастала по мере увеличения плотности тяги, а температурные деформации стали результатом неравномерного прогрева электродов из-за неоднородного радиального распределения теплового потока из ГРК. Решением вышеуказанных проблем стала замена молибденовых электродов ИОС на

электроды из углеродных материалов. Одной из первых исследовалась возможность создания электродов ИОС из углерод-углеродных композиционных материалов.

В 1992 году технология создания электродов из УУКМ была не отработана. Работы по поиску решения технологических проблем начались с создания электродов с диаметром пучка 15-см с 529 отверстиями в области вытягивания пучка (рисунок 10) [40].

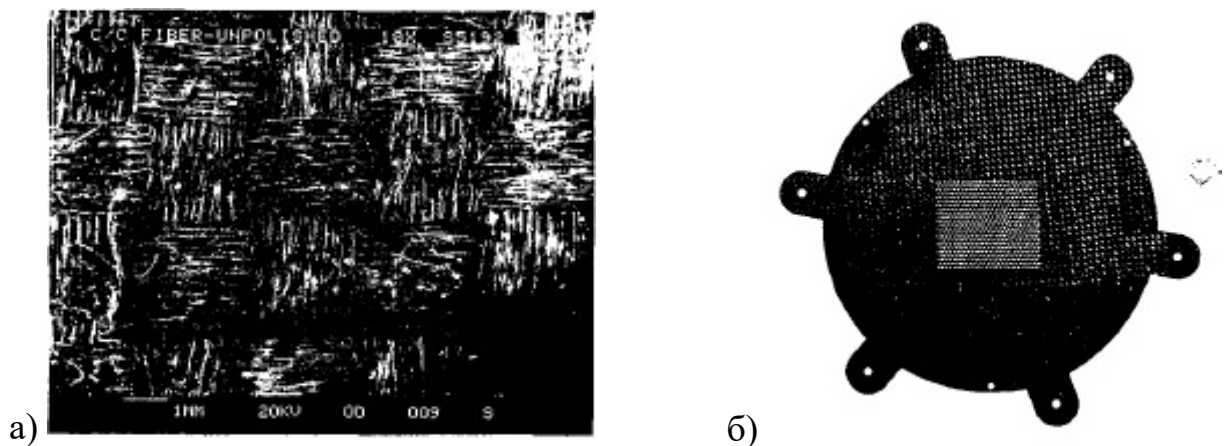


Рисунок 10 - а) фотография двунаправленной ткани наполнителя, б) фотография эмиссионного электрода из УУКМ диаметром пучка 15-см с 529 отверстиями и 6-тью крепежными ушами.

В качестве наполнителя для заготовок из композиционного материала были выбраны высокомодульные волокна. Волокна объединялись в нити, из которых ткалась двунаправленная ткань наполнителя. Полученная ткань пропитывалась фенольной смолой. Из полученных препрегов формировалась пластина. Поскольку промышленного производства изделий подобной формы не было, изготовитель оставлял припуск по толщине для механической обработки заготовок в размер и обеспечения заданной плоскостности. После выкладки препрегов, заготовки проходили этапы полимеризации, карбонизации и пироуплотнения путем осаждения углерода из газовой фазы. Плотность заготовок составила $1,69 \text{ г/см}^3$. Заготовка толщиной 1 мм состояла из 3 монослоев, средний слой был ориентирован

под углом 45° к двум соседним для обеспечения повышенной жёсткости на сдвиг. Формирование отверстий в заготовках осуществлялось на электроэрозионном станке с точностью $\pm 0,025$ мм. Однако, из-за высокой стоимости рассматривались альтернативные способы создания отверстий.

Исследования механических свойств неперфорированных заготовок показали, что пределы прочности и модули упругости пластин при растяжении вдоль направления укладки нитей ниже, чем соответствующие характеристики наполнителя. Приведенные в работе данные об изменении модуля упругости и предела прочности на изгиб после перфорации показывают, что при достижении геометрической прозрачности 63% оба показателя уменьшаются на 64% и 84% соответственно. Снижение механических характеристик объяснили большим количеством перезаных волокон после перфорации заготовки. Также в работе приведены измерения КЛТР, подтверждающие снижение данного параметра по сравнению с молибденом.

Предел прочности и модуль упругости композита определяется не только модулем упругости волокон/нитей наполнителя, но также объёмной долей волокон в композите и количеством волокон, направление укладки которых совпадает с направлением приложения нагрузки. В целях повышения модуля упругости наполнитель был заменен с двунаправленной ткани на однонаправленные ленты [15]. Однонаправленные ленты пропитывались фенольной смолой для получения препрегов, затем в заготовке монослой были ориентированы $[0^{\circ}/+60^{\circ}/-60^{\circ}/-60^{\circ}/+60^{\circ}/0^{\circ}]$. Толщина монослоя уменьшилась с 0,34 до 0,08 мм. Таким образом была повышена объёмная доля волокон и увеличено количество неповрежденных нитей в перемычке между отверстиями.

Также в работе [40] были представлены результаты сравнительного экспериментального исследования коэффициентов распыления УУКМ и молибдена. Образцы материалов закреплялись перед катодом ГРК ионного двигателя. Двигатель работал без вытягивания пучка. Энергия ионов, бомбардирующих образцы, составляла 100 эВ. В качестве РТ использовалась смесь азота и аргона. Результаты исследований показали, что коэффициент объёмного

распыления УУКМ всего на 25% ниже, чем у молибдена. Авторы объяснили данное явление присутствием азота, который мог замедлить скорость распыления молибдена [41]. Подробная история сравнительных экспериментальных исследований коэффициентов распыления УУКМ и молибдена представлена в [42]. В работе учтен опыт ранее проведенных исследований и представлены результаты новых измерений, подтверждающих снижение скорости эрозии при переходе от молибдена к УУКМ в 8 – 9 раз.

Проблему снижения механической прочности электродов ИОС из УУКМ после перфорации пробовали решить путем перехода к новой форме апертур в виде продолговатых щелей (рисунок 11) [43].

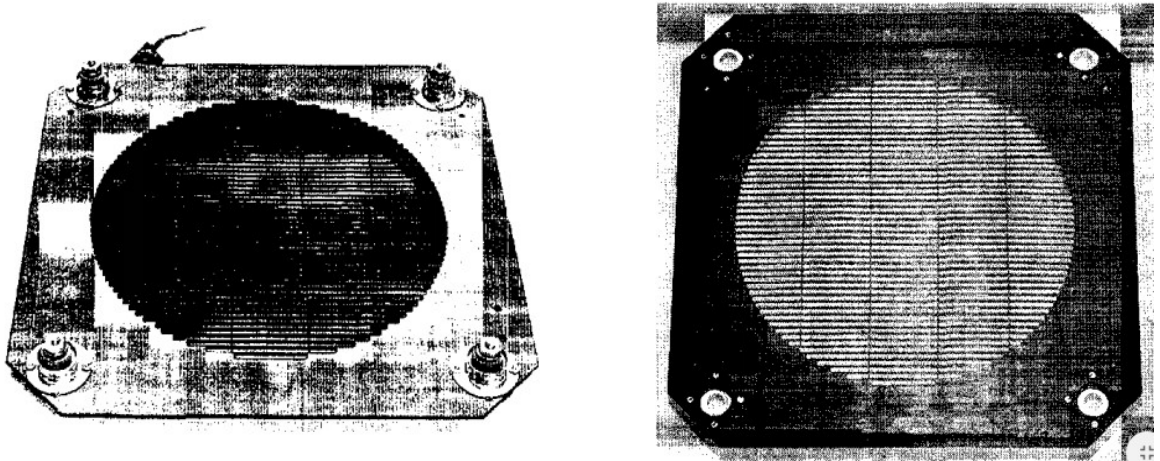


Рисунок 11 - Щелевые электроды ИОС 15-см ионного двигателя.

В ходе отработки технологии изготовления создавались заготовки с различным количеством слоев. Слои в заготовках выкладывались под углами $0^{\circ}/90^{\circ}$ относительно друг друга. Первая часть нитей шла вдоль перемычек, вторая – поперёк. В результате появился набор образцов, в которых менялось количество слоев, идущих вдоль перемычек. Измерения модулей упругости на изгиб у образцов показали, что данный параметр зависит исключительно от количества слоев, направленных вдоль перемычки. Проведенные измерения подтвердили предположения о том, что сохранение неповрежденных волокон в перемычках между отверстиями повышает жёсткость конструкции.

Для предотвращения прямого попадания первичных ионов на ускоряющий

электрод, концы щелей в ускоряющем электроде были выполнены в форме “собачья косточка” (рисунок 12). Однако, в процессе огневых ИОС с щелевыми апертурами показали существенное снижение диапазона первеанса по сравнению с ранее испытанными ИОС с круглыми апертурами.

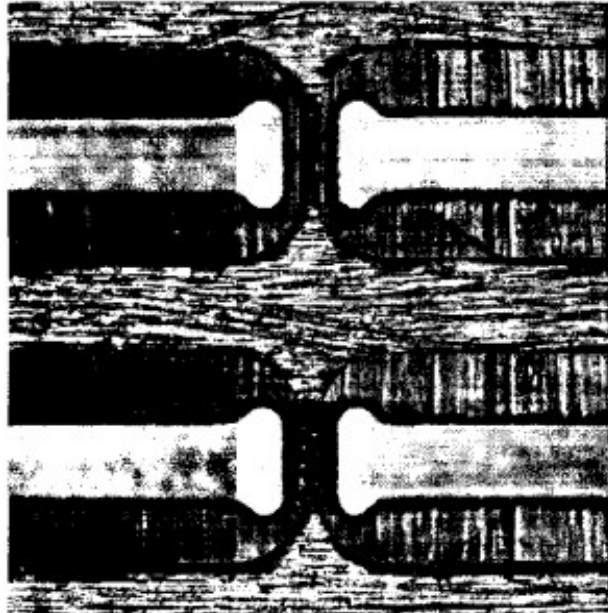


Рисунок 12 - Сборка щелевой ИОС, на которой видна форма концов щелей УЭ в форме “собачья косточка”.

ИД SIT-8

Электроды из УУКМ.

В 1999 в Glenn Research Center (GRC) была инициирована работа по созданию электродов ИОС из УУКМ для ионного двигателя SIT-8 (Structurally Integrated Thruster). Планировалось сохранить неповрежденные волокна в перемычках между отверстиями по аналогии с реализованной в Японии технологией. ИОС состояла из двух плоских электродов с диаметром зоны перфорации 8-см. В ходе отработки технологии создавались сборки ИОС с двумя типами электродов. В первом типе отверстия в области зоны перфорации имели круглую форму и располагались в узлах гексагонального паттерна, во втором типе отверстия были также круглыми, но располагались в узлах квадрата. Волокна выкладывались на графитовом сердечнике между пинами, а затем сборка проходила несколько циклов уплотнения. В результате данная технология не позволила получить качественных

изделий: на всех заготовках наблюдались расслоения, и ориентация многих волокон относительно направления выкладки была нарушена. Попытки использовать выплавляемые пины также не увенчались успехом. Общий вид электродов из УУКМ для SIT-8 приведен на рисунке 13 [17].

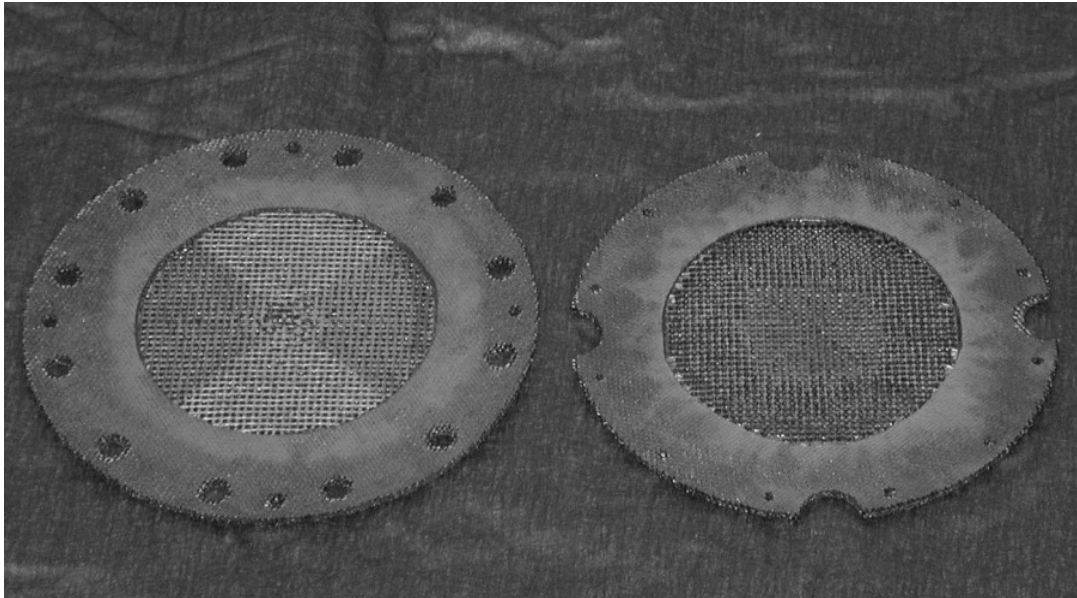


Рисунок 13 - Электроды из УУКМ для двигателя SIT-8.

В 2002 году были проведены исследования, по результатам которых была скорректирована технология изготовления электродов из УУКМ [44]. Технология представляла собой следующую последовательность технологических операций: 1) выкладка препрегов; 2) карбонизация и пироуплотнение; 3) обработка на лазере; 4) создание поверхностного слоя. Были созданы две сборки ИОС с плоскими и сферическими электродами. Сборка SIT-8 с плоскими электродами представлена на рисунке 14. Обе сборки успешно прошли огневые и вибрационные испытания [45].



Рисунок 14 - Сборка SIT-8 с плоскими электродами из УУКМ.

Электроды из пироуглерода.

В 2001 в GRC была инициирована работа по созданию электродов для двигателя SIT-8 из пироуглерода. Выбор материала электродов ИОС был мотивирован наличием отработанной технологии создания изотропного пиролитического углерода и возможностью формировать отверстия посредством механической обработки. Кроме того, пиролитический углерод обладает практически максимально возможной для углеродных материалов плотностью и минимальной пористостью. Электроды из пироуглерода для двигателя SIT-8 (рисунок 15) были успешно изготовлены [46].

В работе [47] приведены результаты успешных огневых испытаний, однако, данных о пройденных вибрационных испытаниях найти не удалось.

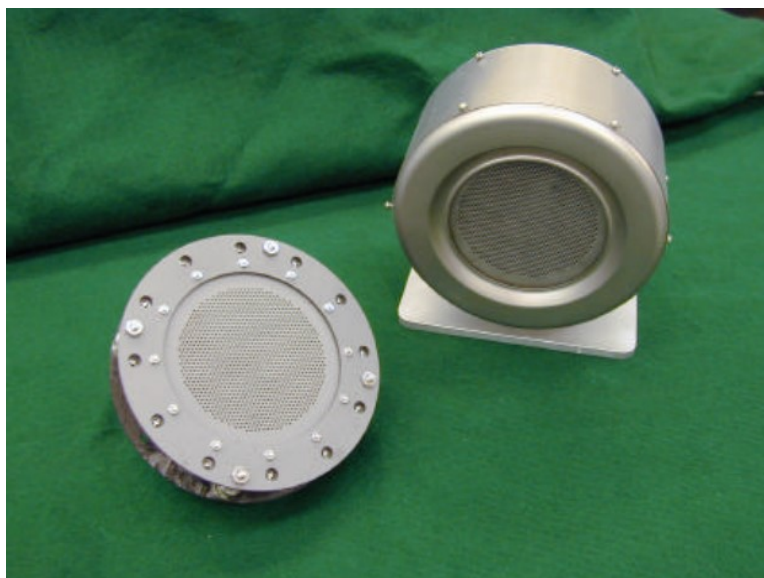


Рисунок 15 - Электроды из пиролитического углерода в составе ИОС и в составе SIT-8 [46]

ИД NSTAR

В рамках программы CBIO (Carbon Based Ion Optics) проводились сравнительные расчетно-экспериментальные исследования двух типов углеродных материалов для ИОС ИД: УУКМ и пироуглерод.

Компания Boeing Electron Dynamic Devices, Inc. разработала 8 см и 30-см ИОС из пироуглерода, испытания проводились в GRC. Альтернативную технологию изготовления электродов из УУКМ разрабатывала и тестировала Лаборатория Реактивного Движения (Jet Propulsion Laboratory (JPL)). Разработка электродов ИОС из углеродных материалов для 8 см двигателя (SIT-8) представлена в предыдущем разделе.

Каждая 30-см ИОС должна была пройти огневые и вибрационные испытания в соответствии с требованиями к двигателю NSTAR миссии DS1. Далее следовали повторные огневые испытания для подтверждения эксплуатационных характеристик после механического воздействия. По результатам испытаний отбиралась одна из технологий. Затем на стендах JPL проводились 2000 ч ресурсные испытания для исследования процессов эрозии электродов ИОС. Информация собиралась Государственном Университете Колорадо для верификации расчетных моделей ресурса ИОС. По завершению ресурсных

испытаний из выбранного углеродного материала изготовили ИОС с диаметром зоны перфорации 40-см NEXT [48].

Изначально в GRC совершались попытки создания плоских электродов из пироуглерода. Заготовки электродов ИОС из пироуглерода изготавливались методом осаждения из газовой фазы. В вакуумную камеру подавался углеводородный газ (метан), на входе он нагревался до температуры диссоциации молекул метана на водород и углерод. Атомы углерода осаждались на сердечник заданной формы, послойно формируя заготовку по толщине. После механической обработки, которая проводилась для достижения заданной толщины заготовки, проводилась высокотемпературная обработка при температуре выше, чем температура получения материала [48]. Однако, из-за малого модуля упругости пироуглеродного материала при подаче высокого напряжения зазор между плоскими ЭЭ и УЭ моментально уменьшался, что существенным образом усложнило работу с двигателем. Поэтому был совершен переход к электродам сферической формы (рисунок 16), что позволило существенно повысить жесткость конструкции. В процессе сверления заготовки разрушились некоторые перемычки на периферии области перфорации. В худшем случае выпадала перемычка, образуя треугольник из трех отверстий.

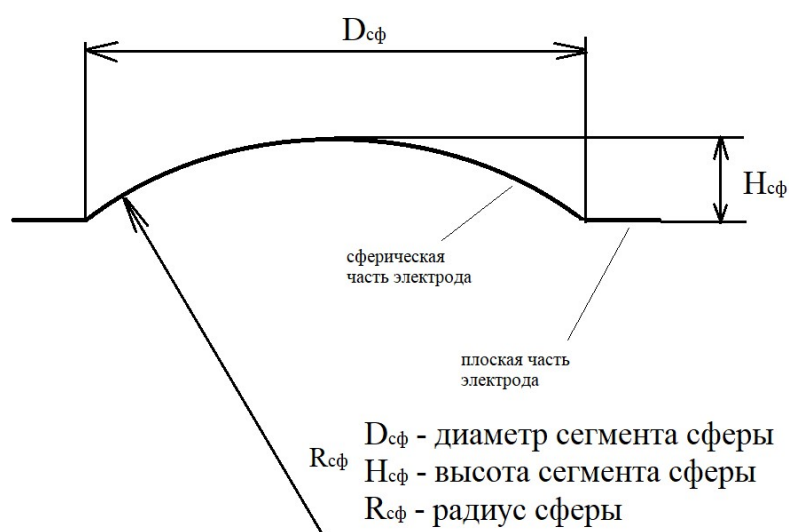


Рисунок 16 - Схема электрода сферической формы.

В целях повышения жёсткости конструкции электроды закреплялись на кольцах из пироуглерода, а затем на изоляторные узлы монтажного фланца. При креплении на изоляторных узлах была реализована плавающая посадка, что позволило избежать изменения межэлектродного зазора и нарушения соосности апертур при переходе из холодного состояния в горячее. Электроды из пироуглерода прошли вибрационные испытания. В ходе вибрационных испытаний происходили соударения электродов, но после осмотра существенных повреждений электродов обнаружено не было. Для предотвращения соударений и разрушения перемычек во время сверления были увеличены толщины электродов и уменьшены диаметры отверстий в зоне перфорации ЭЭ. Предварительный расчетный анализ вибрационного воздействия показал, что для электродов заданной геометрии из пироуглеродного материала в известном спектре частот перемещения будут меньше величины зазора между электродами, что позволит избежать их взаимного соударения. На вибрационных испытаниях было подтверждено отсутствие соударений между электродами [49].

Также в рамках программы СВЮ в JPL проходили испытания 30-см ИОС для двигателя NSTAR с электродами из УУКМ. Электроды ИОС имели сферическую форму и изготавливались из однонаправленных лент на основе высокомодульных волокон. Соседние монослои были ориентированы друг относительно друга по схеме $[0^\circ/+60^\circ/-60^\circ]$. Также в технологический процесс после заключительной стадии пироуплотнения был добавлен этап графитации (высокотемпературная обработка при температуре более 2000°C в инертной среде). Отверстия в заготовках прожигались на лазерном станке. Основная проблема при создании сферических электродов ИОС из УУКМ заключалась в контроле радиуса сферы. На первом этапе электроды были повернуты стрелой прогиба в сторону ГРК для сохранения требуемого зазора в центральной области зоны перфорации по причине отклонений от заданного радиуса сферы (рисунок 17) [50].

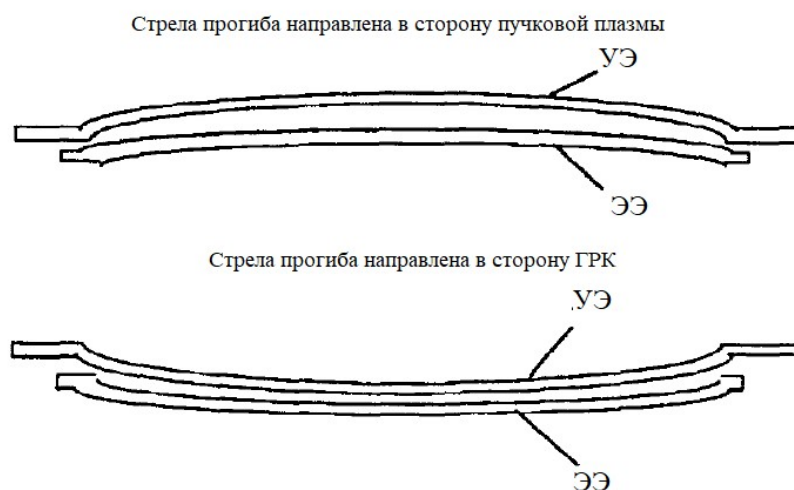


Рисунок 17 - Изменение направления стрелы прогиба электродов ИОС из-за отклонений от заданного радиуса сферы.

Проблема отклонения радиуса сферы от заданного была решена подбором технологических режимов. Также для повышения плоскостности обода электрода, имеющего форму плоского кольца, в конструкцию был добавлен двухстенный цилиндрический фланец. Сферические электроды из УУКМ прошли огневые испытания, однако, в ходе вибрационных испытаний произошло разрушение электродов [51]. Авторы предположили, что причиной разрушения стали соударения между электродами. В дальнейшем, чтобы обеспечить отсутствие соударений между электродами, повышалась их жёсткость путем уменьшения радиуса сферы. На рисунке 18 приведены результаты моделирования показывающие, как с уменьшением радиуса сферы (увеличение высоты сегмента сферы) амплитуда колебаний электрода становится меньше величины межэлектродного зазора.

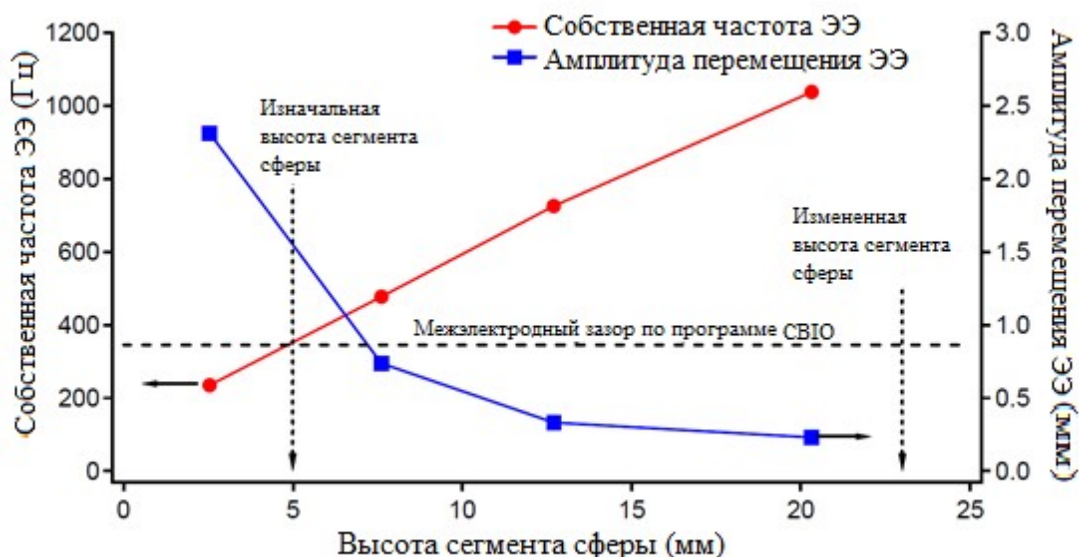


Рисунок 18 - Влияние высоты сегмента сферы на амплитуду перемещения.

Вибрационные испытания сферических электродов из УУКМ с новой высотой сегмента сферы проводились по отдельности. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал отличия в 1-ой резонансной частоте не более 2,3%, что может быть связано со слабой адгезией акселерометров к электроду в ходе испытаний.

Двигатель NEXIS

В рамках программы «Прометей» был разработан двигатель Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) мощностью до 27 кВт, удельным импульсом до 8700 с и тягой до 0,517 Н с диаметром пучка 570 мм. В проекте отрабатывалась технология создания электродов ИОС из УУКМ. Для лабораторной модели двигателя были изготовлены плоские электроды из УУКМ (рисунок 19) [52]. При разработке узла ИОС использовались данные, полученные в ходе работ над ИОС с электродами из УУКМ для двигателя NSTAR. Подробно технология создания электродов для двигателя NEXIS представлена в работе [53].

Инженерная модель двигателя

Лабораторная модель двигателя

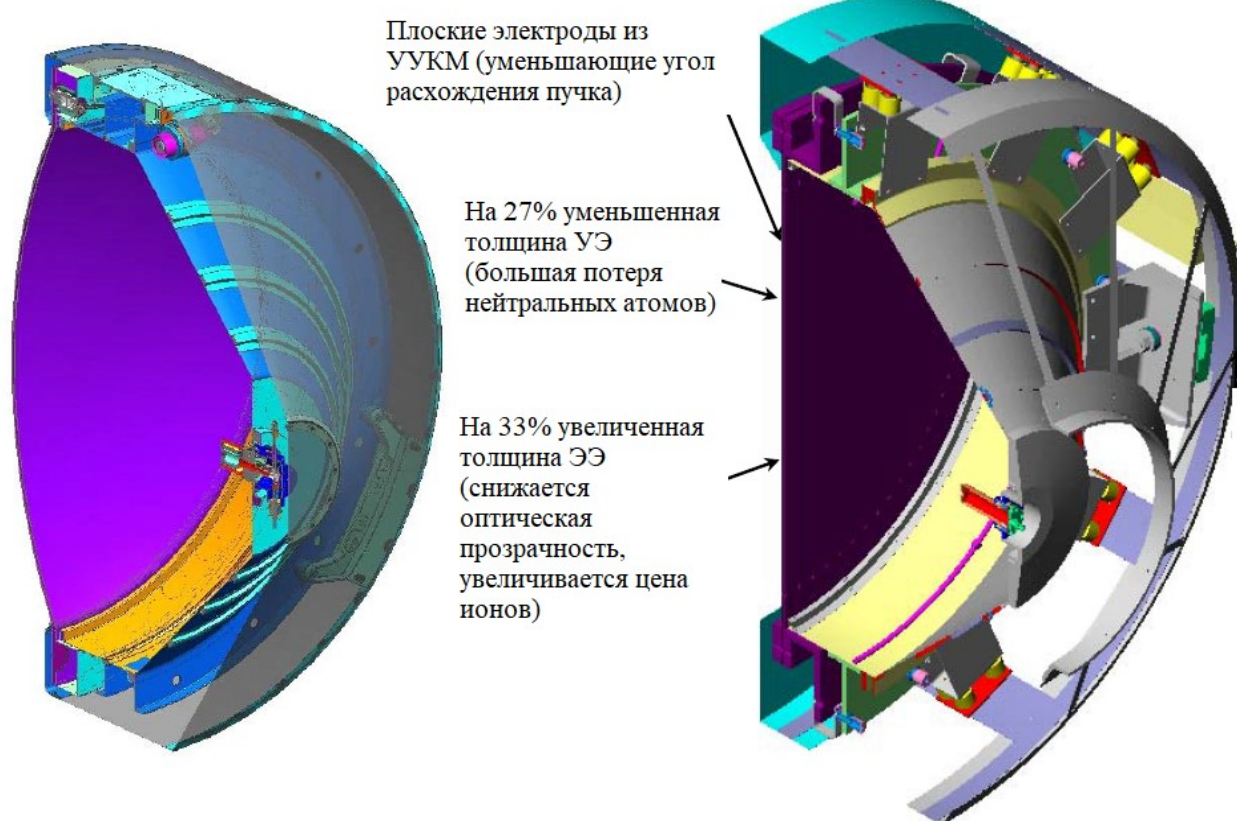


Рисунок 19 - Инженерная и лабораторная модели двигателя NEXIS.

Лабораторная модель двигателя создавалась для подтверждения характеристик газоразрядной камеры и правильности выбора конструкции ИОС. После огневых испытаний был проведен анализ узла ИОС. Было принято решение заменить плоские электроды на сферические. Данная замена приводила к увеличению угла расходимости ионного пучка и, как следствие, снижению тягового КПД. Однако, сферическая форма позволяла сохранить целостность электродов под воздействием стартовых вибрационных нагрузок. Снижение эффективности работы двигателя при переходе от плоских электродов к сферическим компенсировалось увеличением толщины УЭ, что повысило газовую эффективность, и уменьшением толщины ЭЭ, что привело к увеличению эффективной прозрачности ИОС для ионов и, как следствие, снижению цены иона.

Предположение о возможном разрушении плоских электродов было сделано на основании структурного анализа, по результатам которого в ходе воздействия

стартовых нагрузок происходит соударение между электродами. В анализе использовались усредненные значения демпфирования, учитывалась анизотропия УУКМ, а также геометрическая прозрачность электродов ИОС. Результаты структурного анализа определили значения высоты сферической части и толщин электродов, для обеспечения необходимой жёсткости и целостности крепежного фланца.

Двигатель NiPER

NiPER – ИД постоянного тока мощностью 25 кВт, спроектированный в GRC в рамках проекта ЛМО (Jupiter Icy Moon Orbiter). Отличительной особенностью NiPER является ГРК прямоугольного сечения (рисунок 20). [54].

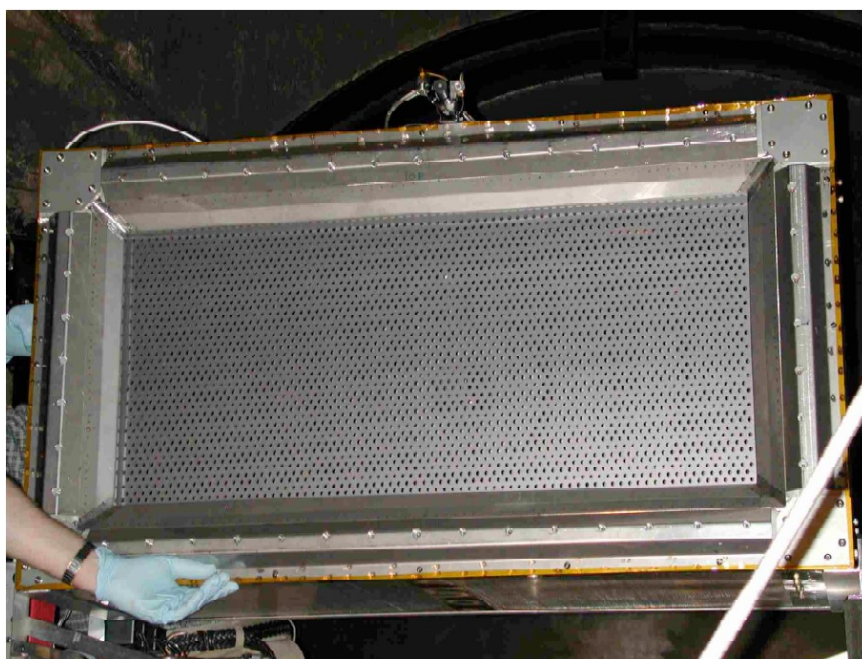


Рисунок 20 - Двигатель NiPER с плоскими электродами из пироуглерода.

Область зоны перфорации электродов ИОС представляет собой прямоугольник со сторонами 410x910 мм. Подобные габаритные размеры обеспечивают требуемый уровень тяги двигателя при низких значениях плотности тока ионов, поступающих из ГРК. Снижение плотности тока позволяет замедлить скорость эрозии УЭ, тем самым обеспечив требуемый ресурс. Однако, подобное техническое решение приводит к необходимости создания сложных демпфирующих систем (рисунок 21), снижающих вибрационное воздействие стартовых вибрационных нагрузок [55].

Проведенный структурный анализ электродов из пироуглерода для двигателя HiPER [56] показал, что при использовании выгнутых электродов увеличивается жесткость конструкции (по сравнению с плоскими электродами), что предотвращает межэлектродные соударения в ходе вибрационных нагрузок. Однако, возникающие при изгибе внутренние напряжения в электродах могут привести к их разрушению.

Плоские электроды ИОС из пироуглерода, несмотря на вероятные соударения, выдержат ожидаемую стартовую нагрузку в составе КА. [57].



Рисунок 21 - Демпфирующие системы ИОС двигателя HiPER [55].

ИОС диаметром 75-см

Двух-электродная ИОС диаметром 75 см разрабатывалась в рамках программы Cross Enterprise Technology Development Program (CETDP) для двигателя с электрической мощностью 30 кВт и удельным импульсом 14000 с. [58]. Для обеспечения ресурса двигателя в качестве материала электродов был выбран УУКМ.

При конструировании узла ИОС использовались уже отработанные методики на ИОС из УУКМ диаметром 30-см для двигателя NSTAR, и на ИОС из УУКМ для двигателя NEXIS. Однако, в технологическую цепочку по созданию электродов

ИОС были внесены некоторые изменения:

- при создании препрегов использовалось недорогое низкомодульное волокно. Изменение модуля упругости происходило после этапа графитации;
- использовались однонаправленные ленты для повышения объёмной доли волокон в композите;
- использовались специальные инструменты, пересмотрены параметры технологических процессов и техники машинной обработки для удовлетворения требованиям по форме и качеству поверхностей электродов.

Результатом доработки технологического процесса стало повышение допустимой напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре до 2800 В/мм.

В качестве первого прототипа была создана ИОС с плоскими электродами (рисунок 22). Выкладка слоев в заготовках проводилась по схеме [0/90, 45,45,90/0], толщины ЭЭ и УЭ составляли 2 мм и 4 мм соответственно. Полученные электроды использовались исключительно для проверки электростатических свойств ИОС. Они не предназначались для вибрационных испытаний. Электроды прошли огневые испытания в составе 75-см ИД в GRC.

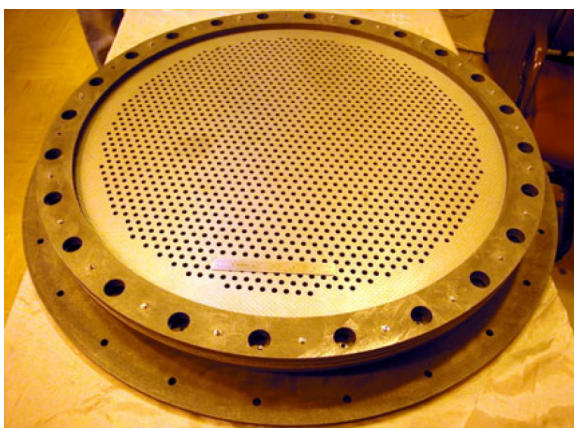


Рисунок 22 - ИОС с плоскими электродами диаметром 75 см.

ИОС кольцевого ИД

В работе [59] представлена разработка кольцевого ионного двигателя (рисунок 23а). На двигателе установлена двухэлектродная ИОС. Каждый электрод состоит из сегментов, закрепленных на фланце. Сегменты электродов имеют плоскую форму и изготовлены из пироуглерода, а фланцы, на которых закрепляются

сегменты, изготовлены из УУКМ. В каждом электроде суммарно выполнено 45356 отверстий. Данная ИОС успешно прошла огневые испытания (рисунок 23б). Данных о результатах механических испытаний не найдено.

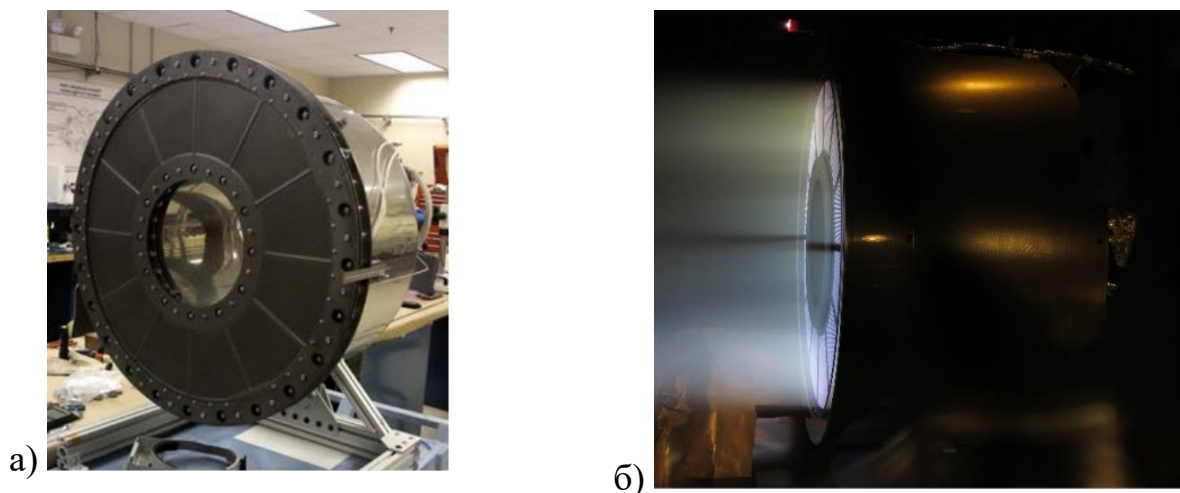


Рисунок 23 - а) сборка кольцевого двигателя с кольцевой сегментированной ИОС; б) огневые испытания кольцевого ионного двигателя.

1.3.4 Разработки Японии

ИД диаметром 14 см

В 1997 году была опубликована работа [18] о создании электродов ИОС из УУКМ для 14см ионного двигателя. Авторами изучали возможность повышения механической прочности эмиссионного электрода путем сохранения неповрежденных нитей в перемычках между отверстиями. Поскольку опыт по созданию щелевых ИОС показал, что несмотря на повышение жёсткости электродов, у ИОС данного типа наблюдаются сложности с подтверждением основных характеристик и проблемы с предотвращением распыления УЭ первичными ионами. Поэтому для сохранения основных характеристик ИОС и обеспечения повышенной механической прочности была применена новая технология создания электродов из УУКМ с круглыми отверстиями.

Суть данной технологии заключалась в том, что создавалась матрица с отверстиями, положение которых совпадало с отверстиями в зоне перфорации ЭЭ. Затем в матрицу вставлялись стержни, между которыми прокладывались нити (рисунок 24).

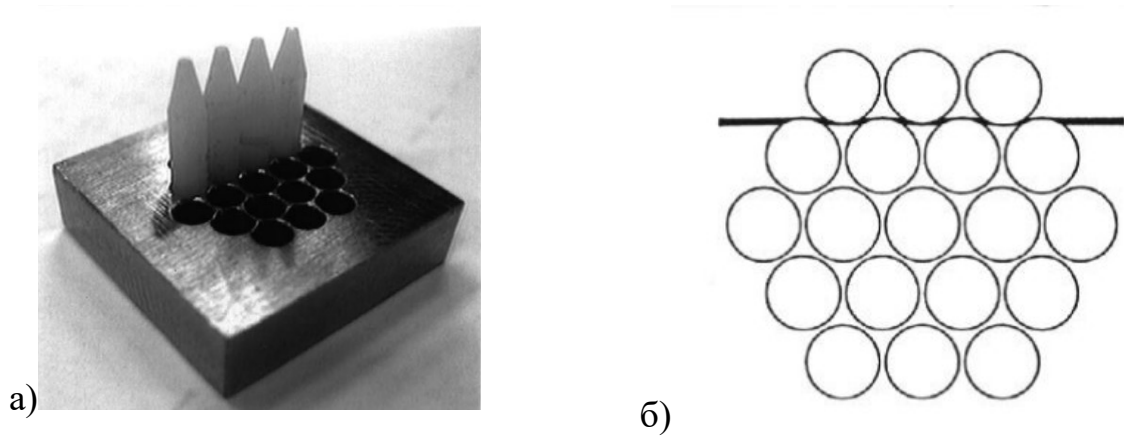


Рисунок 24 - Технология создания электродов для 14-см двигателя: а) общий вид матрицы со стержнями; б) методика прокладки нитей между стержнями.

Затем полученные заготовки проходили циклы пропитки связующим, полимеризации и карбонизации до достижения заданной плотности. Общий вид отверстий в полученной заготовке представлен на рисунке 25а. Качество отверстий было неудовлетворительным и для достижения требуемого результата отверстия в электроде проходили обработку на электроэрозионном станке. Результат представлен на рисунке 25б. Несмотря на созданные образцы электродов, данная технология была признана трудоёмкой и дорогостоящей, и в дальнейшем, при создании электродов ИОС из УУКМ, не применялась.

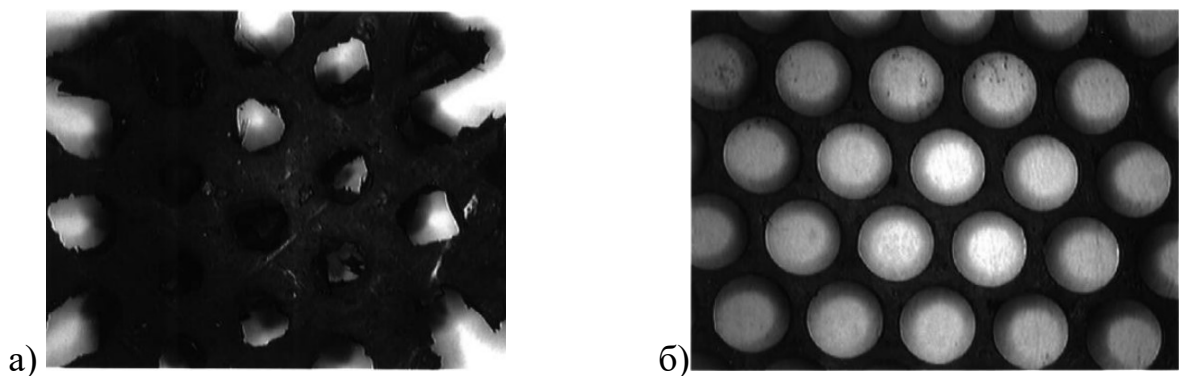


Рисунок 25 - Общий вид отверстий: а) после прохождения циклов уплотнения заготовки; б) после обработки на электроэрозионном станке.

ИД μ 10

В Японии проводились работы по разработке ИД μ 10 с диаметром пучка 10 см мощностью 400 Вт [60]. Ускорительная система состояла из трех плоских электродов из УУКМ, толщина каждого равнялась 1 мм (рисунок 23). Все электроды вырезались из единой заготовки, имеющей форму квадрата стороной 30 см. Заготовка была изготовлена из войлока на основе пекового волокна. Технология получения 30 см заготовки представляла собой циклы пропитки и карбонизации до получения заданной плотности. Отверстия в полученных электродах создавались сверлением, технология подбора режимов сверления УУКМ представлена в работе [61]. Отработка технологических решений проводилась на лабораторном двигателе ВВМ с диаметром пучка 120 мм [62]. Электроды ИОС проходили огневые и вибрационные испытания. В ходе вибрационных испытаний происходили соударения между электродами. Однако, разрушения электродов не произошло.

Электроды для двигателя μ 10 имели диаметр зоны перфорации 100 мм, их остальные геометрические параметры совпадали с электродами ИОС двигателя ВВМ. В двигателе μ 10 для повышения жесткости электроды монтировались на керамическое кольцо (рисунок 26) [60]. Данная сборка успешно прошла огневые и вибрационные испытания. Также, как и в ходе испытаний ИОС двигателя ВВМ, в ходе вибрационных испытаний двигателя μ 10 происходили соударения между электродами. Результаты проверки также показали отсутствие повреждений электродов, что позволило разработчикам считать межэлектродные соударения допустимыми. Двигатель μ 10 с электродами из УУКМ прошел лётные испытания в составе аппарата Hayabusa 1 и в настоящий момент используется на борту аналогичной миссии на аппарате Hayabusa 2 [7].



Рисунок 26 - Общий вид сборки 3-х электродной ИОС двигателя $\mu 10$.

ИД $\mu 20$

Одновременно с $\mu 10$ разрабатывался двигатель $\mu 20$ с диаметром пучка 20 см и тягой 20 мН с ионизацией РТ в СВЧ-разряде. Для $\mu 20$ была изготовлена трех-электродная ИОС, оснащенная плоскими электродами из УУКМ [63,64]. Электроды изготавливались по технологии аналогичной технологии изготовления электродов двигателя $\mu 10$. Проведенный структурный анализ электродов ИОС $\mu 20$ показал, что первая резонансная частота электродов составляет 150 Гц. Моделирование основного режима вибрации и прогиба электродов показало, что вызываемые в электродах напряжения допустимы с точки зрения обеспечения их целостности. На основании анализа была создана ИОС с диаметром зоны перфорации 20 см, показанная на рисунке 27.

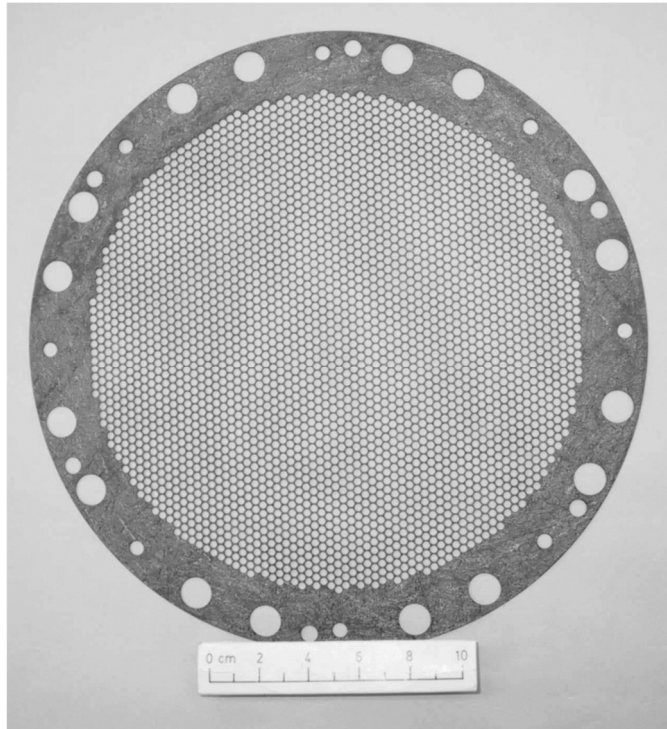


Рисунок 27 - Плоский ЭЭ двигателя $\mu 20$.

После огневых испытаний ИОС проходила серию испытаний на случайную вибрацию по 3 осям по 10 Grms во всех направлениях. Во время испытаний происходили соударения электродов друг с другом. Однако, после испытаний не было обнаружено ни видимых повреждений, ни ухудшения эксплуатационных характеристик двигателя. В 2009 году были опубликованы результаты огневых испытаний двигателя $\mu 20$ с ЭЭ толщиной 0,75 мм [65]. Толщины УЭ и ЗЭ остались по 1 мм. Зазор между ЭЭ и УЭ составил 0,55-0,6 мм, а между УЭ и ЗЭ – 0,45 мм. Данных о результатах испытаний на случайную вибрацию ИОС с ЭЭ толщиной 0,75 мм в открытой литературе обнаружить не удалось.

1.3.5 Разработки Китая

Использование электродов ИОС из углеродных материалов рассматривается также в Китае. В работе [19] описывалась технология создания электродов и приведены результаты измерений механических свойств используемого материала. В качестве наполнителя были выбраны высокомодульные волокна. Волокна сплетались в жгуты, которые выкладывались на графитовом сердечнике с

керамическими стержнями. Общий вид электрода ИОС и схема плетения представлены на рисунке 28. Скрепление жгутов производилось путем пироуплотнения.

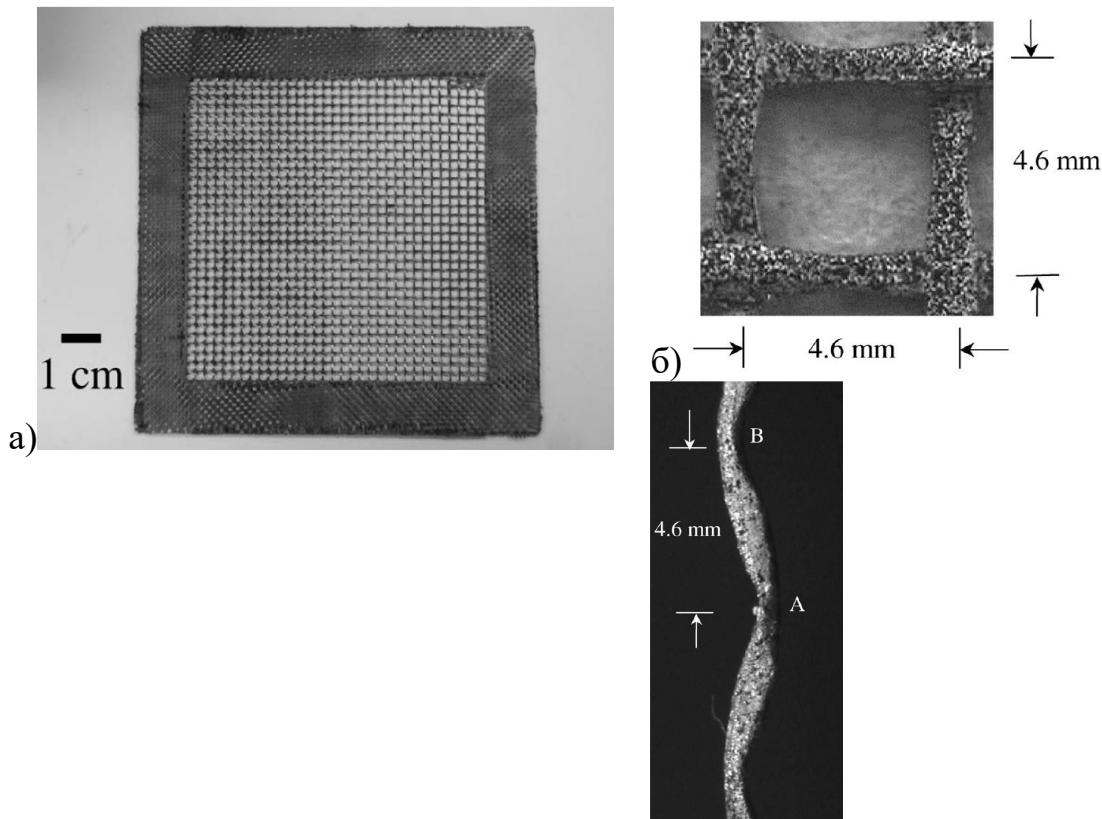


Рисунок 28 - ИОС с квадратными аперттурами: а) общий вид электрода ИОС; б) схема плетения и вид жгута.

Проведенные на экстензометре измерения позволили определить модули упругости как единичных волокон, так и сформированных жгутов. В 2019 году была опубликована работа, посвященная моделированию механических свойств УУКМ [66], в которой исследовалась плетёная конструкция с ориентацией нитей $0^{\circ}/60^{\circ}/-60^{\circ}$, заключенная в пироуглеродную матрицу. Упругие свойства наполнителя задавались по данным производителя, а матрицы – из литературных источников. По результатам моделирования были получены распределения напряжений в элементах узла ИОС, а также спрогнозированы амплитуды перемещений электродов ИОС под воздействием динамической нагрузки.

Однако, данные работы носят скорее академический характер, поскольку настоящая технология, исследованная в США и Японии, не позволяет получить электроды с необходимым качеством апертур.

ГЛАВА 2. РАССЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ДИАПАЗОНОВ ПЕРВЕАНСОВ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФОРМОЙ АПЕРТУР

2.1 Ограничения эксплуатационных характеристик ИОС с некруглыми апертурами

Использование электродов из УУКМ – одна из наиболее перспективных тенденций по созданию электродов ИОС, обеспечивающих длительный ресурс благодаря высокой эрозионной стойкости данного материала [26-29]. УУКМ представляет собой углеродные нити, заключенные в углеродную матрицу. Электроды из УУКМ намного легче и обладают большей эрозионной стойкостью по сравнению с металлическими электродами. Кроме того, электроды из УУКМ обладают коэффициентом линейного температурного расширения близким к нулю. Последнее качество имеет не менее важное значение, поскольку в ходе работы двигателя из газоразрядной камеры на электроды ИОС идет существенный тепловой поток.

В традиционных ионных двигателях используются электроды с круглыми апертурами, расположенные в зоне перфорации в узлах гексагонального паттерна. Однако, в электродах из композиционных материалов, при подобном расположении отверстий, в зоне перфорации происходит разрезание нитей в перемычках между отверстиями, что существенно снижает механическую прочность электродов. Механическая прочность важна на стадии вывода аппарата на орбиту, поскольку именно во время вывода он испытывает сильные вибрационные нагрузки. Переход к некруглым отверстиям, скорее всего, позволит сохранить большее число нитей в перемычках, и тем самым увеличить механическую прочность [18, 40, 43]. Главной заменой ИОС с круглыми апертурами рассматривались щелевые ИОС, в которых неповрежденные волокна сохранялись вдоль продолговатых отверстий. Однако, экспериментальные исследования показали, что щелевые ИОС характеризуются высокими значениями тока ионов в цепи ускоряющего электрода [43]. Предполагалось, что этот ток

создавался не только ионами перезарядки, но также был результатом прямого перехвата ускоряющим электродом ионов из ГРК. Последующие моделирование показало, что щелевые ИОС имеют фундаментальный недостаток [67], а именно значительно более узкий рабочий диапазон первеанса по сравнению с традиционными круглыми апертурами.

Рабочий диапазон первеанса любой ионно-оптической системы характеризуется двумя пределами. Верхний предел соответствует максимальному значению плотности тока ионов, вытягиваемых из ГРК, при котором ионы недостаточно сфокусированы и попадают на ускоряющий электрод. Нижний предел соответствует относительно малой плотности тока, при которой пучок ионов проходя через центральную ось апертуры, расфокусируется, и ионы попадают на заднюю кромку апертуры ускоряющего электрода. Численное моделирование показывает, что круглые апертуры обеспечивают широкий диапазон рабочих значений первеанса, при котором верхний предел плотности тока более чем в 10 раз превышает нижний. Щелевая ИОС, исследованная в двумерном приближении позволяет получить соотношение верхнего предела к нижнему в диапазоне от 2 до 4 [67]. Сборки различных ИОС с круглыми апертурами, короткими и длинными щелевыми апертурами со скругленными углами исследовались численно в трехмерных моделях [68] и экспериментально [69]. Расчет и эксперимент показали значительное сужение рабочего диапазона первеанса при переходе от круглых к щелевым формам апертур.

Для примера на рисунке 29 приведены результаты двух серий расчётов, выполненных при помощи программы «IOS-3D» [71]. Рассчитывались распределения электрического поля и траектории ионов в ИОС с круглыми и щелевыми апертурами при нескольких значениях отношения плотности тока в ГРК к плотности тока, определяемой соотношением Чайлда-Ленгмюра

$$j_{3/2} = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U_a^{3/2}}{l_a^2}, \text{ где } U_a - \text{ускоряющее напряжение, } l_a - \text{ширина}$$

ускоряющего промежутка..

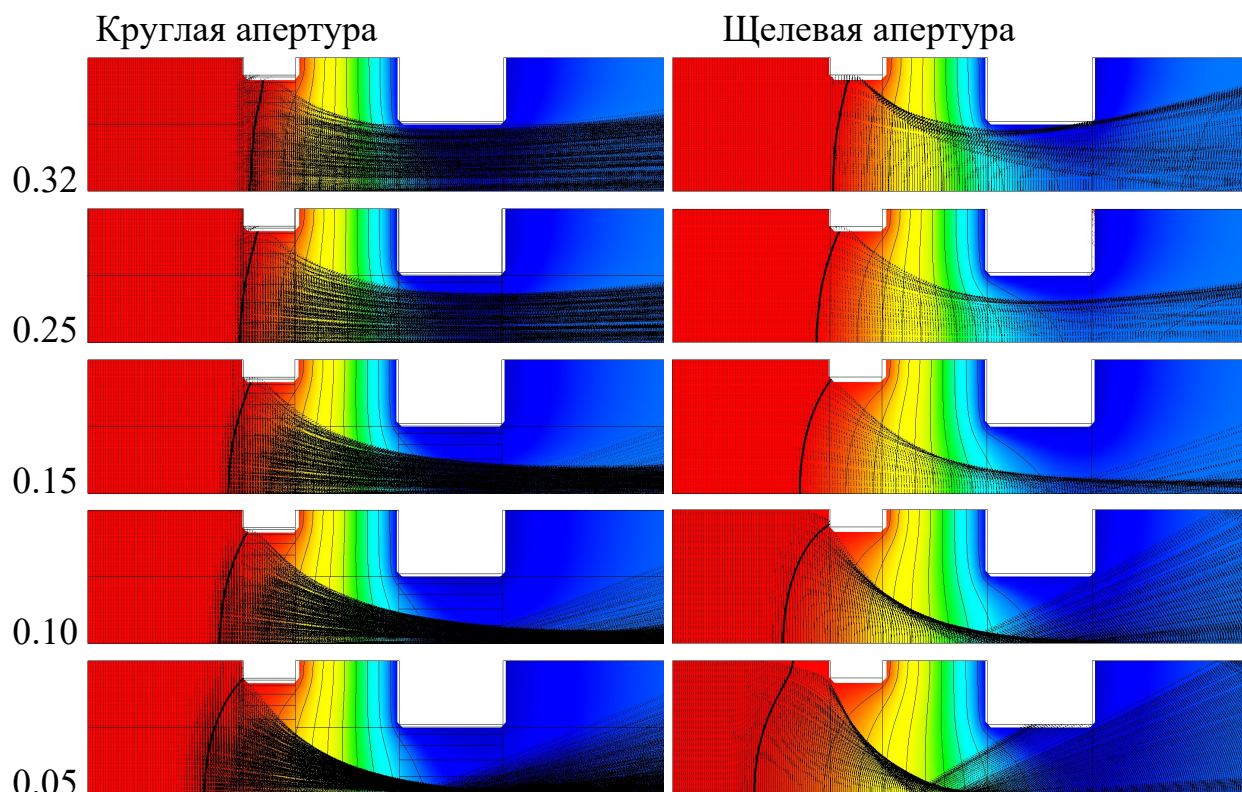


Рисунок 29 - Форма плазменной границы и траектории ионов в ИОС с круглой и щелевой апертурами. Слева указаны значения безразмерной плотности тока $\bar{j} = j/j_{3/2}$.

В приведённом примере для ИОС с круглыми апертурами были заданы параметры ячейки, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ИОС для сравнения круглых и щелевых апертур

d_s	t_s	w_s	d_a	t_a	w_a	l_a	ϕ_p	ϕ_s	ϕ_a	ϕ_b
4.0	1.0	0.6	2.4	2.0	2.2	2.0	4530	4500	-400	0

d_s - диаметр апертуры ЭЭ [мм], t_s - толщина ЭЭ [мм], w_s - толщина перемычки между апертурами в ЭЭ [мм], d_a - диаметр апертуры УЭ [мм], t_a - толщина УЭ [мм], w_a - толщина перемычки между апертурами в УЭ [мм], l_a - величина межэлектродного зазора [мм], ϕ_p - потенциал плазмы в ГРК перед ИОС [В], ϕ_s - потенциал ЭЭ [В], ϕ_a - потенциал УЭ [В], ϕ_b - потенциал пучковой плазмы [В].

При моделировании щелевой ИОС были заданы сетки такой же толщины, как у ИОС с круглыми апертурами, а ширина щелей была задана равной диаметру апертур. Варьируемым параметром в каждой серии расчётов была плотность ионного тока в ГРК.

Обе ИОС, изображённые на рисунке 29, имеют близкие значения максимальной безразмерной плотности тока $\bar{j} = 0.32 \div 0.34$, при котором ионы сфокусированы достаточно сильно, чтобы не попадать на ускоряющий электрод. По мере уменьшения первеанса плазменная граница отодвигается вглубь ГРК, а её форма всё более искривляется. В качестве условной плазменной границы здесь была выбрана поверхность, на которой потенциал плазмы равен потенциалу эмиссионного электрода. На рисунке видно, что по мере уменьшения первеанса плазменная граница в щелевой апертуре сдвигается внутрь ГРК быстрее, чем в круглой. Это приводит к более сильной фокусировке ионов. В результате уже при значении $\bar{j} \sim 0.1$ в щелевой ИОС ионы начинают попадать на ускоряющий электрод из-за избыточно сильной фокусировки. При таких же значениях \bar{j} в ИОС с круглыми апертурами ионы остаются достаточно хорошо сфокусированными. Согласно расчётам, нижний предел первеанса в этой ИОС достигается только при $\bar{j} \sim 0.02$.

Для объяснения этого эффекта в [75] был проведён расчёт линий равных потенциалов в щелевой и круглой апертурах, когда диаметр апертуры равен ширине щели. Результаты расчёта показаны на рисунке 30.

Как видно, электрическое поле проникает в щелевую апертуру намного глубже, чем в круглую. Качественно это различие можно объяснить тем, что щелевая апертура является более «открытой» для проникновения электрического поля, чем круглая, что и приводит к более сильному выгибанию плазменной границы по мере уменьшения первеанса.

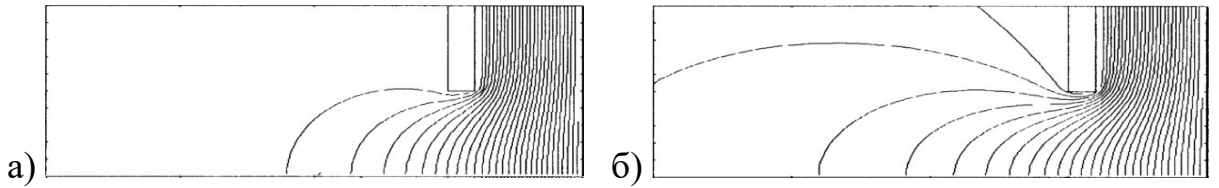


Рисунок 30 - Линии равных потенциалов в круглой (а) и щелевой (б) апертурах [75] .

Более глубокое проникновение электрического поля в щелевую апертуру имеет ещё одно негативное последствие. Оно проявляется в том, что для создания на оси ячейки щелевой ИОС потенциального барьера, необходимого для отсечки электронов пучковой плазмы, на ускоряющий электрод необходимо подавать более высокий по абсолютной величине отрицательный ускоряющий потенциал, чем в ИОС с круглыми апертурами. Эту особенность демонстрирует рисунок 31, на котором показаны зависимости минимума потенциала на оси ускоряющей ячейки от нормализованного первеанса для рассмотренных вариантов ИОС.

В проведённых расчётах потенциал ускоряющего электрода был задан равным -400 В. В ячейке с круглыми апертурами абсолютное значение высоты

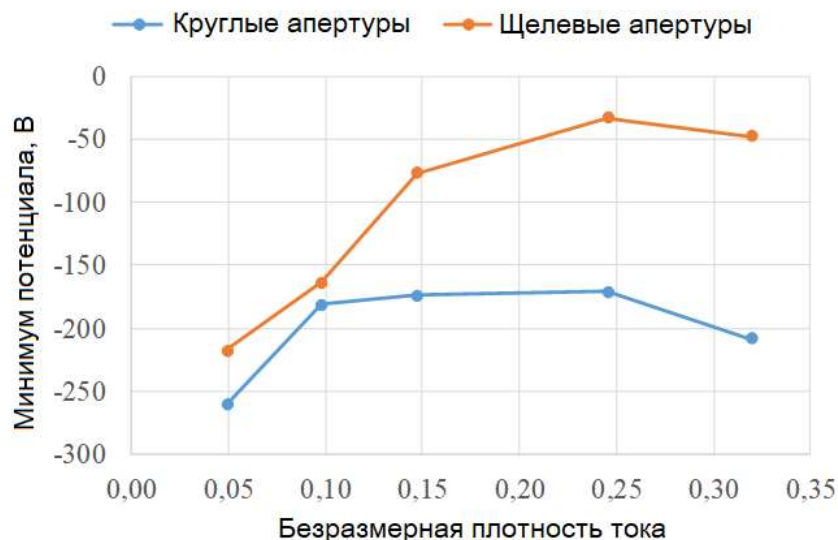


Рисунок 31 - Зависимость минимума потенциала на оси ячеек ИОС с круглыми и щелевыми апертурами от безразмерной плотности тока

$$\bar{j} = j/j_{3/2} .$$

потенциального барьера во всех режимах превышает 160 В. В ячейке с щелевыми апертурами эта высота быстро уменьшается по мере роста безразмерной плотности тока и при $\bar{j} > 0.2$ становится в 3÷4 раза меньше, чем в ячейке с круглыми апертурами. Поэтому для создания необходимого потенциального барьера в щелевой ИОС на ускоряющий электрод необходимо подавать более высокий отрицательный потенциал. Это в свою очередь приводит к более высокой энергии вторичных ионов, падающих на этот электрод из плазмы зоны нейтрализации, и повышенной скорости его распыления. Таким образом, щелевая ИОС, наряду с более узким диапазоном рабочих значений первеанса, характеризуется и менее длительным ресурсом ускоряющего электрода.

В работе [69] были проведены сравнительные исследования ИОС с апертурами в форме круга, а также коротких и длинных щелей с закруглёнными краями. Внешний вид испытанных электродов показан на рисунке 32. На всех фотографиях слева показан эмиссионный электрод, справа – ускоряющий.

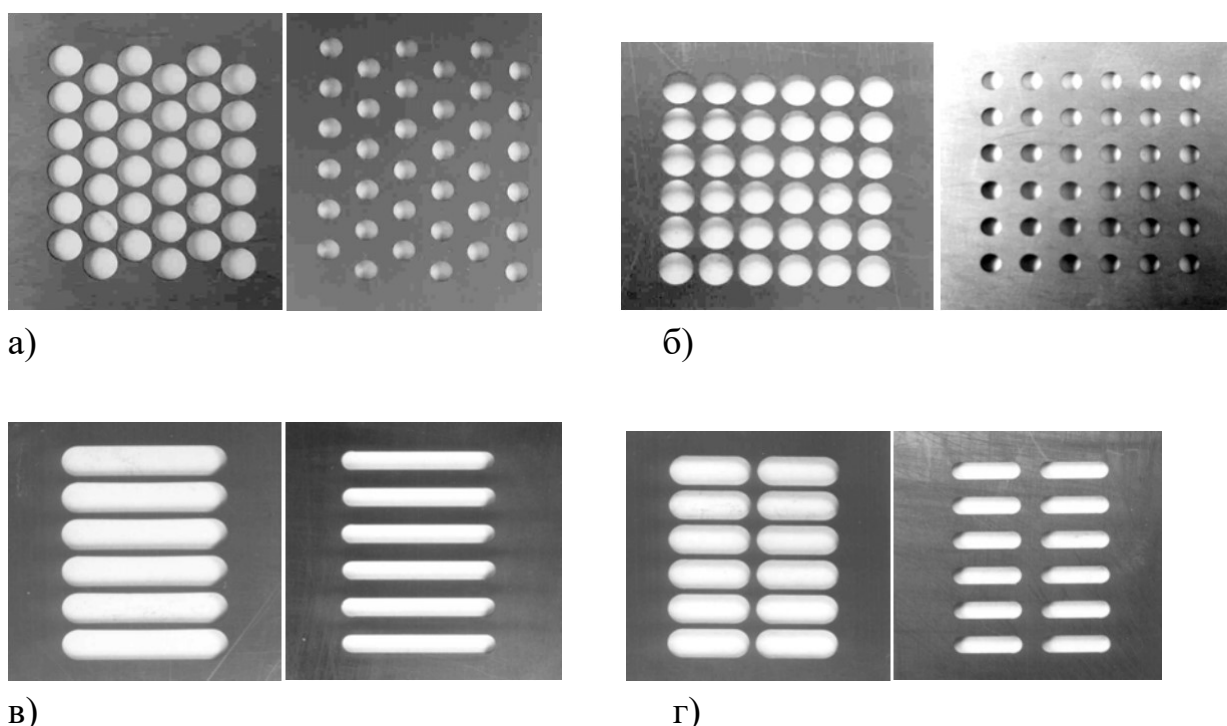


Рисунок 32 - Типы сеток, экспериментально исследованных в работе [69]: а) гексагональное расположение круглых апертур; б) прямоугольное расположение круглых апертур; в) длинные щелевые апертуры; г) короткие щелевые апертуры.

Эксперименты, проведённые с этими наборами электродов, подтвердили указанные выше особенности ИОС щелевого типа, в частности, в щелевой ИОС был получен более узкий диапазон рабочих значений первеанса. На рисунке 33 показаны измеренные в работе зависимости минимального первеанса от удельного импульса для четырёх указанных типов ИОС.

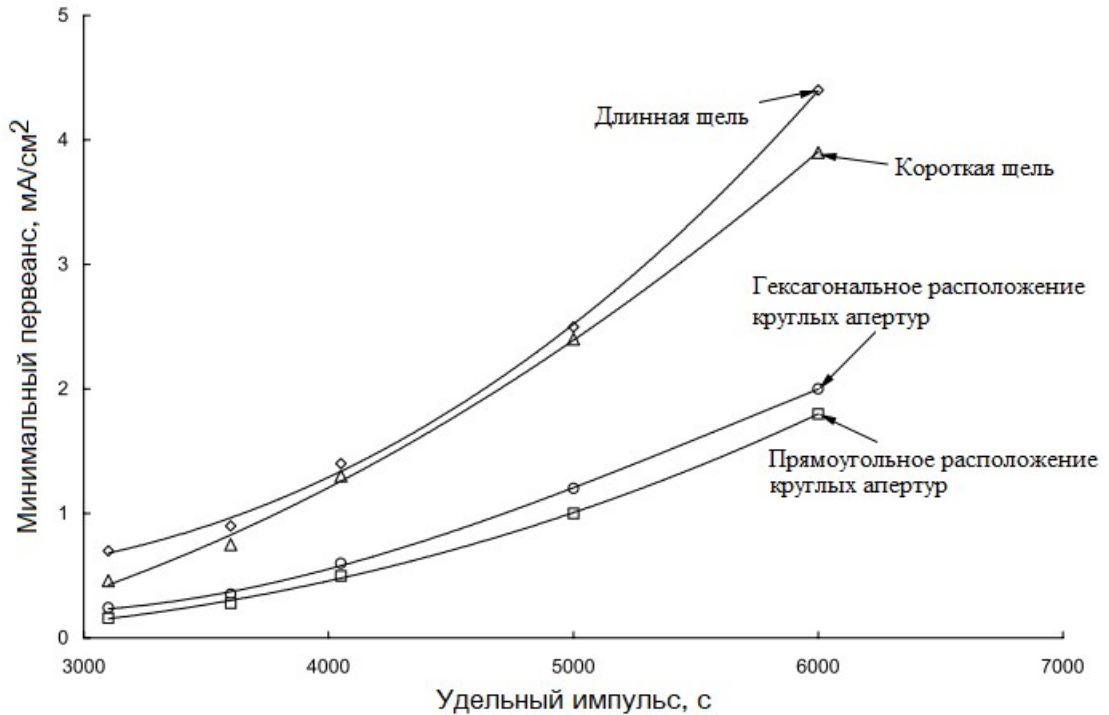


Рисунок 33 - Зависимость минимального первеанса от удельного импульса двигателя [69].

Можно видеть, что минимальный первеанс, при котором ионы не попадают на ускоряющий электрод, у щелевых систем примерно в два раза выше, чем у ИОС с круглыми апертурами. При этом ни длина щелей, ни взаимное расположение круглых апертур не оказывают существенного влияния на нижний предел первеанса.

На рисунке 34 показаны измеренные в работе [69] зависимости от удельного импульса модуля минимального потенциала ускоряющего электрода, при котором происходит отсечка электронов. Как видно из приведённых графиков, для обеспечения отсечки электронов в обеих щелевых системах на ускоряющий электрод необходимо подавать примерно вдвое больший по модулю

отрицательный потенциал, чем в обеих ИОС с круглыми апертурами. Результаты экспериментов показали, что обе ИОС с круглыми апертурами обладают схожими ионно-оптическими характеристиками. Хотя использование круглых апертур, расположенных в узлах прямоугольной решётки, позволяет получить наборы неперерезанных волокон в эмиссионном электроде, в такой конфигурации ИОС имеет меньшую прозрачность для ионов. Снижение прозрачности для ионов нежелательно, так как требует увеличения размеров ИОС для получения такого же тока пучка, как при гексагональном расположении апертур

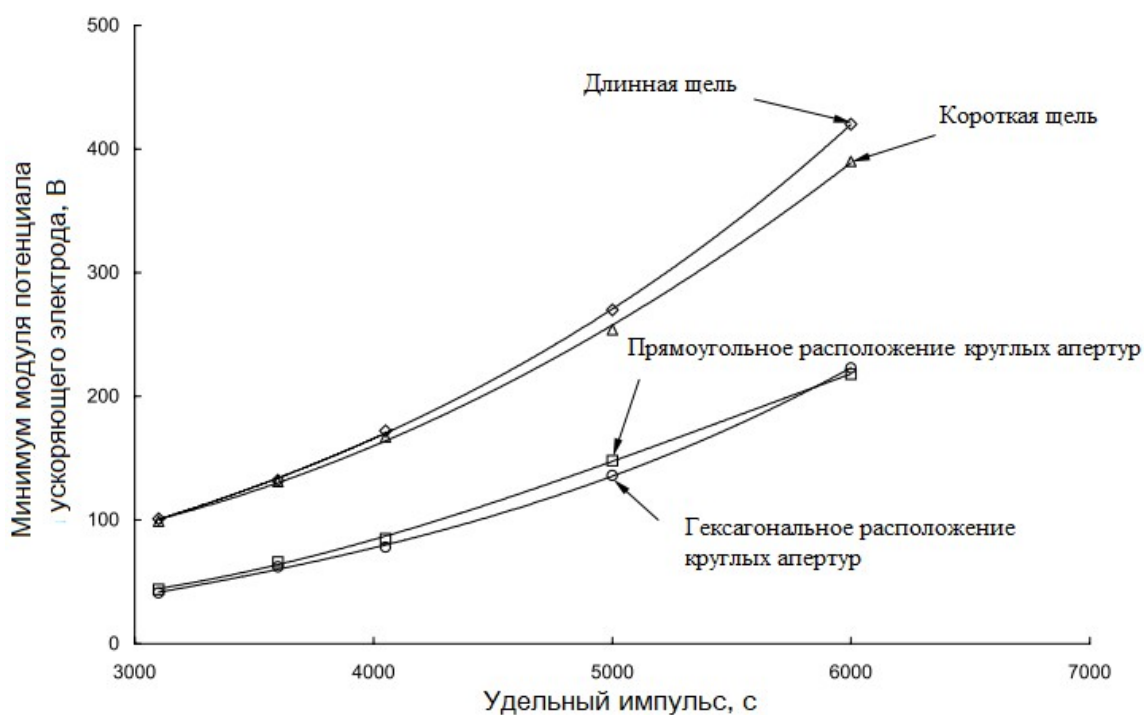


Рисунок 34 - Зависимость модуля минимального потенциала ускоряющего электрода, при котором происходит отсечка электронов, от величины удельного импульса [69].

Подводя итог, можно отметить, что, хотя углерод-углеродные композитные материалы являются очень перспективными для создания механически прочных высокоресурсных ИОС большого диаметра, использование традиционной геометрии с гексагональным расположением круглых апертур не всегда позволяет в полной мере использовать свойства этих материалов.

Целью настоящего исследования был поиск формы апертур, которая позволила бы увеличить механическую прочность электродов из углерод-углеродного композиционного материала без существенного сужения рабочего диапазона первеанса по сравнению с диапазоном первеанса ИОС с круглыми апертурами, расположенных в узлах гексагонального паттерна. Широкий диапазон первеанса важен для ионных двигателей, поскольку радиальное распределение плотности плазмы перед ИОС неоднородно, в связи с чем центральные и периферийные апертуры работают при разных значениях первеанса. Широкий диапазон первеанса также необходим, если необходимо дросселировать тягу ионного двигателя [70].

Исследование проводилось с использованием трехмерной численной модели IOS-3D [71], возможности данного программного продукта и примеры решения задач подробно представлены в [72,73].

2.2 Численная модель

Программа IOS-3D предназначена для расчета электрических полей и ионных потоков в трёхмерном пространстве с произвольной формой граничных поверхностей. Электрические поля рассчитываются путем решения уравнения Пуассона $\nabla^2 \varphi = -(\rho_i + \rho_e)/\varepsilon_0$, где φ – электрический потенциал, ρ_i, ρ_e – плотности зарядов ионов и электронов соответственно, ε_0 – диэлектрическая постоянная. Решение уравнения Пуассона проводится методом конечных разностей на ортогональной прямоугольной сетке. Система конечно-разностных уравнений решается методом итераций с заданным постоянным коэффициентом верхней релаксации или с ускорением по Чебышеву.

Граничные поверхности описываются набором планарных многоугольников. На каждой граничной поверхности может быть задано одно из трех граничных условий: условие Дирихле, при котором на выделенной поверхности задаётся постоянный потенциал; условие Неймана, означающее нулевое значение производной потенциала по направлению нормали к поверхности ($dU/dn = 0$); условие трансляционной симметрии, при котором трансляционный вектор должен быть параллелен одной из осей координат. Самосогласованная задача решается в

стационарном приближении. Уравнения движения ионов интегрируются с использованием метода с перешагиванием. Для расчета пространственного заряда ионов используется метод трубок тока.

Методика моделирования процесса вытягивания ионов из плазмы заимствована из более ранней двухмерной численной модели GASEL [74]. Метод состоит в следующем. В расчетной области должна быть выделена занятая плазмой область. Входными данными являются потенциал плазмы φ_p , плотность плазмы n_p и электронная температура T_e . При расчете траекторий трубок тока применяется следующий алгоритм. Начальная скорость рассчитывается на основании критерия Бома [19]: $V_{i0} = V_B \equiv \sqrt{k_B T_e / M_i}$, где V_B – Бомовская скорость, k_B – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура и M_i – масса иона. Если в точке, расположенной внутри расчетной области, рассчитана траектория, и электрический потенциал в ней выше, чем заданный потенциал плазмы ($\varphi > \varphi_p$), считается, что такая точка расположена внутри плазмы. В этой точке траектории электрическое поле считается равным нулю, и объёмный заряд обнуляется в соответствии с условием квазинейтральности. Если потенциал меньше, чем указанный потенциал плазмы, электрическое поле в точке рассчитывается по обычной интерполяционной процедуре. В последнем случае отрицательный объёмный заряд электронов добавляется к полному объёмному заряду в ближайших узлах расчетной сетки. Движение электронов не моделируется. Вместо этого полагается, что объёмный заряд электронов описывается уравнением Больцмана: $\rho_e = -en_p \exp[e(\varphi - \varphi_p)/(k_B T_e)]$. Данный метод неоднократно тестировался в программе GASEL и показал хорошую точность [75]. Когда проводилась отработка программы IOS-3D, проводились тестовые расчёты для осесимметричной геометрии и сравнивались с результатами, полученными в программе GASEL.

2.3 Расчёт традиционной ионно-оптической системы с круглыми апертурами

В представленном ниже исследовании [76] используется ионно-оптическая система с круглыми апертурами, расположенными в узлах гексагонального

паттерна, которая исследовалась ранее численно [72,73] и экспериментально [77], как исходный эталонный вариант. Расположение апертур в ионно-оптической системе и вид расчетной области представлены на рисунке 35.

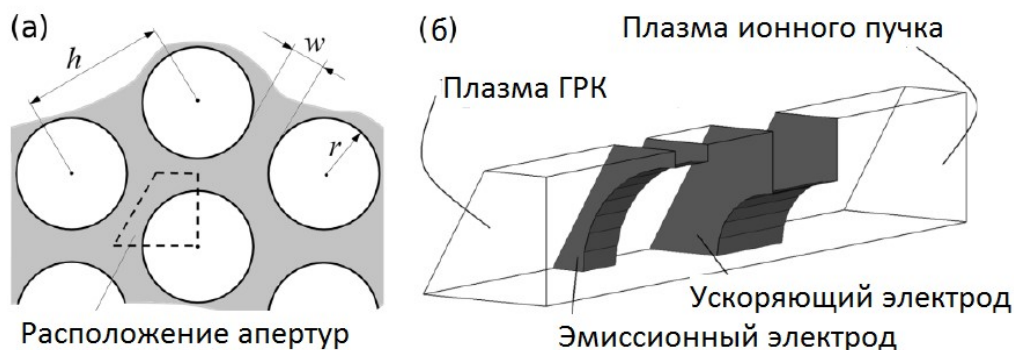


Рисунок 35 - Эталонный варианта ИОС: (а) расположение апертур, (б) расчетная область.

Однозарядные ионы ксенона инжектировались в область моделирования через границу «Плазма ГРК». На этой границе был задан потенциал плазмы, равный 4530 В. Потенциал эмиссионного электрода равен 4500 В, потенциал ускоряющего электрода равен -400 В. Граница «Плазма ионного пучка» имела нулевой потенциал. На всех боковых поверхностях было задано условие нулевого нормального электрического поля и условие зеркального отражения для ионов. Стартовая скорость ионов на верхней границе была равна скорости Бома $V_{i0} = \sqrt{k_B T_e / M}$, где k_B – постоянная Больцмана; T_e – температура электронов в верхней плазме; M – масса ионов. Температура электронов была задана равной 5 эВ.

Для общности представляемых результатов были использованы безразмерные единицы длины. За единицу длины было принято расстояние между эмиссионным и ускоряющим электродами. При реальном численном моделировании эта длина была равна 2 мм. В безразмерных единицах длины расстояние h между центрами апертур в базовой ионной оптике равно 2.3. Другие геометрические параметры базовой ионной оптики, а именно толщины сеток t , радиусы апертур r и

минимальные толщины перемычек между апертурами w приведены в таблице 2. В таблице также указаны геометрические прозрачности сеток $Y_G = (2\pi/\sqrt{3})(r/h)^2$.

Полный ионный ток (I_{enter}), входящий в расчетную область через границу «Плазма ГРК» разделяется на три части: ток на эмиссионный электрод (I_{scr}); ток перехвата на ускоряющий электрод (I_{imp}); и ток ионного пучка (I_{beam}), который покидает расчетную область через границу «Плазма ионного пучка».

В расчётах в качестве варьируемого параметра использовалась плотность тока ионов J_i , входящих в область моделирования через границу «Плазма ГРК». Во всех представленных результатах вместо этой плотности тока была использована безразмерная плотность тока (иногда называемая «нормализованным первеансом») $P \equiv J_i/J_0$, где масштаб плотности тока ионов задан законом Чайлда-Ленгмюра $J_0 = (4\varepsilon_0/9)\sqrt{2q/M}(U_i^{3/2}/d^2)$; ε_0 – диэлектрическая постоянная; q – заряд иона; U_i – полное ускоряющее напряжение; d – величина межэлектродного зазора между эмиссионным и ускоряющим электродом. По результатам моделирования рассчитывалось отношение тока прямого попадания ионов на ускоряющий электрод I_{imp} к току элементарного пучка I_{beam} . Ток элементарного пучка рассчитывался как ток ионов, выходящих из области моделирования через границу «Плазма ионного пучка». Также рассчитывалась эффективная прозрачность ионной оптики для ионов, как отношение тока элементарного пучка I_{beam} к полному току ионов I_{enter} , входящему в область моделирования через границу «Плазма ГРК».

Расчёт пределов нормализованного первеанса для базовой ионно-оптической системы дал следующие результаты [72]: нижний кроссоверный предел $P_{min} = 0.02$; верхний первеансный предел $P_{max} = 0.34$. На рисунке 36 показаны траектории ионов и линии равных потенциалов, рассчитанные в IOS-3D для двух границ первеанса.

Эффективная прозрачность ионной оптики для ионов изменяется от 0.89 в кроссоверном пределе до 0.53 в первеансном пределе. Все рассмотренные далее

типы ионно-оптических систем с некруглыми апертурами сравниваются с этим базовым вариантом.

Таблица 2. Параметры эталонной ионно-оптической системы (в безразмерных величинах).

Электрод	t^a	r^b	w^c	Y_G^d
Эмиссионный	0.5	1.0	0.3	0.686
Ускоряющий	1.0	0.6	1.1	0.247

^a t – толщина электрода.
^b r – радиус отверстия.
^c w – минимальная толщина перемычки.
^d Y_G – геометрическая прозрачность электрода.

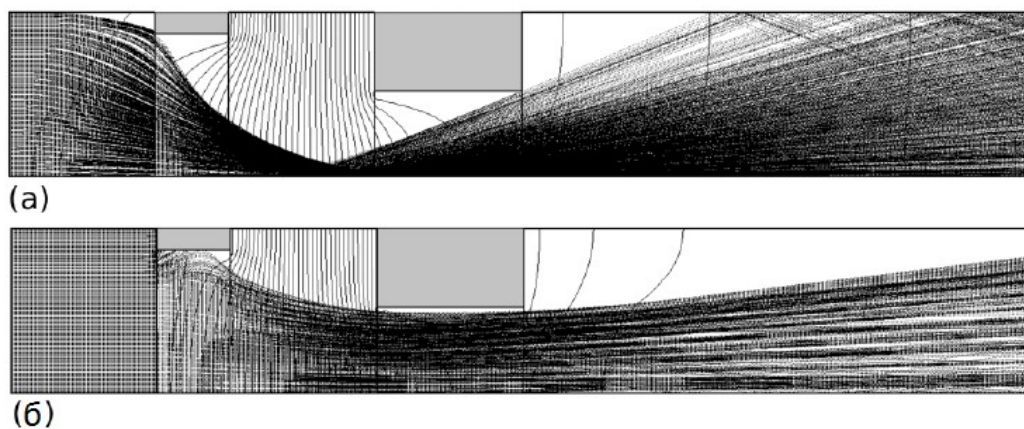


Рисунок 36 - Траектории ионов и линии равных потенциалов: (а) для нижней границы первеанса, (б) для верхней границы первеанса.

2.4 Моделирование ионно-оптических систем с некруглой формой апертур

А. Квадратные апертуры

Если каждый монослой заготовки электрода представляет собой однонаправленные углеродные ленты, армирующие углеродную матрицу, а сами монослои ориентированы друг относительно друга под углом 90° , то существует

вероятность увеличить количество неповреждённых нитей, если отверстия расположены в узлах прямоугольной решётки. Поэтому вначале были исследованы квадратные апертуры. Геометрия зоны перфорации такой ИОС представлена на рисунке 37.

Расстояние между центрами отверстий было таким же, как и в эталонной геометрии: $h=2.3$. Длина стороны квадрата рассчитывалась так, чтобы полученная геометрическая прозрачность $Y_G = b^2/h^2$, совпадала с геометрической прозрачностью эталонной ИОС: $Y_{G_s} = 0.686$ при $b_s = 1.90$ и $w_s = 0.40$ для эмиссионного электрода; $Y_{G_a} = 0.247$ при $b_a = 1.14$ и $w_a = 1.16$ для ускоряющего электрода. Здесь и далее используются индексы “s” – для обозначения параметров, относящихся к эмиссионному электроду, “a” – для параметров, относящихся к ускоряющему электроду. Результаты расчета отношения тока перехвата к току пучка $I_{\text{imp}}/I_{\text{beam}}$ и эффективной прозрачности для ионов в ИОС с квадратными апертурами и для эталонной геометрии приведены на рисунке 38.

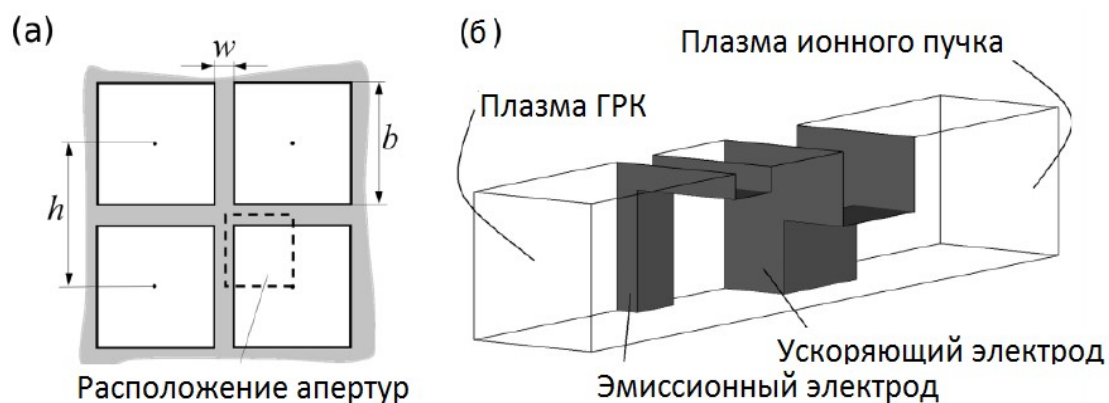


Рисунок 37 - ИОС с квадратными апертурами: (а) расположение апертур; (б) расчетная область.

В обеих ионно-оптических системах эффективные прозрачности для ионов, практически, одинаковы во всём диапазоне значений нормализованного первеанса. Это ожидаемый результат, так как геометрические прозрачности эмиссионных электродов в этих системах равны между собой. Диапазон рабочих значений нормализованного первеанса у ионной оптики с квадратными апертурами намного

более узкий, чем у базовой, главным образом, из-за того, что верхний первеансный предел этой оптики равен 0.1, т.е. в 3.4 раза меньше, чем у базовой оптики. Минимальный нормализованный первеанс этой геометрии равен 0.026, что немного больше, чем у оптики с круглыми апертурами.

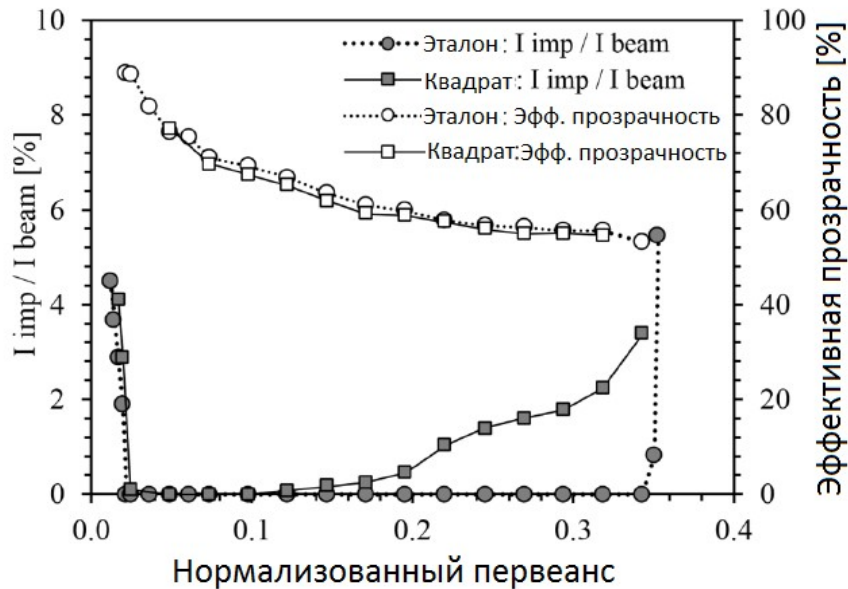


Рисунок 38 - Характеристики ИОС с квадратными апертурами и эталонной ИОС.

Причина прямого попадания ионов на ускоряющий электрод в ионной оптике с квадратными апертурами при сравнительно низких значениях безразмерной плотности тока проиллюстрирована на рисунке 39.

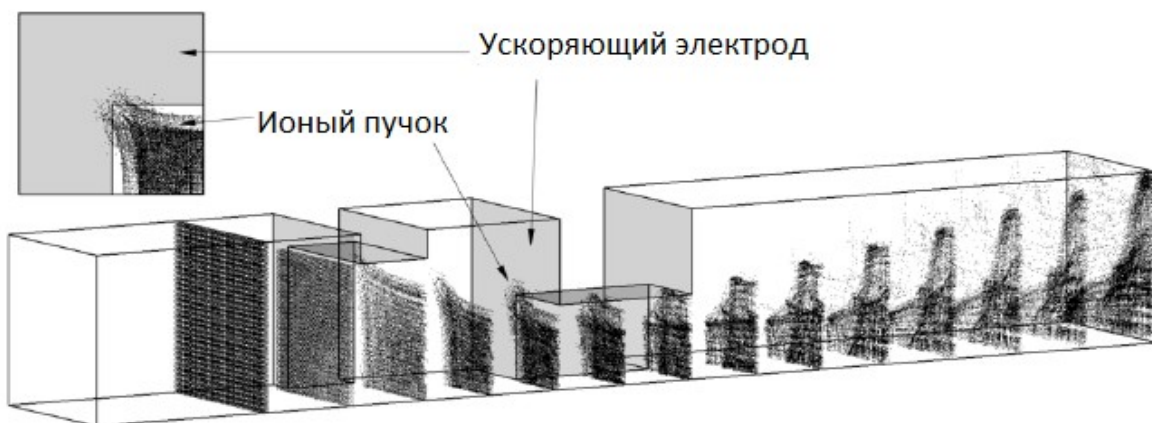


Рисунок 39 - Поперечные сечения ионного пучка в ИОС с квадратными апертурами.

На рисунке показаны сечения ионного пучка в нескольких плоскостях, перпендикулярных оси элементарной ячейки, полученные при безразмерной плотности тока 0.22. На выноске показано сечение элементарного пучка перед входом в апертуру ускоряющего электрода. Вначале пучок имеет квадратную форму сечения, но по мере ускорения ионов вблизи угла пучка образуется расплывающаяся группа ионов. Эти ионы извлекаются из угла апертуры эмиссионного электрода и бомбардируют ускоряющий электрод из-за недостаточной фокусировки.

Следующим логическим шагом могло стать небольшое изменение прямоугольной формы апертуры ускоряющего электрода, для того чтобы расширить диапазон первеанса. Например, этого можно добиться путем дополнительного выреза в углу апертуры ускоряющего электрода, повторяющего форму ионного пучка. Однако, эта модификация увеличит площадь апертуры ускоряющего электрода, в результате чего увеличится прозрачность ИОС для нейтральных атомов и, соответственно, уменьшится газовая эффективность. Кроме того, это существенно усложнит технологию создания отверстий, поскольку потребуется прорезать тысячи апертур сложной формы. Поэтому, в последующей серии расчетов была сделана попытка избавиться от группы несфокусированных ионов путем создания апертур со скругленными углами, сохраняя геометрическую прозрачность электрода и простоту формы отверстия.

Б. Апертуры квадратной формы со скругленными углами

Ионно-оптическая система с квадратными апертурами со скругленными углами показана на рисунке 40.

Расстояние между центрами отверстий было выбрано таким же, как и в эталонной ИОС: $h=2.3$. В ходе моделирования было протестировано несколько вариантов геометрии с различными радиусами скругления как у эмиссионного, так и у ускоряющего электродов. Сторона квадрата b , при выбранном радиусе

скругления r , для каждой серии расчетов определялась из выражения для геометрической прозрачности $Y_G = (b^2 - (4 - \pi)r^2)/h^2$, так, чтобы обеспечить такую же прозрачность сетки, как в базовой ионной оптике. Рассматривались только такие значения радиуса закругления, при которых минимальная толщина перемычки в эмиссионном электроде w_s , была не меньше 0.3 поскольку это минимальная толщина перемычки для эталонной ИОС.

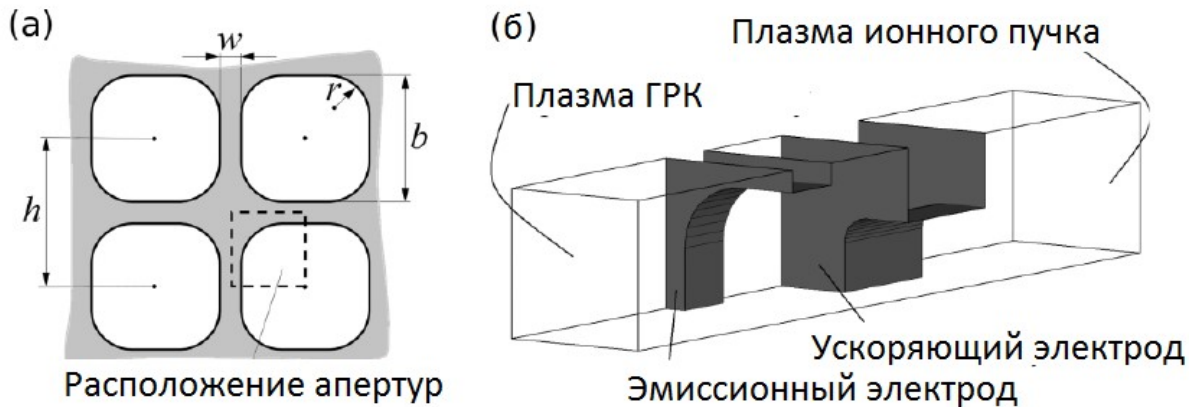


Рисунок 40 - ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами:

(а) расположение апертур; (б) расчетная область.

На рисунке 41 показано отношение тока перехвата к току пучка как функция от нормализованного первеанса, рассчитанные для ИОС с идеальными квадратными отверстиями в ускоряющем электроде ($r_a = 0$) и квадратными отверстиями со скругленными углами в эмиссионном электроде. Расчеты проводились для нескольких радиусов скругления.

Верхняя граница диапазона первеанса возрастала с увеличением радиуса скругления у отверстий эмиссионного электрода. Когда радиус достиг значения 0.5, верхняя граница достигла значения 0.32, что очень близко к верхней границе эталонной ионно-оптической системы $P_{\max} = 0.34$. Нижняя граница не превышала 0.04 во всех геометриях. Стоит отметить, что радиус скругления 0.5 не приводит к потере преимуществ квадратных отверстий, поскольку ту же геометрическую прозрачность в новой ИОС можно получить при толщине перемычки, не меньшей, чем у эталонной ионно-оптической системы.

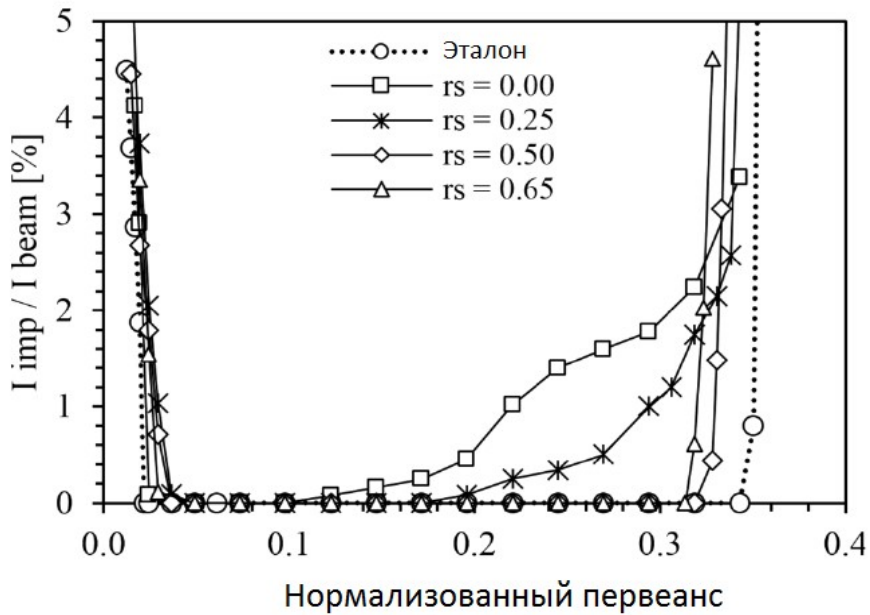


Рисунок 41 - Поведение тока перехвата в ИОС с квадратными отверстиями со скругленными углами в эмиссионном электроде в зависимости от нормализованного первеанса при нескольких значениях радиуса скругления (r_s).

В следующей серии расчетов, задавались различные значения радиусов скругления как для отверстий эмиссионного электрода, так и для отверстий ускоряющего электрода. Результаты расчетов верхней границы диапазона первеанса представлены на рисунке 42.

Максимальное значение верхней границы диапазона первеанса 0.33 было достигнуто при $r_s=0.65$ и $r_a=0.30$. Стоит отметить, что радиус скругления отверстий в эмиссионном электроде 0.65 соответствует толщине перемычки $w_s = 0.3$, которая равна минимальной толщине перемычки в базовой оптике с круглыми апертурами.

Таким образом, можно предположить, что сетки с апертурами в форме квадратов со скруглёнными углами являются перспективной служить альтернативой традиционным сеткам с гексагональным расположением круглых апертур, обладая примерно таким же диапазоном рабочих значений нормализованного первеанса.

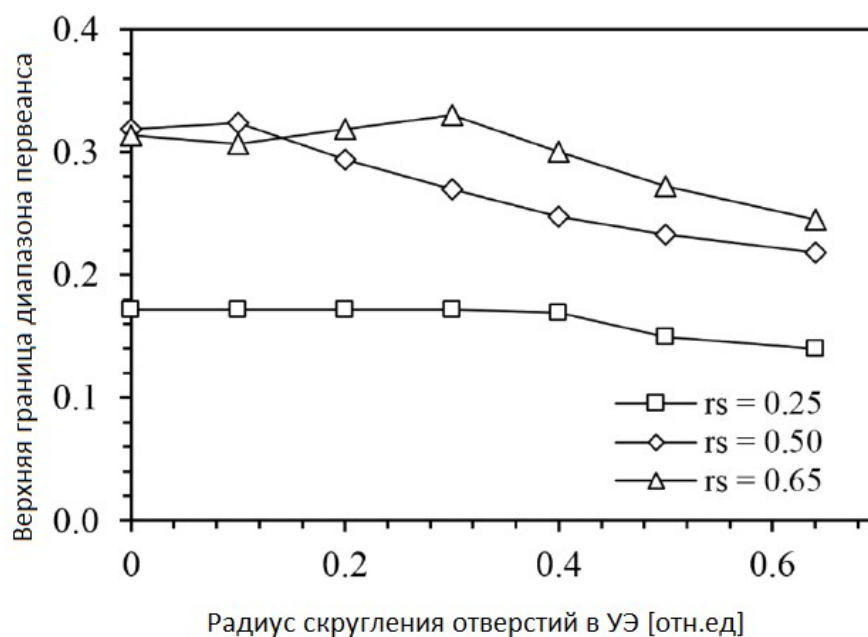


Рисунок 42 - Верхняя граница диапазона первеанса для ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами в зависимости от радиуса скругления отверстий в ускоряющем электроде при нескольких значениях радиуса скругления в эмиссионном электроде.

В. Короткие щелевые апертуры

Одним из преимуществ ускорительных систем щелевого типа по сравнению с традиционными ионно-оптическими системами является возможность увеличения прозрачности эмиссионного электрода при сохранении минимальной толщины перемычки между апертурами [43,67]. Однако, как отмечалось выше, численное моделирование показывает существенное сужение рабочего диапазона первеанса в щелевых ИОС по сравнению с традиционными ИОС как в двухмерной плоскопараллельной аппроксимации [75], так и в трехмерной модели [68]. При проведении трехмерного моделирования, сужение диапазона наблюдалось даже для относительно коротких щелей, имеющих скругленные углы и соотношение длины к ширине 2.5. Для проверки, остаётся ли такая же особенность у рассматриваемой здесь ионно-оптической системы, было выполнено моделирование ускоряющей системы с апертурами, имеющими форму прямоугольника со скруглёнными углами (рисунок 43).

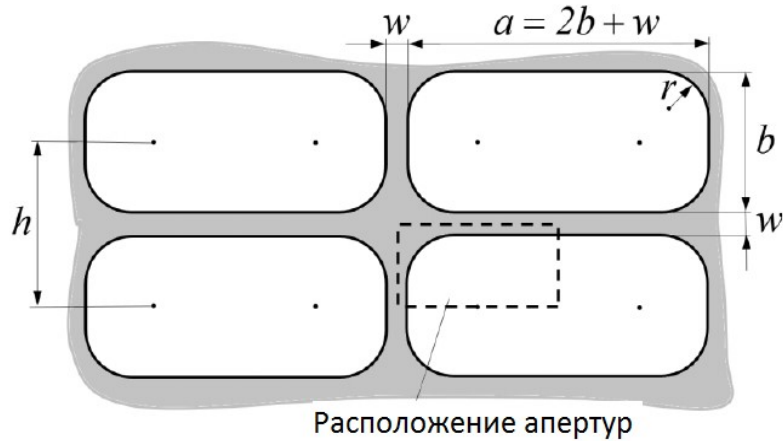


Рисунок 43 - Ионно-оптические системы с апертурами в форме прямоугольников со скругленными углами.

Фактически эта геометрия получена из рассмотренной ранее ионной оптики, имеющей наибольший рабочий диапазон первеанса, полученный при $r_s = 0.65$ и $r_a = 0.30$, путём устранения перегородок между парами соседних отверстий. Остальные нормализованные размеры области моделирования имели следующие значения: $h=2.3$; $w_s = 0.3$; $w_a = 1.12$; $b_s = 2.0$; $b_a = 1.18$.

Результаты расчетов приведены на рисунке 44.

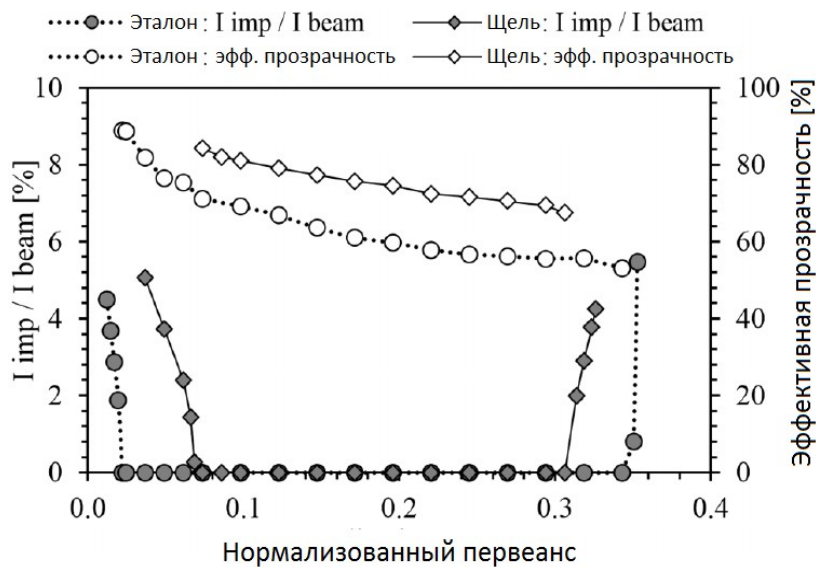


Рисунок 44 - Характеристики эталонной ИОС и ИОС с прямоугольными апертурами в зависимости от нормализованного

первеанса.

Как и ожидалось, эффективная прозрачность для ионов возросла, поскольку увеличилась геометрическая прозрачность эмиссионного электрода. Рабочий диапазон первеанса сузился, что согласуется с предыдущими результатами. Можно отметить существенное увеличение нижней границы диапазона первеанса, что типично для щелевых ИОС.

Расчеты показали, что плазменная граница в щелевой апертуре более чувствительна к изменению первеанса, чем в круглой апертуре [75]. Качественно, это можно объяснить тем, что щель более открыта для проникновения электрического поля нежели круглое отверстие. При малых значениях первеанса, плазменный мениск изгибается сильнее в сторону плазмы ГРК, что приводит к расфокусировке ионов раньше, чем в круглых отверстиях. Эта особенность отражена на рисунке 45, на котором показаны несколько сечений ионного пучка, полученные при нормализованном первеансе $P=0.061$.

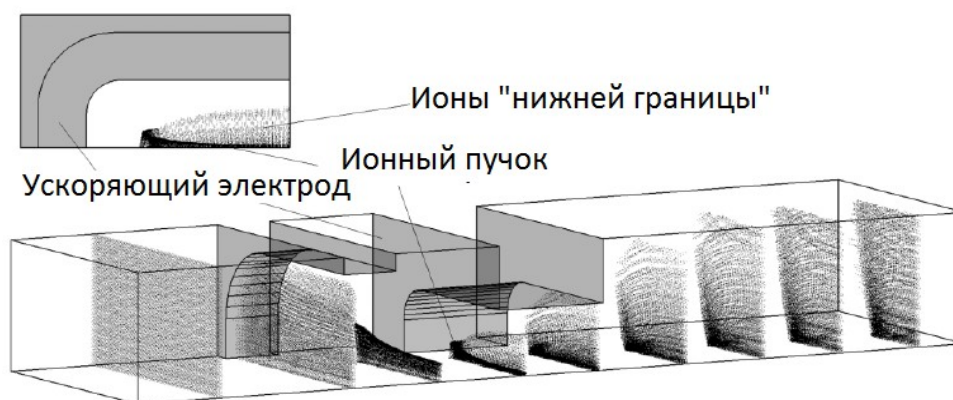


Рисунок 45 - Поперечные сечения ионного пучка ИОС с прямоугольными апертурами со скругленными углами.

Можно заметить, что вблизи середины щели группа кроссоверных ионов возникает намного раньше, чем около краёв. Эти ионы напрямую бомбардируют ускоряющий электрод в центральной части щели. Таким образом, можно заключить, что ионная оптика со щелевыми апертурами даже при сравнительно небольшом отношении длины щели к её ширине плохо подходит для

использования в ионных двигателях, которые часто характеризуются значительным падением плотности плазмы от центра к периферии газоразрядной камеры.

2.5 Сравнение эффективности традиционной и альтернативной ионно-оптических систем

Наравне с высокой прозрачностью для ионов и существенной механической прочностью, ионно-оптическая система ионного двигателя должна удовлетворять и другим требованиям. К таким требованиям относятся: низкая прозрачность для нейтральных атомов для обеспечения высокой газовой эффективности; малый угол расхождения ионного пучка для обеспечения высокой тяговой эффективности и минимизации воздействия плазменной струи на элементы космического аппарата; достаточно высокий отрицательный потенциальный барьер в апертурах ускоряющего электрода для отражения обратного потока электронов из плазмы ионного пучка и предотвращения попадания их внутрь газоразрядной камеры; малые скорости распыления поверхностей УЭ для обеспечения ресурса двигателя. Для подтверждения того, что альтернативная ионно-оптическая система сможет стать полноценной заменой традиционной ионно-оптической системе с круглыми апертурами, была выбрана ионно-оптическая система с квадратными апертурами со скругленными углами, которая имеет наиболее широкий рабочий диапазон первеанса. Геометрические параметры данной ИОС в безразмерных единицах равны: $h=2.3$; $r_s=0.65$; $r_a=0.30$; $w_s=0.3$; $w_a=1.12$; $b_s=2.0$; $b_a=1.18$. Далее, для удобства, мы будем называть эту ионно-оптическую систему «альтернативной».

На рисунке 46 показана эффективная прозрачность для ионов эталонной и альтернативной ионно-оптических систем как функция от нормализованного первеанса. Предельные значения рабочих диапазонов первеанса следующие: нижние пределы были равны 0.022 для эталонной ИОС и 0.034 для альтернативной ИОС; верхние пределы – 0.343 для эталонной и 0.328 для альтернативной. В указанных диапазонах эффективная прозрачность эталонной ИОС была равна или немного превышала эффективную прозрачность альтернативной ИОС.

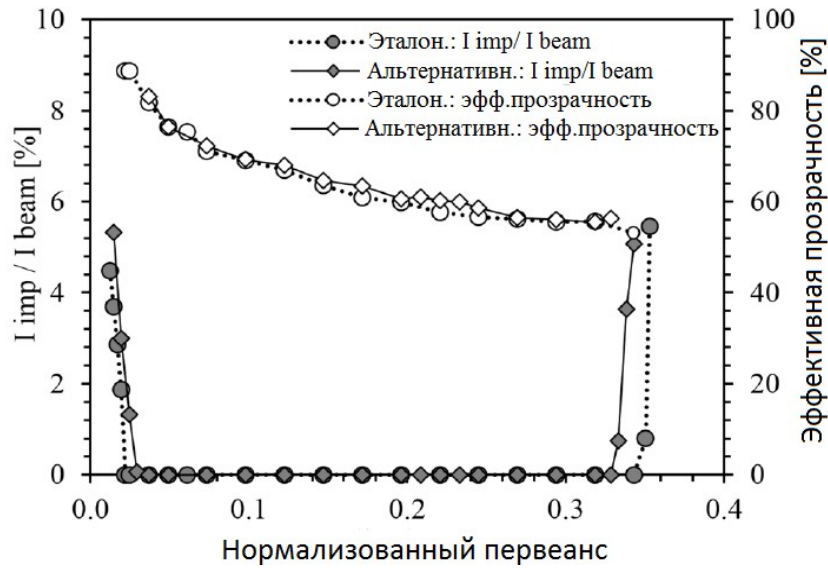


Рисунок 46 - Характеристики эталонной и альтернативной ионно-оптических систем как функции нормализованного первеанса.

Расчеты потоков нейтральных атомов в свободно молекулярном режиме показали очень близкие результаты для обеих ИОС: эффективная прозрачность для эталонной ИОС составила 12.3%, для альтернативной – 12.9%.

На рисунке 47 для обоих типов ИОС приведена зависимость высоты потенциального барьера от нормализованного первеанса.

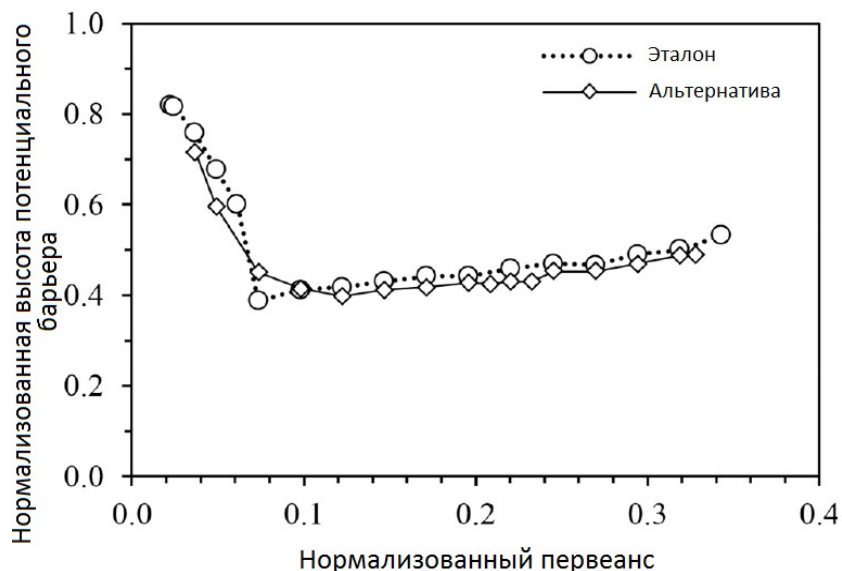


Рисунок 47 - Зависимость нормализованной высоты потенциального барьера от нормализованного первеанса для эталонной и альтернативной ионно-оптических систем.

В расчете использована нормализованная высота потенциального барьера, которая представляет собой отношение минимального потенциала на оси элементарной ячейки к значению потенциала ускоряющего электрода. В реальном численном моделировании потенциал ускоряющего электрода был равен -400 В при полной ускоряющей разности потенциалов 4900 В. Во всём диапазоне рабочих значений первеанса альтернативная ионная оптика обеспечивает высоту потенциального барьера, очень близкую к этой высоте в базовой оптике.

На рисунке 48 показана угловая расходимость ионного пучка в зависимости от величины нормализованного первеанса. Угловая расходимость рассчитывалась как полуугол при вершине конуса, внутри которого движутся ионы, переносящие 95% полного тока пучка.

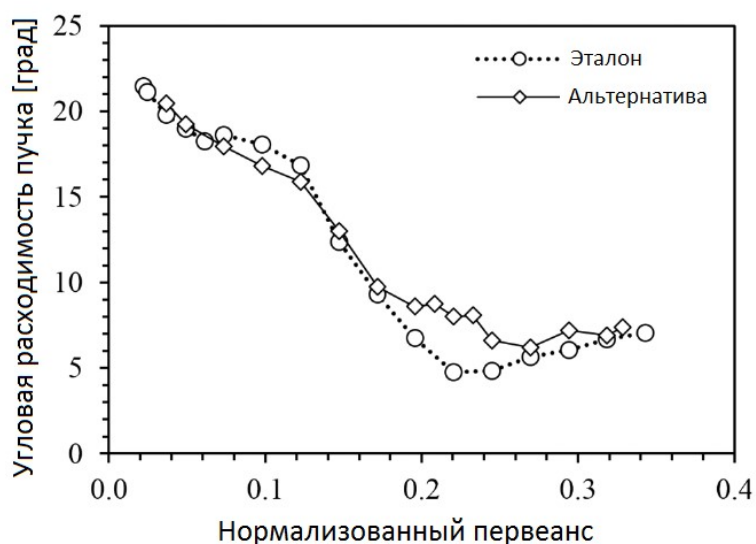


Рисунок 48 - Зависимость угловой расходимости пучка от нормализованного первеанса.

Наиболее существенное отличие значений угловой расходимости у эталонной и альтернативной ионно-оптических систем наблюдается при рабочих значениях диапазона первеанса между 0.18 и 0.26. Более подробный анализ результатов расчета показал, что увеличение угла расходимости в альтернативной ИОС связано с появлением группы несфокусированных ионов, сформировавшейся в угловой части пучка. Аналогичный процесс показан на рисунке 39. Однако, в отличие от группы ионов, показанной на рисунке 39, эта группа ионов в альтернативной ИОС

не попадает на ускоряющий электрод, а только приводит к небольшому увеличению угла расходимости.

При проведении сравнительных расчетных исследований скоростей эрозии эталонной и альтернативной ИОС задавались равные расходы на входе в расчетную область нейтральных атомов и первичных ионов, а со стороны пучковой плазмы ионов перезарядки.

Результаты расчетов скоростей эрозии поверхностей УЭ представлены на рисунках 49-52.

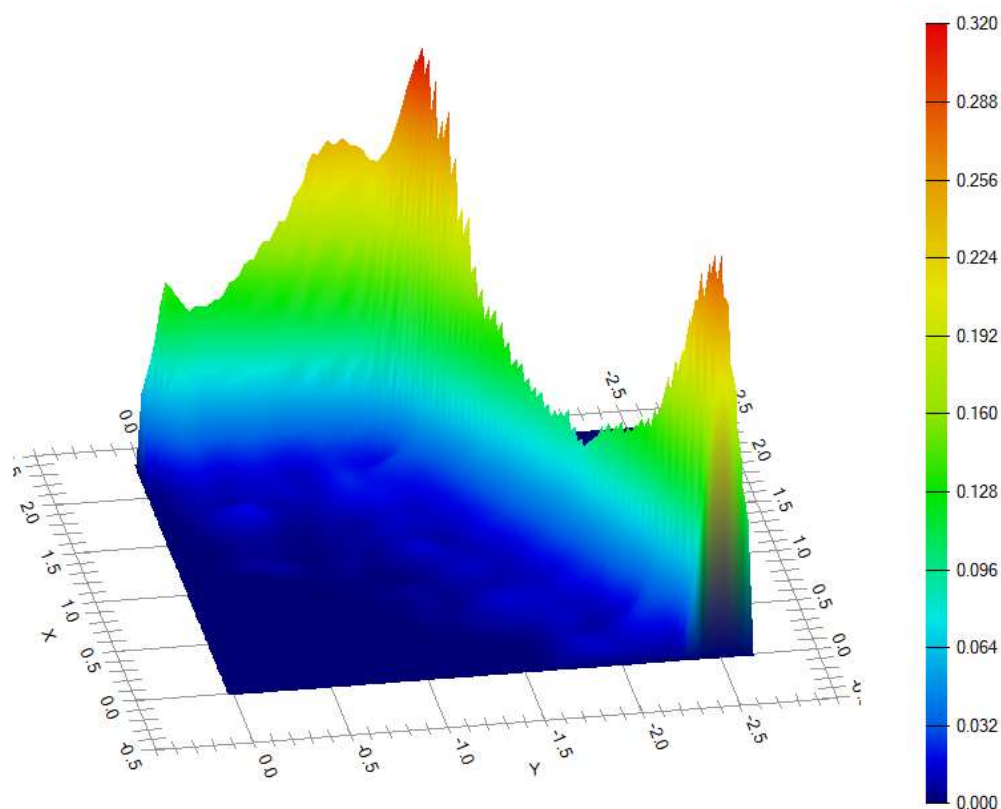


Рисунок 49 - Поверхностная эрозия УЭ с круглыми апертурами

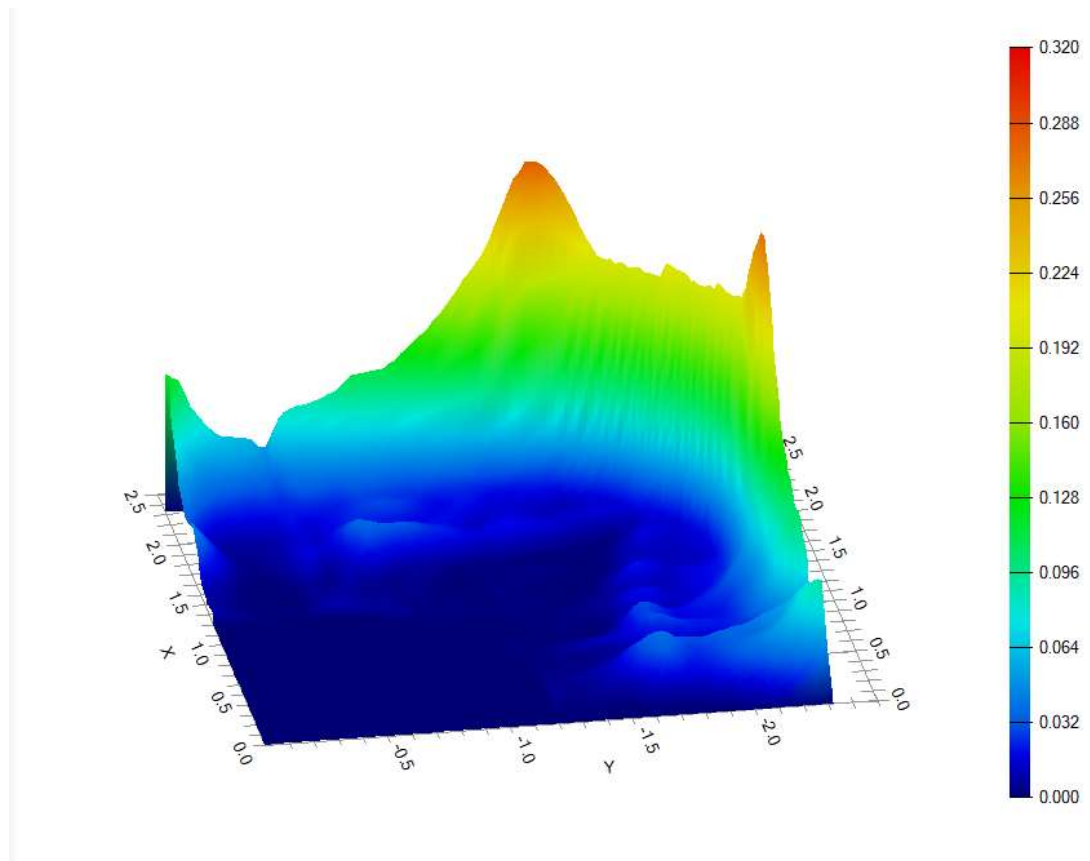


Рисунок 50 - Поверхностная эрозия УЭ с квадратными апертурами со скругленными углами

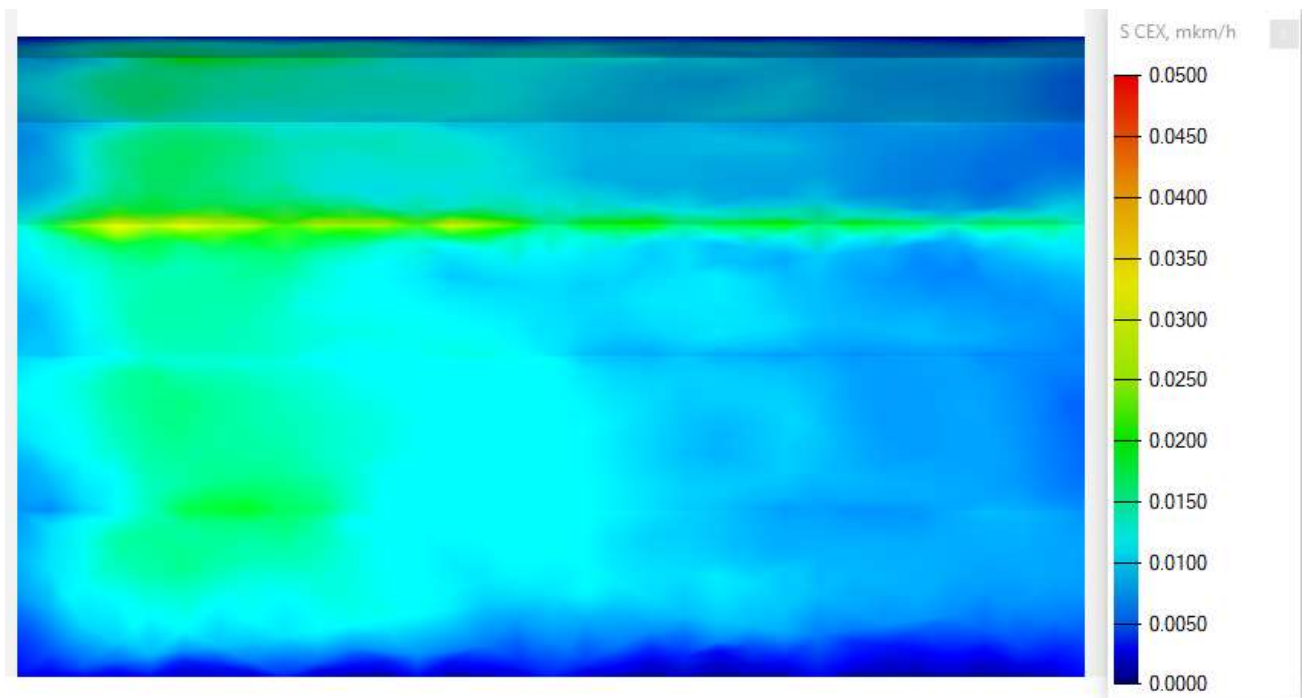


Рисунок 51 - Апертурная эрозия УЭ с круглыми апертурами

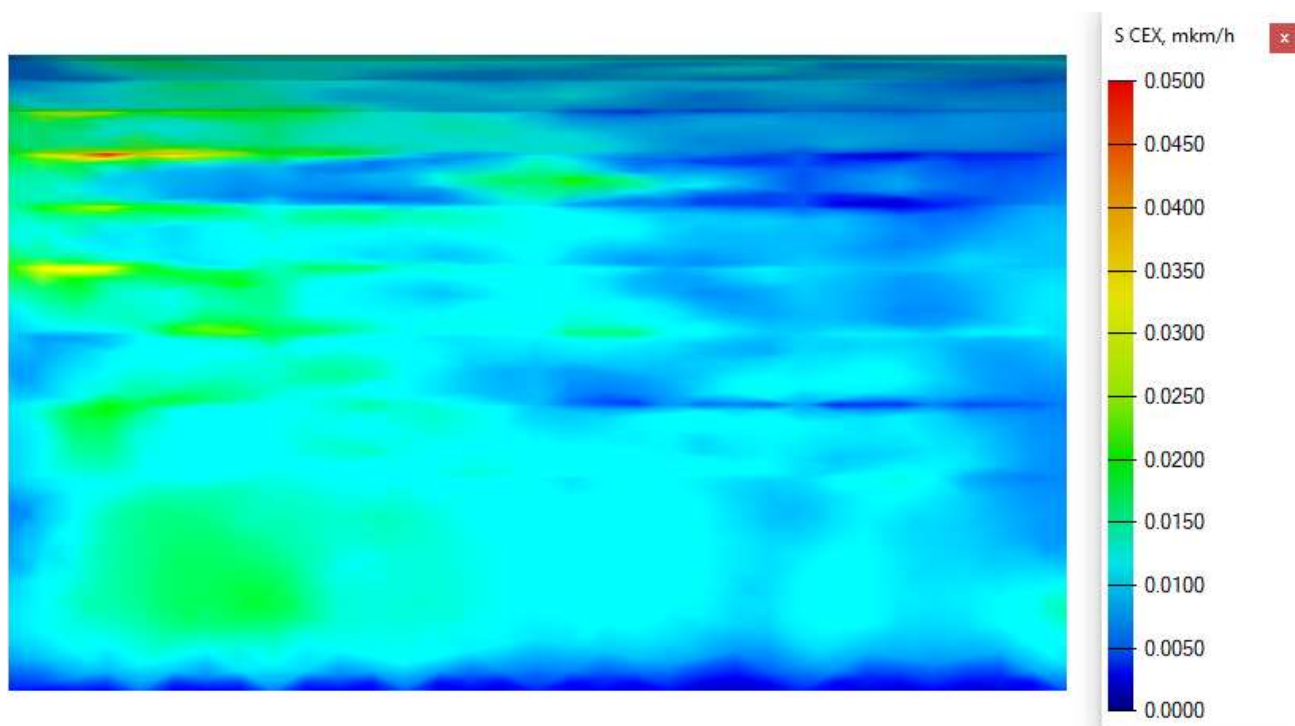


Рисунок 52 - Апертурная эрозия УЭ с квадратными апертурами со скругленными углами

Анализ скоростей эрозии УЭ показал отсутствие поверхностей, подверженных ускоренному распылению при переходе от традиционной к альтернативной форме апертур.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что диапазон рабочих значений первеанса, в котором отсутствует прямая бомбардировка ионами ускоряющего электрода, в новой геометрии может быть сделан близким к соответствующему диапазону ИОС с круглыми апертурами. Кроме этого, такие важные характеристики ионно-оптических систем, как эффективная прозрачность для ионов, эффективная прозрачность для потока нейтральных атомов, высота потенциального барьера, отражающего электроны пучковой плазмы, угловая расходимость элементарного пучка и скорость распыления поверхностей УЭ также могут быть очень близки этим параметрам оптики с круглыми апертурами.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИОС ИД

3.1 Изучение свойств УУКМ на технологических образцах

Электроды ИОС являются штучным изделием и аналогичных тонкостенных изделий серийного производства нет. Поэтому исследования начались с создания небольших технологических образцов для определения взаимосвязей между параметрами технологических процессов, характеристиками материалов и качеством конечного изделия. Были выделены характеристики, которые можно было измерить на имеющемся оборудовании и связать с технологическими процессами. У технологических образцов определялись: пористость, плотность, коэффициент линейного температурного расширения и теплопроводность [78].

Технологические образцы из УУКМ классифицировались по типу наполнителя: двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм; двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,3 мм; войлок и пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм.

3.1.1 Измерение коэффициента линейного температурного расширения УУКМ

Измерение КЛТР материалов проводились на dilatометре NETZSCH DIL 402 E/7-Ру. Погрешность измерений на dilatометре составляла $\pm 2\%$. 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. В таблице 3 приведены результаты измерений КЛТР углеродных материалов при температурах, характерных для электродов ИОС ИД.

Таблица 3. Результаты измерений КЛТР УУКМ.

Материал	Толщина образца, мм	КЛТР, Вт/(м·К)
		При 200 ⁰ С / При 300 ⁰ С
Войлок	1	$1.5 \cdot 10^{-6} / 1.7 \cdot 10^{-6}$
	2	$0.9 \cdot 10^{-6} / 1.2 \cdot 10^{-6}$
Пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм	1	$0.9 \cdot 10^{-6} / 1.2 \cdot 10^{-6}$
	2	$-0.8 \cdot 10^{-6} / -0.4 \cdot 10^{-6}$
Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм	1	$1.45 \cdot 10^{-6} / 1.5 \cdot 10^{-6}$
	2	$1.45 \cdot 10^{-6} / 1.45 \cdot 10^{-6}$

Отрицательные значения КЛТР для образцов толщиной 2 мм с наполнителем на основе пековых волокон с толщиной монослоя 0,4 мм могут объясняться особенностями технологии изготовления. В целях увеличения кажущейся плотности образца в процессе создания препрегов идет пропитка монослоев коллоидным графитом. КЛТР матрицы, представляющей из себя смесь коксового остатка, коллоидного графита и пироуглерода, и КЛТР нитей наполнителя могут отличаться друг от друга и приводить к подобным изменениям итогового КЛТР. Полученные значения КЛТР согласуются с опубликованными в научной литературе данными [40, 43].

3.1.2 Измерение коэффициентов теплопроводности

Измерения коэффициентов теплопроводности проводились на Модуле DiscoveryXenonFlash (DXF) по методу вспышки. Погрешность измерений прибора составляла $\pm 3\%$. Образцы для исследований имели форму плоских дисков (рисунок 53), и измерение теплопроводности анизотропного материала можно было провести только по оси z (таблица 4). Толщина исследованных образцов составляла 2 мм.

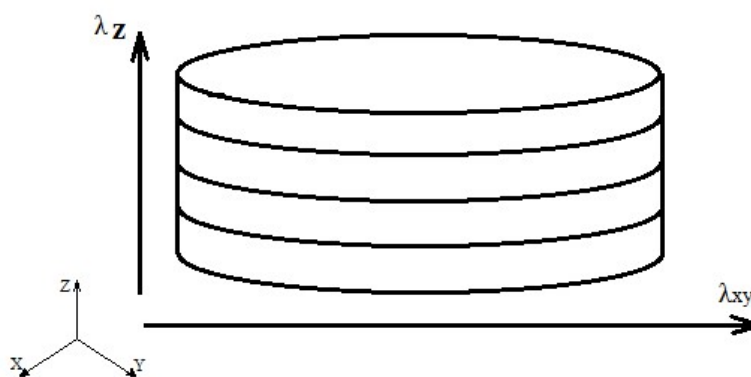


Рисунок 53 - Схема образца для исследования коэффициента теплопроводности.

Таблица 4. Коэффициенты теплопроводности (λ_z) УУКМ.

Т, °С	Образец		
	Войлок	Пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм	Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм
	Теплопроводность (λ_z), Вт/(м·К)		
190	14,90	5,03	2,7
241	14,62	5,38	3,01
292	15,29	5,58	3,17
344	14,96	5,77	3,34
Среднее	14,94	5,44	3,06

Полученные данные сравнивались с экспериментальными значениями коэффициентов теплопроводности λ_{xy} из работы [79], полученными для образцов УУКМ, изготовленных по схожим технологиям (таблица 5).

Таблица 5. Коэффициенты теплопроводности (λ_{xy}) УУКМ, определенные путем сравнения с экспериментальными значениями [79].

Т, °С	Образец		
	Войлок	Пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм	Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм
	Теплопроводность (λ_{xy}), Вт/(м·К)		
190	11,7	132	132
241	13,1	128	128
292	14,3	124	124
344	15	120	120
Среднее	13.5	126	126

3.1.3 Измерение плотности и пористости материалов

УУКМ относятся к пористым материалам, которые характеризуются кажущейся и истинной плотностями, а также пористостью. Пористость (Π) – это совокупная характеристика несплошностей (пор), образованных в материале при его изготовлении или эксплуатации. Кажущаяся плотность ($\rho_{\text{каж}}$) рассчитывается как отношение массы вещества ко всему занимаемому им объёму, включающему открытую и закрытую пористость. Измерения кажущейся плотности проводились гидростатическим методом. Плотность образца при использовании гидростатического взвешивания находится по следующей формуле

$$\rho_{\text{Гидр}} = \frac{m_{\text{возд}}(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}})}{m_{\text{возд}} - m_{\text{жидк}}} + \rho_{\text{в}}, \text{ где } m_{\text{возд}} - \text{масса образца, измеренная на воздухе; } m_{\text{жидк}}$$

– 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. Истинная плотность ($\rho_{\text{плк}}$) является физической константой для конкретного материала, зависит от его строения и определяется как отношение массы к объёму беспористого материала. Измерения истинной плотности проводились на автоматическом гелиевом пикнометре Ultracycrometer 1200e в

соответствии с прилагаемой методикой исследований. Пористость рассчитывалась по формуле $\Pi = \frac{\rho_{\text{пик}} - \rho_{\text{каж}}}{\rho_{\text{пик}}} \cdot 100\%$.

Результаты измерений для исследуемых композиционных материалов представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты измерения плотности и пористости технологических образцов.

Материал	Плотность кажущаяся, г/см ³	Пористость, %
Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм (толщина 1 мм)	1,55 ± 0,05	8,6 ± 0,4
Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,12 мм (толщина 2 мм)	1,60 ± 0,05	8,1 ± 0,4
Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,3 мм (толщина 1 мм)	1,16 ± 0,04	13,4 ± 0,7
Двунаправленная ткань с толщиной монослоя 0,3 мм (толщина 2 мм)	1,29 ± 0,04	8,8 ± 0,4
Войлок (толщина 1 мм)	1,6 ± 0,05	7,0 ± 0,4
Войлок (толщина 2 мм)	1,71 ± 0,05	6,2 ± 0,3
Пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм (толщина 1 мм)	1,74 ± 0,05	5,0 ± 0,2
Пековые волокна с толщиной монослоя 0,4 мм (толщина 2 мм)	1,74 ± 0,05	5,3 ± 0,3

После проведения измерений плотности и пористости была проведена тестовая лазерная обработка технологических образцов, заключающаяся в создании 7 круглых отверстий, диаметром 4 мм с толщиной перемычки между отверстиями 0,3 мм (рисунок 54а). В ходе подбора режима работы лазерная резка проводилась на воздухе и на аргоне. Поскольку существенных изменений в качестве отверстий обнаружено не было, был выбран режим резки на воздухе. При создании отверстий проводилась оценка точности изготовления и отслеживание появляющихся дефектов материала заготовки.

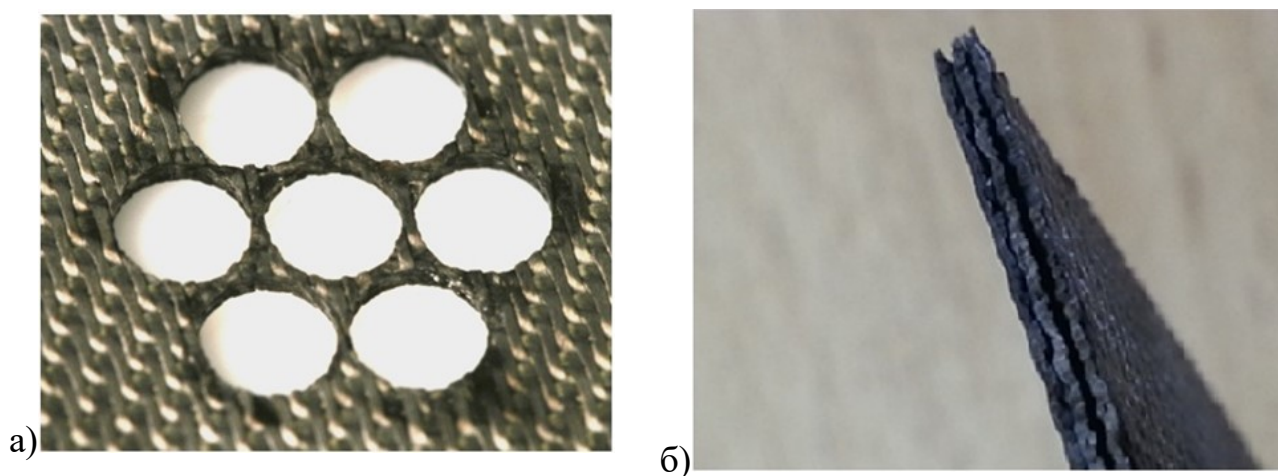


Рисунок 54 - а) Пример перфорации технологических образцов на лазерном станке; б) Расслоения после перфорации образца из двунаправленной ткани с толщиной монослоя 0,3 мм (толщина 1 мм)

Лазерная резка образцов из двунаправленной ткани с толщиной монослоя 0,3 мм с толщинами 1 мм и 2 мм привела к перегоранию перемычек и расслоению заготовок (рисунок 54б). Возможно, расслоения уже присутствовали в образце, и это отразилось на значениях кажущейся плотности и пористости. Для нахождения расслоений в заготовках обычно используют ультразвуковую диагностику, однако, исследование было затруднено малой толщиной образца. В ходе отработки технологии лазерной резки было установлено, что в образцах из войлока в процессе обработки начинается трещинообразование, приводящее к разрушению заготовки либо в процессе, либо после завершения обработки. В процессе обработки заготовок с наполнителями в виде двунаправленной ткани с толщиной монослоя

0,12 мм и пековых волокон с толщиной монослоя 0,4 мм процесс трещинообразования не наблюдался, качество полученных отверстий было удовлетворительным.

Для оценки качества материала были сформулированы следующие требования по значениям плотности и пористости: кажущаяся плотность заготовки более 1,6 г/см³, пористость менее 7 %. Для проведения работ по созданию электродов были выбраны УУКМ на основе двунаправленной ткани с толщиной монослоя 0,12 мм и УУКМ на основе пековых волокон с толщиной монослоя 0,4 мм (далее по тексту двунаправленная ткань и пек соответственно).

3.2 Оценка возможности применения разработанных УУКМ в ИОС со сферическими электродами большого диаметра

Как показывает опыт разработки ИОС с электродами диаметром 50-75 см [52,53,58], избежать соударений между плоскими электродами под воздействием стартовых вибрационных нагрузок удаётся не всегда даже при использовании УУКМ с повышенной жёсткостью. В этом случае необходимо использование электродов сферической формы. Для расчёта ИОС с электродами сферической формы требуется оценка взаимного смещения апертур при тепловых деформациях электродов. Для обеспечения возможных дальнейших работ в этом направлении был проведён расчётный анализ термомеханических свойств ИОС со сферическими электродами, изготовленными из исследованных в настоящей работе УУКМ. В частности, исследуемые материалы планировалось использовать при создании сферических электродов двигателя ИД-500.

Расчет проводился в программе, разработанной в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Программа предназначена для моделирования теплового состояния двухэлектродных ИОС, состоящих из эмиссионного и ускоряющего электродов с гексагональным расположением круглых апертур. Оба электрода представляют собой тонкие пластины, имеющие форму сегмента сферы, сопряженные с плоскими кольцевыми частями для крепления к фланцам двигателя (рисунок 55). Программа осуществляет расчёт температур электродов и их тепловых

деформаций, расчёт координат отверстий в холодном и нагретом состояниях и формирование блока данных с координатами отверстий, который используется при разработке чертежей электродов.

В блоке расчёта температур электродов и тепловых деформаций реализованы алгоритмы расчета тепловых нагрузок на эмиссионный и ускоряющий электроды, решение системы двух уравнений теплопроводности для этих электродов и расчёт деформированного состояния электродов в стационарном нагретом состоянии.

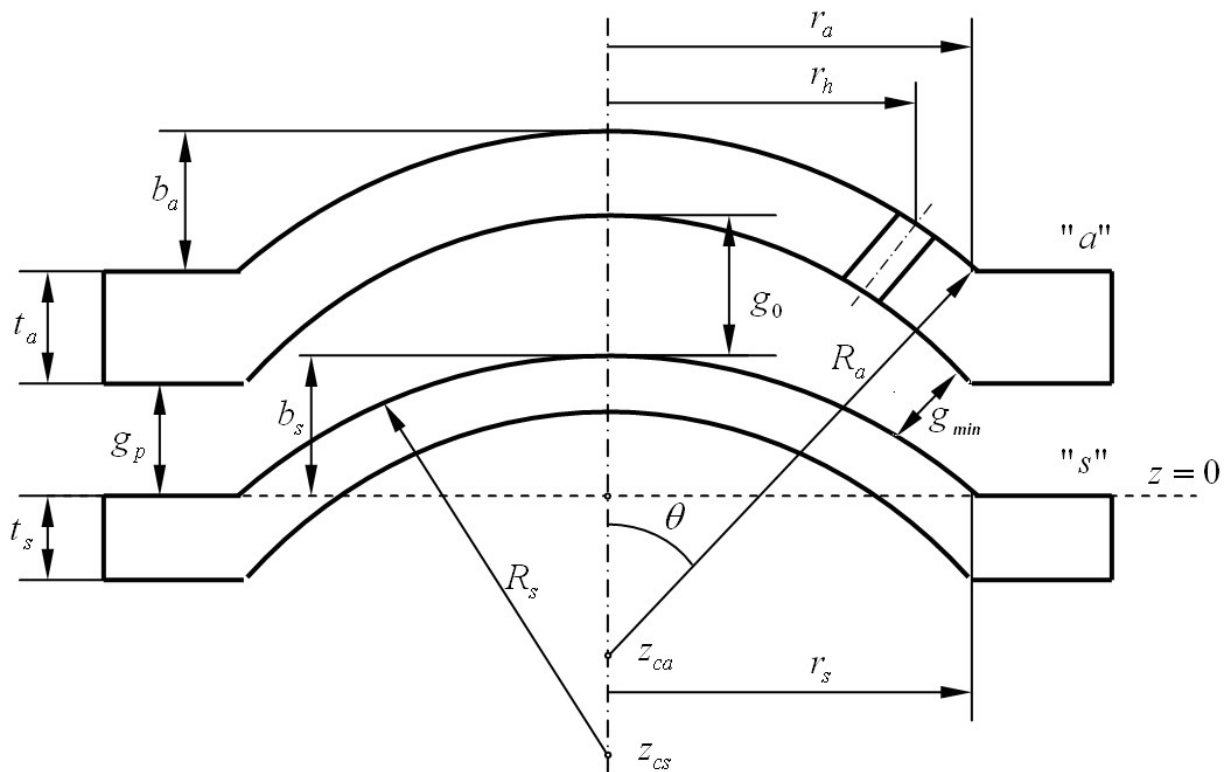


Рисунок 55 - Схема электродов ИОС

Расчёт тепловых нагрузок на электроды проводится следующим образом. По формулам $\Omega_s = (\pi/2\sqrt{3})(d_s/h)^2$, $\Omega_a = (\pi/2\sqrt{3})(d_a/h)^2$ рассчитываются геометрические прозрачности электродов. Здесь индексы "а" и "s" – обозначают УЭ и ЭЭ соответственно, Ω_a и Ω_s - геометрические прозрачности УЭ и ЭЭ соответственно, h – расстояние между центрами соседних апертур, d – диаметр апертуры. Вычисляются эффективные значения теплопроводности электродов с учетом их геометрической прозрачности: $\lambda_{effs} = C_\lambda(\Omega_s) \cdot \lambda_s$, $\lambda_{effa} = C_\lambda(\Omega_a) \cdot \lambda_a$,

где функция $S(\Omega)$ – поправка к теплопроводности как функция прозрачности, учитывающая наличие в пластине круглых апертур, λ – коэффициент теплопроводности материала.

Далее проводится расчёт плотности теплового потока на эмиссионный и ускоряющий электроды, создаваемого ионами плазмы ГРК и пучковой плазмы. Плотность теплового потока на ускоряющий электрод Q_{SI} определяется как произведение плотности ионного тока J_S , поступающего на него из ГРК, на среднюю энергию, которая выделяется при падении одного иона: $\varepsilon_{av} = U_d + \varphi_I + T_e/2 - \varphi_w$, где U_d – напряжение разряда в газоразрядной камере, φ_I – потенциал ионизации атомов рабочего тела, T_e – температура электронов в газоразрядной камере, φ_w – работа выхода электронов из материала эмиссионного электрода.

В расчётной модели считается, что вся энергия, выделяющаяся при рекомбинации иона, поглощается материалом электрода. Также предполагается, что ионы подходят к плазменной границе с бомовской скоростью, а потенциал плазмы равен потенциалу анода. Если из экспериментальных данных или теоретических оценок известен пристеночный скачок потенциала между плазмой и анодом, то эта величина должна быть прибавлена к значению U_d . Плотность ионного тока, попадающего на эмиссионный электрод, является функцией радиуса и рассчитывается с учётом вида распределения плотности ионного тока по радиусу ИОС $J_I^*(r/r_s)$, где r_s – расстояние от оси симметрии до места сопряжения сферического сегмента с плоским кольцом, а также зависимости прозрачности ИОС для ионов от плотности тока ионов, поступающих из ГРК $\Omega_I(J_I)$.

Считается, что тепловой поток на ускоряющий электрод Q_{aI} создаётся вторичными ионами, поступающими со стороны пучковой плазмы и проходящими разность потенциалов φ_a . Так как эта величина в ИД составляет сотни вольт, то начальной бомовской скоростью ионов пучковой плазмы, соответствующей энергии, порядка единиц электрон-вольт, пренебрегается. Величина ионного тока, поступающего из пучковой плазмы, рассчитывается как произведение тока пучка

I_b на коэффициент K_a , где K_a – отношение тока вторичных ионов, попадающих на ускоряющий электрод к току ионного пучка.

После расчёта тепловых нагрузок проводится численное решение системы двух уравнений теплопроводности, записанных в одномерном приближении для тонких сферических оболочек, которые обмениваются тепловым излучением. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 T_s}{d\theta^2} + ctg\theta \frac{dT_s}{d\theta} = -\frac{R_s^2 W_s}{\lambda_{effs} t_s} \\ \frac{d^2 T_a}{d\theta^2} + ctg\theta \frac{dT_a}{d\theta} = -\frac{R_a^2 W_a}{\lambda_{effa} t_a} \end{cases}$$

где W_s , W_a – плотности суммарной тепловой мощности, поступающей на эмиссионный и ускоряющий электроды в результате ионной бомбардировки, взаимного облучения поверхностей и излучения из плазмы ГРК; t_s и t_a – соответственно толщины эмиссионного и ускоряющего электродов, T_a и T_s – соответственно температуры эмиссионного и ускоряющего электродов.

На оси симметрии для обоих уравнений задаются граничные условия Неймана $dT_{s,a}/d\theta|_{\theta=0} = 0$, на границе сопряжения с плоскими кольцевыми частями – граничные условия Дирихле $dT_s/d\theta|_{\theta=\arcsin\frac{r_s}{R_s}} = T_{cs}$, $dT_a/d\theta|_{\theta=\arcsin\frac{r_a}{R_a}} = T_{ca}$, где T_{cs} и T_{ca} – температуры кольцевых частей ЭЭ и УЭ соответственно. Система уравнений решается численно методом итераций с постоянным значением коэффициента верхней релаксации $0 < c_r < 2$. Подсчёт лучистых потоков проводится методом «лучистого сальдо». Для расчёта значений W_s и W_a на каждой итерации в каждом узле расчётной сетки решается система четырёх уравнений относительно четырёх значений испускаемых лучистых потоков Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 :

$$\begin{aligned} [1 - (1 - \varepsilon_1)\varphi_{11}]Q_1 - (1 - \varepsilon_1)\varphi_{21}Q_2 - (1 - \varepsilon_1)\varphi_{31}Q_3 - (1 - \varepsilon_1)\varphi_{41}Q_4 &= \sigma\varepsilon_1 T_1^4 S_1 + (1 - \varepsilon_1)q_p S_1 \\ -(1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}Q_1 + [1 - (1 - \varepsilon_2)\varphi_{22}]Q_2 - (1 - \varepsilon_2)\varphi_{32}Q_3 - (1 - \varepsilon_2)\varphi_{42}Q_4 &= \sigma\varepsilon_2 T_2^4 S_2 + (1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}q_p S_1 \\ -(1 - \varepsilon_3)\varphi_{13}Q_1 - (1 - \varepsilon_3)\varphi_{23}Q_2 + [1 - (1 - \varepsilon_3)\varphi_{33}]Q_3 - (1 - \varepsilon_3)\varphi_{43}Q_4 &= \sigma\varepsilon_3 T_3^4 S_3 + (1 - \varepsilon_3)\varphi_{13}q_p S_1 \end{aligned}$$

$$-(1-\varepsilon_4)\varphi_{14}Q_1 - (1-\varepsilon_4)\varphi_{24}Q_2 - (1-\varepsilon_4)\varphi_{34}Q_3 + [1-(1-\varepsilon_4)\varphi_{44}]Q_4 = \sigma\varepsilon_4T_4^4S_4 + (1-\varepsilon_4)\varphi_{14}q_pS_1,$$

где S_i – площади излучающих поверхностей электродов; ϕ_{ij} – компоненты матрицы взаимного облучения газоразрядной камеры, вакуумной камеры и электродов ИОС, угловой коэффициент определён, как доля излучения поверхности «i» поступающая на поверхность «j»; q_p – задаёт плотность мощности излучения из плазмы газового разряда; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты; и, как и ранее, индексы обозначают следующие поверхности: 1 – ГРК; 2 – эмиссионный электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – вакуумная камера. Значения S_i рассчитываются для элементарной шестигранной ячейки (рисунок 56).

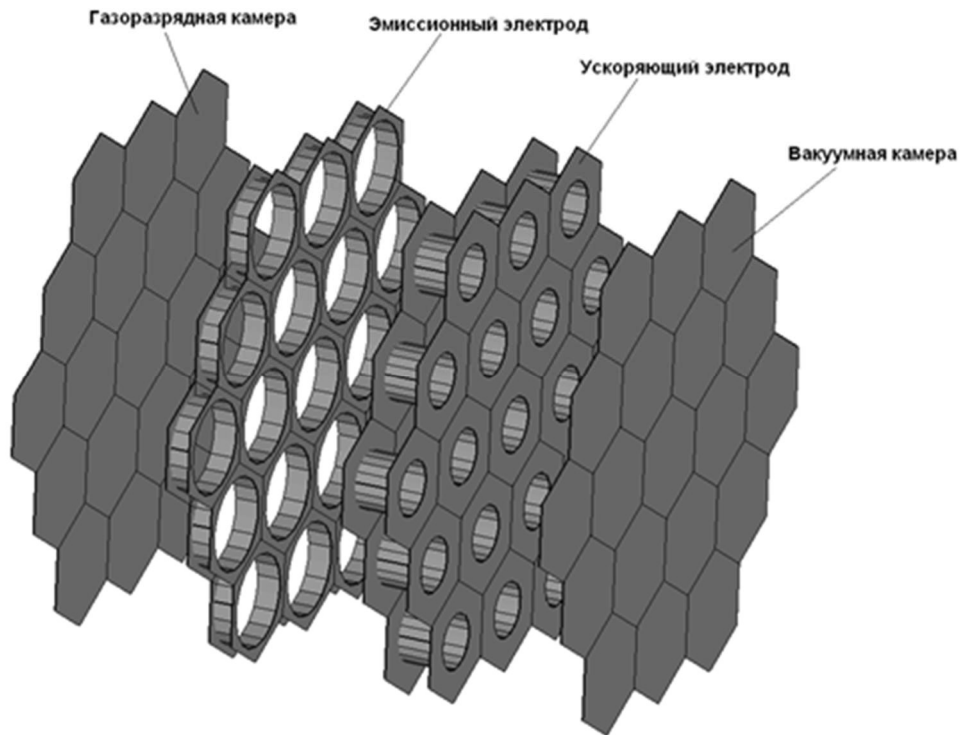


Рисунок 56 - Трёхмерная модель ИОС для расчёта угловых коэффициентов.

Полученные в результате решения значения Q_i используются для определения плотности теплового потока, поглощённого эмиссионным и ускоряющим электродами:

$$W_s = \varepsilon_2[\phi_{12}(Q_1 + q_pS_1) + \phi_{22}Q_2 + \phi_{32}Q_3 + \phi_{42}Q_4] + Q_{sI}$$

$$W_a = \varepsilon_3[\phi_{13}(Q_1 + q_pS_1) + \phi_{23}Q_2 + \phi_{33}Q_3 + \phi_{43}Q_4] + Q_{aI}.$$

После достижения заданной относительной погрешности вычисления температур проводится расчёт параметров тепловых деформаций электродов. В разработанной программе принято допущение о сохранении электродами сферической формы и малости влияния механических напряжений на величину деформации. Считается, что в холодном состоянии оба электрода имеют температуру, совпадающую с температурой вакуумной камеры T_V .

В результате нагревания радиусы сопряжения сферической и плоской кольцевой частей электродов увеличиваются до значений $r_{sh} = r_s[1 + \alpha_{Ls}(T_{cs} - T_V)]$, $r_{ah} = r_a[1 + \alpha_{La}(T_{ca} - T_V)]$, где α_{Ls} и α_{La} - коэффициенты линейного температурного расширения ЭЭ и УЭ соответственно.

Изменение длины образующей сферической части рассчитывается для обоих электродов путём усреднения относительного удлинения $\Delta l_{s,a} = \int_0^{\arcsin(r_{s,a}/R_{s,a})} \alpha_{Ls,a} R_{s,a} \cdot [T_{2,3}(\theta) - T_V] d\theta$.

После этого проводится расчёт значений радиусов кривизны и центров кривизны в нагретом состоянии, и вычисляются координаты центров отверстий. В нагретом состоянии апертуры в эмиссионном и ускоряющем электродах соосны. На заключительном этапе расчёта проводится вычисление координат центров отверстий в холодном состоянии.

Для оценки влияния теплопроводности на смещение координат центров отверстий при переходе из холодного состояния в горячее для двигателя ИД-500 были проведены расчеты для виртуального материала, обладающего КТЛР УУКМ ($\sim 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и $\lambda_{ху}$ от 10 Вт/(м·К) до 150 Вт/(м·К). Расчет показал, что разница в смещениях в горячем состоянии составила $\approx 0,2 \%$, что не приводит к существенному сужению диапазона допустимой плотности тока. Влияние коэффициента линейного температурного расширения на смещение отверстий ИОС ИД-500 при переходе из холодного состояния в горячее для УУКМ на основе двунаправленной ткани с толщиной монослоя 0,12 мм не более 0,85% от величины межцентрового расстояния, а изменение межэлектродного зазора не более 0,9%. У

УУКМ на основе пековых волокон с толщиной монослоя 0,4 мм и войлока эти величины составят 1,65% и 1,88%, 1,3% и 1,5% соответственно. При таких смещениях сужением диапазона допустимой плотности тока двигателя ИД-500 можно пренебречь для всех исследуемых материалов, а следовательно, нет необходимости смещать центры отверстий при прожигании, а также предварительно прогревать узел ИОС перед извлечением пучка.

3.3 Изготовление электродов для ионного двигателя ИД-200

Первыми были изготовлены сферические электроды ИОС из УУКМ с наполнителем на основе двунаправленной ткани. Технология изготовления состояла из нескольких этапов. В начале на основе выбранного наполнителя создавались препреги путем пропитки фенольной смолой ткани наполнителя. Из препрегов выкраивались лепестки, которые выкладывались на сферическую матрицу. Каждый последующий слой перекрывал стыки лепестков предыдущего слоя, формируя по толщине будущую заготовку. Сформированная заготовка проходила режим термообработки под давлением (полимеризация). Полученная углепластиковая заготовка проходила три высокотемпературные стадии технологического процесса: карбонизацию, высокотемпературную обработку и пироуплотнение. На стадии карбонизации из матрицы удалялись летучие продукты. Завершение этапа карбонизации определялось окончанием термоструктурных процессов коксообразования. Установленные уровни давления и температуры в процессе карбонизации обеспечивали перестройку пористой структуры материала, сопровождавшуюся ростом удельного объема пор и увеличением в общем объеме пор доли каналов, являющихся транспортными для газообразных реагентов. Пироуплотнение проходило при заданных температуре, давлении в камере и соотношении метана и водорода. Процесс пироуплотнения мог идти в несколько этапов, прерываясь на механическую обработку поверхности изделия для открытия пор. Прорезание отверстий в заготовках осуществлялось по нормали к поверхности сферы на пятикоординатном лазерном станке на воздухе.

По форме и геометрическим параметрам отверстий в зоне перфорации электроды из УУКМ были идентичны ранее изготовленным титановым электродам. Геометрические параметры апертур и толщин электродов представлены в таблице 7.

Таблица 7. Геометрические параметры апертур и толщин электродов.

Электрод	Толщина, мм	Диаметр отверстия, мм	Шаг решётки, мм
Эмиссионный	1,0	4,0	4,6
Ускоряющий	2,0	2,4	

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 схожи. 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 ткани и пека изготавливались плоские электроды с выкладкой монослоев $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$ и $0^{\circ}/90^{\circ}$. Технология создания плоских заготовок отличалась от технологии создания сферических заготовок только краем и ориентацией слоёв препрегов. Заготовки имели форму плоских дисков. Электроды с круглыми апертурами изготавливались из заготовок с выкладкой препрегов $[0^{\circ} / + 60^{\circ} / -60^{\circ}]$ (рисунок 53). Геометрические параметры апертур в зоне перфорации и толщины электродов с круглыми апертурами соответствовали параметрам, приведенным в таблице 6. Из заготовок с выкладкой $[0^{\circ} / 90^{\circ}]$ изготавливались электроды с квадратными отверстиями со скругленными углами (рисунок 58). Параметры апертур и толщин электродов с квадратными апертурами со скругленными углами представлены в таблице 8. Форма отверстий была заранее рассчитана в программном продукте IOS-3D. Выкладка и форма апертур способствовали максимальному сохранению неповрежденных волокон в

перемычках между отверстиями в зоне перфорации. Все сборки ИОС успешно прошли огневые и вибрационные испытания. В ходе вибрационных испытаний межэлектродных соударений не наблюдалось ни на одной из сборок ИОС.

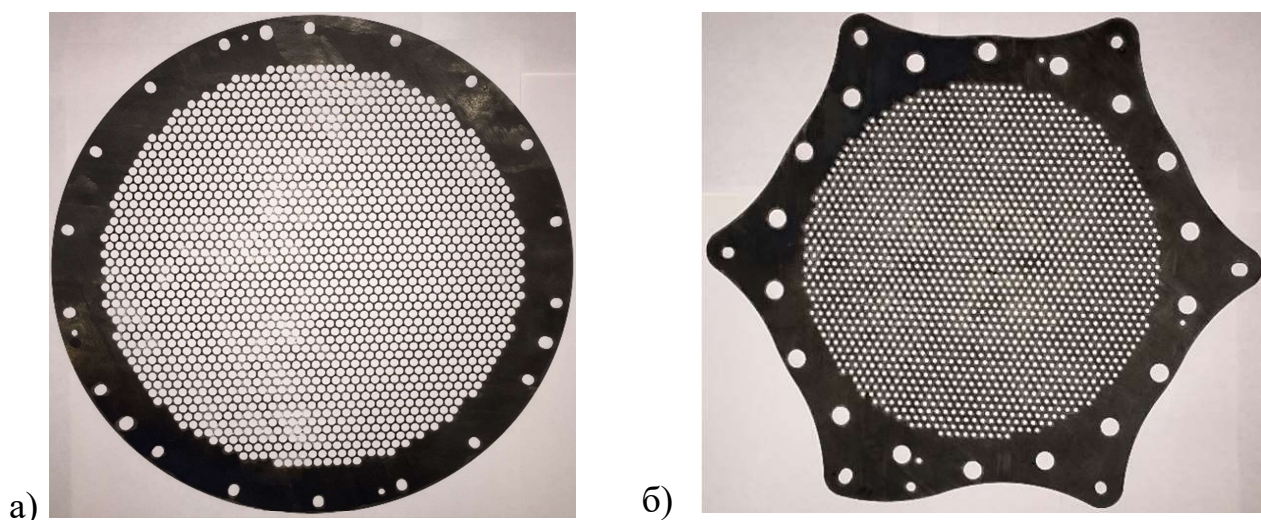


Рисунок 57 - Внешний вид электродов с круглыми отверстиями: а) эмиссионный электрод; б) ускоряющий электрод

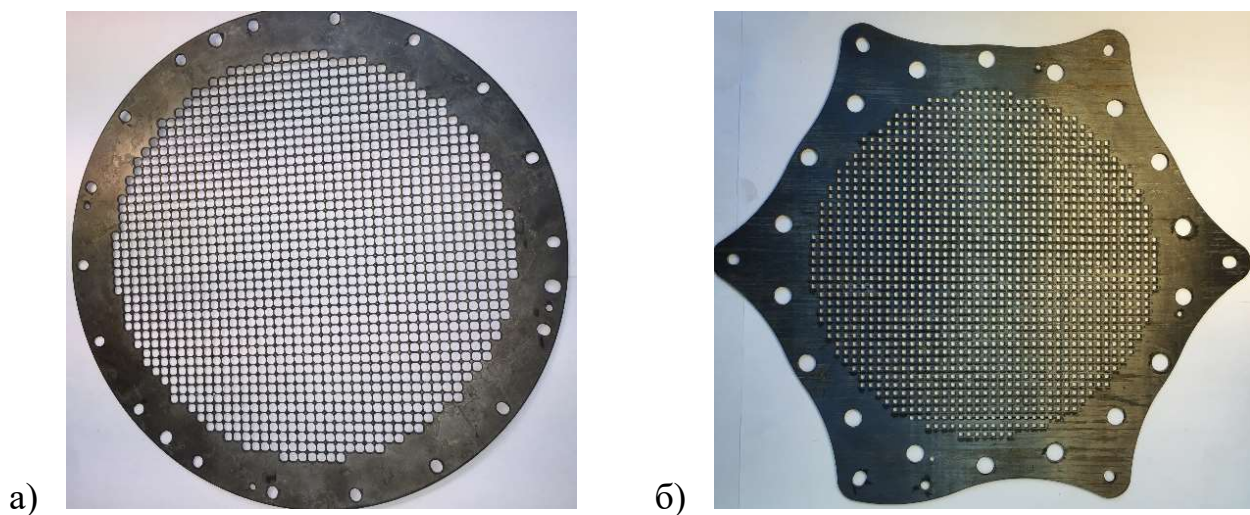


Рисунок 58 - Внешний вид электродов с квадратными отверстиями со скруглёнными углами: а) эмиссионный электрод; б) ускоряющий электрод

Таблица8. Геометрические параметры апертур и толщин электродов с квадратными отверстиями со скругленными углами.

Электрод	Толщина, мм	Сторона квадрата, мм	Радиус скругления, мм	Шаг решётки, мм
Эмиссионный	1,0	4,0	0,6	2,4
Ускоряющий	2,0	2,4	0,2	

3.4 Изготовление электродов для ионного двигателя ИД-200 КР.

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 материала с отработанной технологией на основе двунаправленной ткани и нового материала на основе однонаправленной ленты. Плотность и пористость заготовок соответствовала требованиям, приведенным выше. Технология изготовления заготовок для ИД-200 КР не проходила существенных изменений по сравнению с технологией создания электродов для ИД-200.

В таблице 9 отражены этапы отработки технологии электродов из УУКМ.

Таблица9. Этапы отработки технологии.

Производитель	2017 год				2018 год			
	0 ⁰ /60 ⁰ /-60 ⁰		0 ⁰ /90 ⁰		0 ⁰ /60 ⁰ /-60 ⁰		0 ⁰ /90 ⁰	
	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
ООО НПО Авиа- КОМПОЗИТ	А (+)	А (-)	А (+)	А (-)	А (+)	А (+)	А (+)	А (+)
АО УНИИКМ	А (-)	А (+)	А (-)	А (-)	Б (+)	Б (+)	Б (+)	Б (+)

Каждый материал в таблице условно характеризуется наполнителем, толщиной и ориентацией слоёв в заготовке. (+) – означает, что по завершению цикла изготовления из заготовок были получены электроды ИОС соответствующие КД без существенных дефектов, (-) – в процессе изготовления электрода был выявлен брак. А и Б – условные обозначения композиционных материалов по наименованию наполнителя, где А – двунаправленная ткань, Б – однонаправленная лента. $0^0/60^0/-60^0$ и $0^0/90^0$ – ориентация монослоев в заготовках электродов ИОС с круглыми отверстиями (ИОС-КР) и в заготовках электродов ИОС с квадратными отверстиями со скругленными углами (ИОС-КВ) соответственно. 0,5 и 1,0 – толщины заготовок в мм.

На первом этапе были созданы плоские электроды ИОС-КР с ориентацией слоёв в заготовках $0^0/60^0/-60^0$ (рисунок 59). Геометрические параметры электродов представлены в таблице 10.



Рисунок 59 - ИОС ИД-200 КР с круглыми апертурами.

Таблица 10. Геометрические параметры электродов ИОС-КР ИД-200 КР

Электрод	Толщина, мм	Диаметр отверстия, мм	Шаг решётки, мм
Эмиссионный	0,5	2,0	2,4
Ускоряющий	1,0	1,4	

После успешных огневых испытаний были проведены вибрационные испытания двигателя. В ходе испытаний на широкополосную случайную вибрацию с усилением 9,2 g были зафиксированы соударения электродов друг о друга. По результатам проверки было обнаружено разрушение электродов (рисунок 60). На эмиссионном электроде (ЭЭ) выпала перемычка в центральной области. Разрушения на ускоряющем электроде (УЭ) оказались более значительны – выпала часть электрода в зоне перфорации, характерные размеры выпавшего элемента составили 15 мм x 30 мм, от места разрушения пошла трещина в центральную область электрода. Необходимо отметить, что несмотря на одинаковый армирующий материал технологии создания электродов отличались: ЭЭ изготавливался на предприятии ООО НПО Авиа-композит, УЭ – на предприятии АО УНИИКМ.

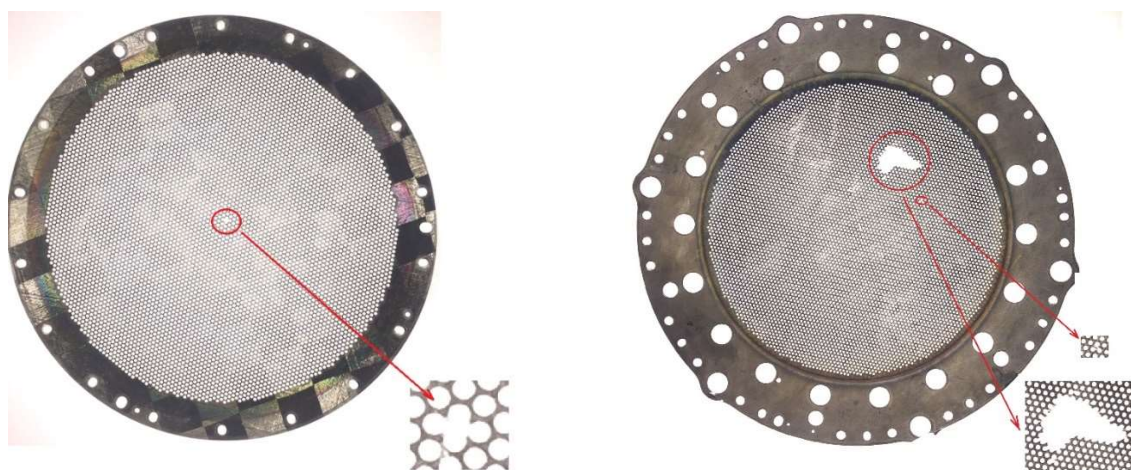


Рисунок 60 - Разрушения эмиссионного (слева) и ускоряющего (справа) электродов после вибрационных испытаний.

В местах разрушения УЭ были заметны характерные следы расслоения, что могло быть связано с особенностями технологии изготовления электрода. Разрушение перемычки ЭЭ скорее всего связано с локальным дефектом, послужившим источником образования трещины.

Параллельно с изготовлением традиционных ИОС-КР в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» была разработана ИОС с плоскими электродами из УУКМ с

квадратными отверстиями со скругленными углами с выкладкой монослоёв $0^{\circ}/90^{\circ}$. Геометрические параметры ИОС-КВ представлены в таблице 11.

Таблица 11. Геометрические параметры электродов ИОС-КВ ИД-200 КР

Электрод	Толщина, мм	Сторона квадрата, мм	Радиус скругления, мм	Шаг решётки, мм
Эмиссионный	0,5	2,0	0,6	2,4
Ускоряющий	1,0	1,4	0,2	

Схемы армирования ИОС-КР и ИОС-КВ представлены на рисунке 61. Испытания проходили две сборки: первая из УУКМ на основе двунаправленной ткани производства ООО НПО Авиакompозит, вторая – на основе однонаправленной ленты производства АО УНИИКМ (рисунок 62).

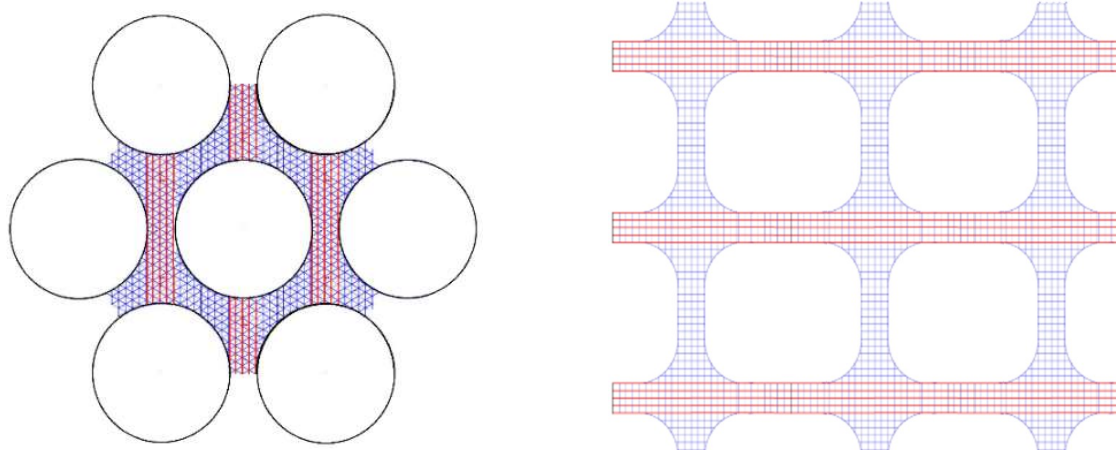


Рисунок 61 - Расположение армирующих нитей в электродах с круглыми отверстиями и квадратными отверстиями со скругленными углами (красным цветом выделено одно из направлений армирования).

Обе сборки ИОС-КВ прошли огневые и вибрационные испытания в составе двигателя ИД-200КР. В ходе вибрационных испытаний также происходили соударения между электродами. Испытания показали, что (1) новая форма апертур ИОС-КВ не приводит к существенному изменению диапазона первеанса по сравнению с традиционными круглыми апертурами, и (2) ИОС-КВ вне зависимости от материала выдерживает нагрузку $\sigma=9,2$ г.

Полученные данные могут свидетельствовать как о повышенной механической прочности ИОС-КВ за счет сохранения большего числа неповрежденных нитей в перемычках между отверстиями [43], так и о технологических дефектах в электродах ИОС-КР.



а) сборка узла ИОС, б) общий вид апертур в центральной области зоны перфорации.

В связи с ограниченным количеством образцов электродов ИОС, провести статистические исследования стойкости электродов с разными схемами армирования к вибрационным нагрузкам не представлялось возможным. Поэтому в следующей главе на основе имеющихся образцов и данных литературного обзора (Глава 1) был проведен анализ механизмов разрушения электродов в ходе стартовых вибрационных нагрузок и сформулированы критерии, позволяющие сделать выбор между предложенными схемами армирования.

ГЛАВА 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИОС С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ АРМИРОВАНИЯ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

4.1 Механизмы разрушения электродов ИОС под действием вибрационных нагрузок.

Основываясь на приведенном в Главе 1 обзоре, можно выделить два подхода к проектированию узла ИОС с электродами из УУКМ.

В первом случае не допускается соударения между электродами. Данный подход реализован при проектировании ускорительных систем для двигателей NSTAR [50,51] и NEXIS [52]. Предотвращения соударений между электродами добиваются путем увеличения жесткости электродов. В работах [50-52,58] жёсткость повышалась путем перехода к сферической форме электродов, увеличения высоты сегмента сферы и толщины электродов. Второй подход допускает межэлектродные соударения и реализован при проектировании ИОС с плоскими электродами из УУКМ двигателей $\mu 10$ [60,61] и $\mu 20$ [63,64].

Для прогнозирования стойкости электродов из УУКМ к вибрационным воздействиям пользуются расчетно-экспериментальными методами, в которых свойства композиционного материала определяются из микромеханических моделей. В подобных моделях имитация композиционного материала осуществляется посредством репрезентативных элементарных объёмов (РЭО). Репрезентативный элементарный объём (РЭО) – минимальный элемент электрода ИОС из УУКМ, позволяющий представить перфорированный композиционный материал как однородный, с сохранением его механических характеристик. Данный подход был реализован при моделировании 30-см ИОС из УУКМ для NSTAR [80] и ИОС двигателя NEXIS [52], $\mu 20$ [63,64]. По результатам моделирования воссоздавались кривые спектральной плотности ускорения в произвольных точках электрода, которые затем напрямую сравнивались с показаниями акселерометра в ходе вибрационных испытаний. Сравнение расчётных и экспериментальных данных позволяет скорректировать

коэффициенты демпфирования мод в расчетной модели для достижения наилучшего соответствия.

Однако, в данной модели не учитываются процессы распространения трещин в композите в результате межэлектродных соударений. Повторяющиеся низкоскоростные удары приводят к усталостному разрушению композиционного материала, которое начинается с матрицы [81]. Гетерогенная структура и поверхности раздела между волокном и матрицей затрудняют процесс распространения трещины в направлении, перпендикулярном оси волокон. Таким образом возникающее напряжение распространяется вдоль волокон, а матрица служит средой для передачи усилий.

Вследствие неоднородности выкладки волокон и большого количества дефектов в матрице предсказание стойкости электродов ИОС из УУКМ к низкоскоростным ударам является пока нерешенной задачей.

Примером может быть разрушение сферических электродов из УУКМ для двигателя NSTAR в ходе вибрационных испытаний в результате соударений [51], а также в дальнейшем принятое решение о недопустимости соударений. В случае с двигателем $\mu 20$, при толщине ЭЭ 1 мм сборка ИОС успешно прошла вибрационные испытания при наличии соударений. К сожалению, после уменьшения толщины электрода до 0,75 мм никакой информации об успешно пройденных вибрационных испытаниях в публикациях найти не удалось.

Опыт создания сферических электродов из пироуглерода для NSTAR [49] показывает, что электроды сохранили целостность после вибрационных испытаний, несмотря на межэлектродные соударения в ходе эксперимента. Но разработчики все равно пошли по пути увеличения жесткости конструкции в целях предотвращения межэлектродных соударений.

Суммируя имеющуюся информацию, можно сделать два вывода: во-первых, на сегодняшний день существующие методики моделирования вибрационного воздействия на электроды ИОС не способны учесть процессы развития трещин в УУКМ под воздействием низкоскоростных ударов; во-вторых, проведение сравнительного экспериментального исследования стойкости электрода к

усталостному разрушению в зависимости от схемы армирования затруднено в силу отсутствия достаточного количества образцов, изготовленных по одной технологии, для получения статистически достоверного результата.

Предполагая, что в ходе испытаний недопустимы межэлектродные соударения, сформулировать критерий выбора между двумя схемами армирования можно, руководствуясь минимальным допустимым расстоянием между электродами. Минимум этого расстояния определяется параметром пороговой напряженности электрического поля между электродами. Пороговая напряженность – максимальное значение напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре, при котором не происходит межэлектродных электрических пробоев.

При установленной величине зазора в соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра можно оценить среднюю плотность ионного тока, вытягиваемую через единичную ячейку ИОС:

$$j_b \approx \alpha \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M} \frac{U_a^3}{l_e^2}} = \alpha \frac{4}{9} \varepsilon_0 E^2 \sqrt{\frac{2e}{MU_a}},$$

где ε_0 – электрическая постоянная, $\alpha \approx 0,35$ – коэффициент, который учитывает отличие геометрии ячейки с круглой апертурой от геометрии плоского диода, j_b – средняя по миделю плотность тока на входе в ИОС, U_a – ускоряющая разность потенциалов, l_e – «эффективная» длина ускорения $l_e = \sqrt{(l + T_s)^2 + R_s^2}$, T_s – толщина эмиссионного электрода, R_s – радиус отверстия эмиссионного электрода, l – величина межэлектродного зазора, E – напряженность поля в межэлектродном зазоре.

При заданном диаметре зоны перфорации D , тягу двигателя можно оценить из выражения: $R = \eta_\theta j_b D \sqrt{\frac{2M}{e} U_{пл}}$, где η_θ – коэффициент, учитывающий потери, вызванные расходимостью ионного пучка и наличием в пучке многозарядных ионов; e , M – заряд и масса иона; $U_{пл}$ – потенциал плазмы в ГРК, который близок к

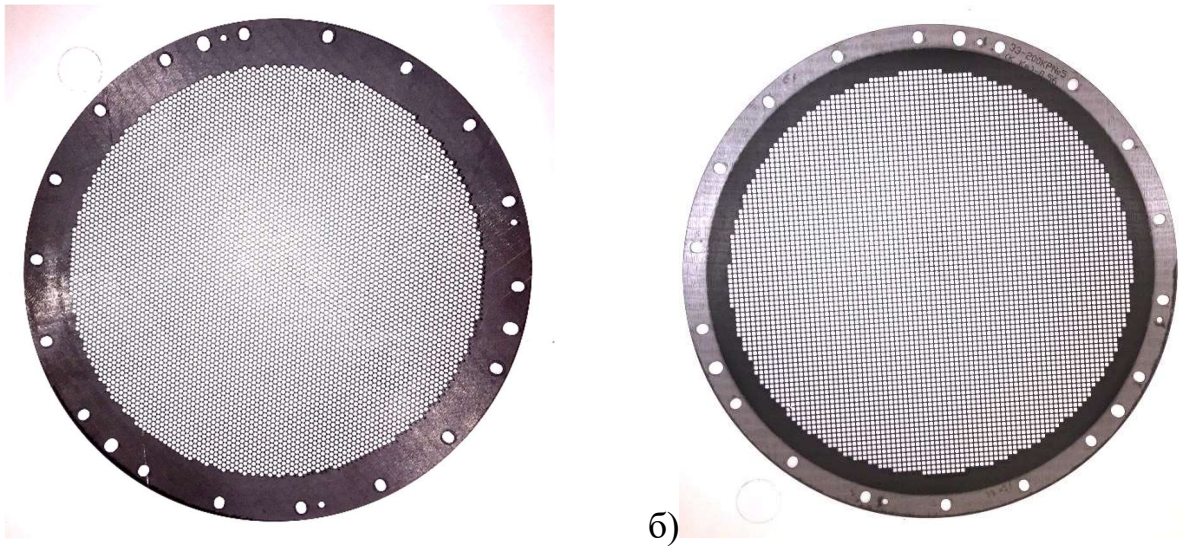
потенциалу анода ГРК ($U_{\text{пл}}=U_s+U_d$); U_s – потенциал эмиссионного электрода; U_d – напряжение разряда в ГРК. Отсюда следует, что $R \sim E^2 \sim \frac{1}{l^2}$.

Таким образом, максимальная тяга двигателя достигается при минимально допустимом зазоре между электродами. В тех случаях, когда при минимально допустимом зазоре, т.е. при максимальной плотности ионного тока, свойства материала электродов не позволяют обеспечить требуемый ресурс ИОС, зазор увеличивают с целью уменьшения средней плотности тока и соответствующего уменьшения плотности тока ионов перезарядки на ускоряющий электрод. В любом случае при разработке ИОС бывает известен зазор между ЭЭ и УЭ. Поэтому критерием выбора той или иной схемы армирования является обеспечение такой жёсткости электродов, при которой отсутствуют соударения между электродами.

Для сравнения жёсткости электродов с разными схемами армирования были проведены автономные вибрационные испытания, в которых определялись первые резонансные частоты и сравнивались перемещения электродов.

4.2 Автономные вибрационные испытания ИОС из УУКМ с различными схемами армирования.

В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» в ходе разработки узла ИОС для двигателя ИД-200 КР в АО «УНИИКМ» были созданы электроды с наполнителем на основе однонаправленной ленты. Для исследования влияния схемы армирования на жёсткость электрода в качестве объектов исследования были выбраны эмиссионный электрод с круглыми апертурами со схемой армирования $0^0/60^0/-60^0$ и эмиссионный электрод с квадратными апертурами со скругленными углами со схемой $0^0/90^0$. Внешний вид электродов представлен на рисунке 63. Геометрические параметры представлены в таблицах 10 и 11 соответственно. Оба электрода были созданы по одной технологии, с единственным отличием, заключающемся в выкладке монослоев препрегов.



а) б)
Рисунок 63 - ЭЭ ИОС ИД-200 КР: а) с круглыми апертурами; б) с квадратными апертурами со скругленными углами.

Схема экспериментальной установки, на которой проводились вибрационные испытания, представлена на рисунке 64.

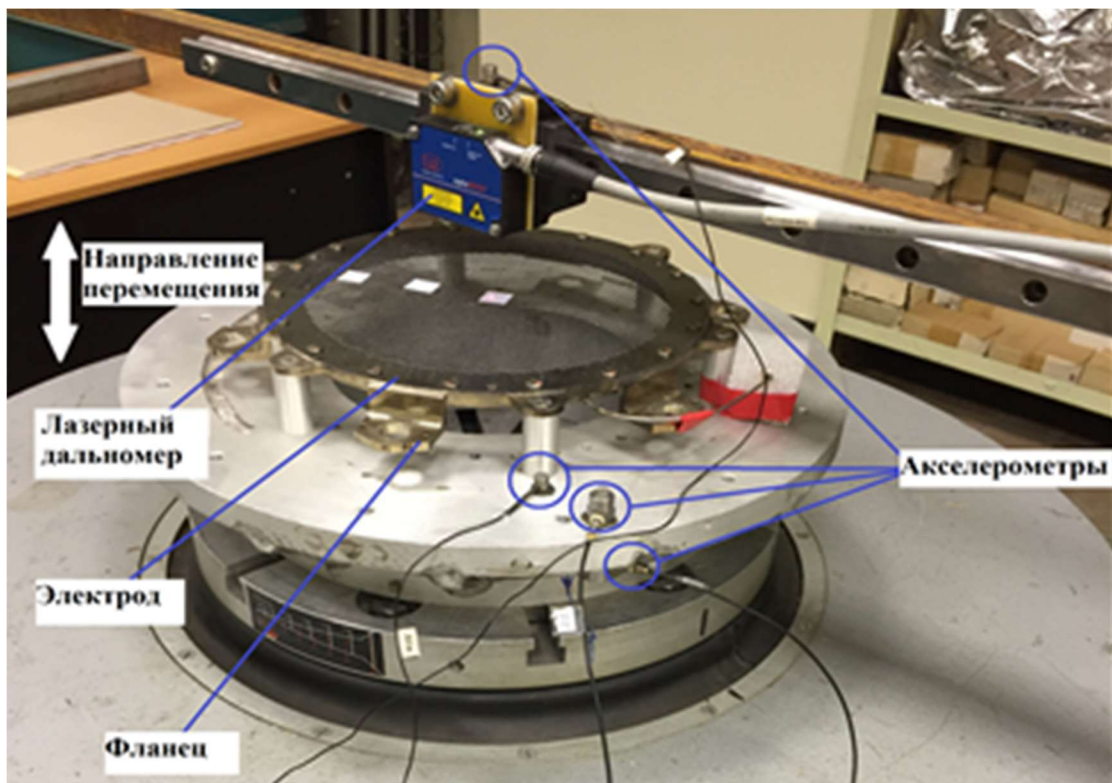


Рисунок 64 - Схема экспериментальной установке по определению перемещения электродов ИОС под действием сканирующей синусоидальной нагрузки.

Электрод жёстко 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. 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.

Измерения лазерным дальномером осуществлялись на поверхности электрода в четырех точках в радиальном направлении: в центре зоны перфорации и далее с шагом 40 мм в сторону крепежного фланца. В каждой из точек были определены первая резонансная частота и соответствующее ей перемещение.

Результаты сравнительных вибрационных испытаний приведены на рисунке 65. Сравнительные автономные вибрационные испытания показали, что собственная частота сборки фланца и электрода с круглыми отверстиями составила 140 ± 10 Гц, а у электродов с квадратными отверстиями со скругленными углами собственная частота составила 190 ± 10 Гц. 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.

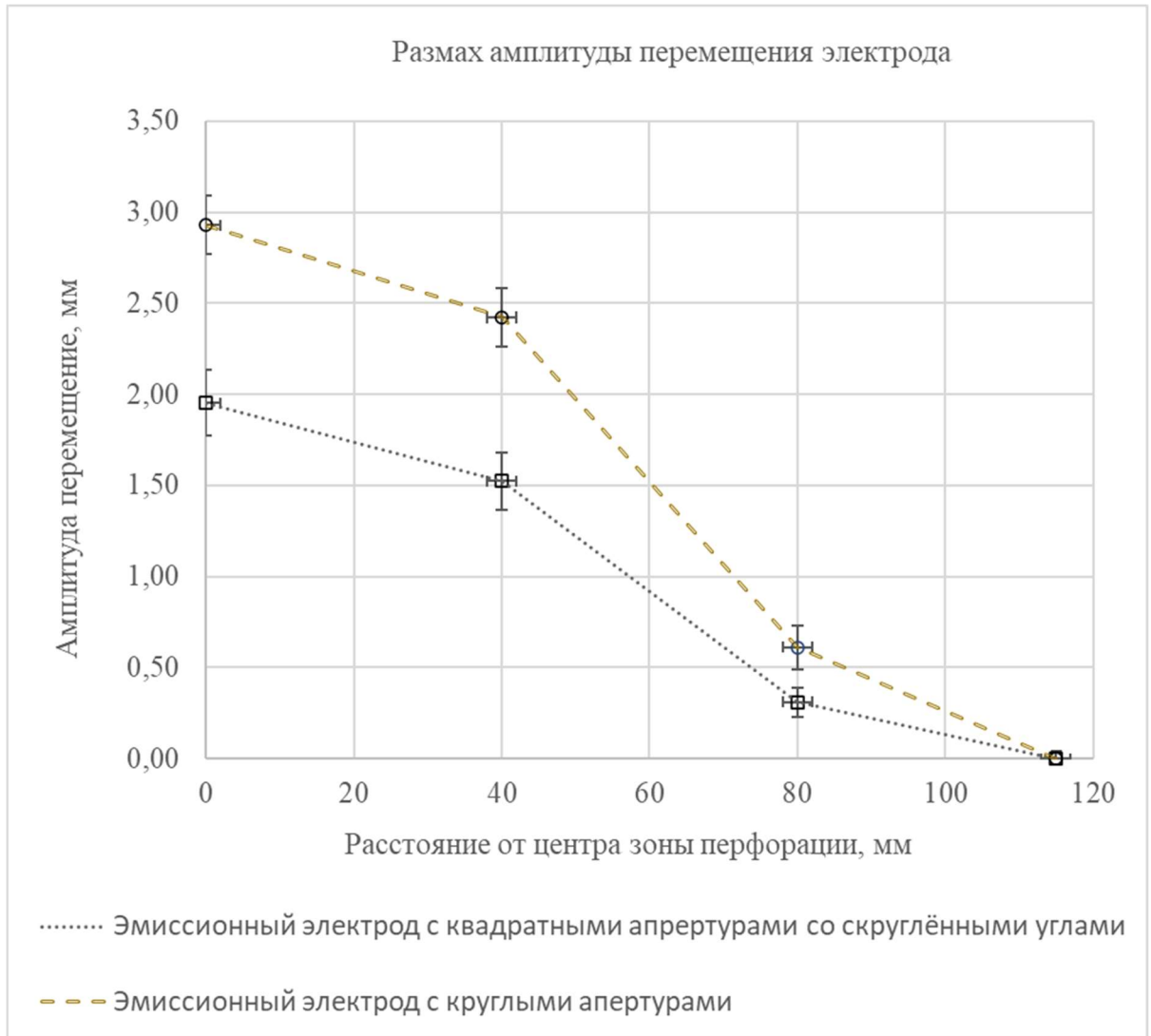


Рисунок 65 - Результаты сравнительных вибрационных испытаний.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ДИАПАЗОНОВ ПЕРВЕАНСОВ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С КРУГЛЫМИ И КВАДРАТНЫМИ АПЕРТУРАМИ

В настоящей главе представлены результаты сравнительного экспериментального исследования диапазонов первеанса ИОС ионных двигателей с круглыми и квадратными апертурами со скруглёнными углами и сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования [82].

5.1 Ионно-оптическая система

Внешний вид ИОС с круглыми апертурами в сборе показан на рисунке 66. Геометрические параметры ИОС были выбраны на базе результатов численного моделирования, полученных с использованием компьютерной программы «IOS-3D». Результаты численного исследования характеристик ИОС двух типов подробно описаны в Главе 2.



Рисунок 66 - Внешний вид ИОС в сборе

В обоих вариантах ИОС минимальная толщина перемычек между апертурами одинакова. Для удобства сравнения размеры апертур и расстояния между ними в обоих вариантах ИОС выбирались таким образом, чтобы обеспечить близкие по величине значения геометрической прозрачности электродов. Радиусы скругления

квадратных апертур в ИОС нового типа подбирались так, чтобы обеспечить максимальный диапазон рабочих значений плотности ионного тока, в котором отсутствует прямое попадание ионов на ускоряющий электрод.

Основные параметры ИОС обоих типов представлены в таблице 12.

Таблица 12. Геометрические характеристики электродов ИОС.

	Общие параметры	
	Круглые	Квадратные
Диаметр зоны перфорации ИОС, мм	200	
Потенциал эмиссионного электрода, В	4500	
Потенциал ускоряющего электрода, В	-400	
Расстояние между центрами отверстий, мм	4,6	
Толщина эмиссионного электрода, мм	1	
Толщина ускоряющего электрода, мм	2	
Межэлектродный зазор, мм	2	
Толщина перемычки эмиссионного электрода, мм	0,6	
Толщина перемычки ускоряющего электрода, мм	2,2	
Диаметр / сторона квадрата апертуры эмиссионного, мм	4	
Диаметр / сторона квадрата апертуры ускоряющего, мм	2,4	
	Круглые	Квадратные
Количество отверстий	1651	1421
Геометрическая прозрачность эмиссионного электрода	0,686	0,677
Геометрическая прозрачность ускоряющего электрода	0,247	0,246
Радиус скругления апертуры эмиссионного электрода, мм	-	1,4
Радиус скругления апертуры ускоряющего электрода, мм	-	0,8

5.2 Двигатель ИД-200

Испытания проводились на ионном двигателе ИД-200 [77]. В номинальном режиме при работе на ксеноне двигатель имеет мощность 5 кВт, тягу 100 мН и удельный импульс 6600 с. Диаметр ИОС двигателя равен 200 мм. Конструктивная схема и внешний вид двигателя в сборе с ИОС с квадратными апертурами приведены на рисунке 67.

В конструкции разрядной камеры используется схема с разрядом постоянного тока. Разрядная камера состоит из двух секций – цилиндрической и конической. Внутри разрядной камеры расположены два анода, которые также имеют цилиндрическую и коническую форму.

Катод, служащий для поддержания разряда, расположен на оси газоразрядной камеры. Он имеет полиэммиттерную структуру и изготовлен из пористого вольфрама, пропитанного барием. Катод-нейтрализатор расположен снаружи на корпусе двигателя.

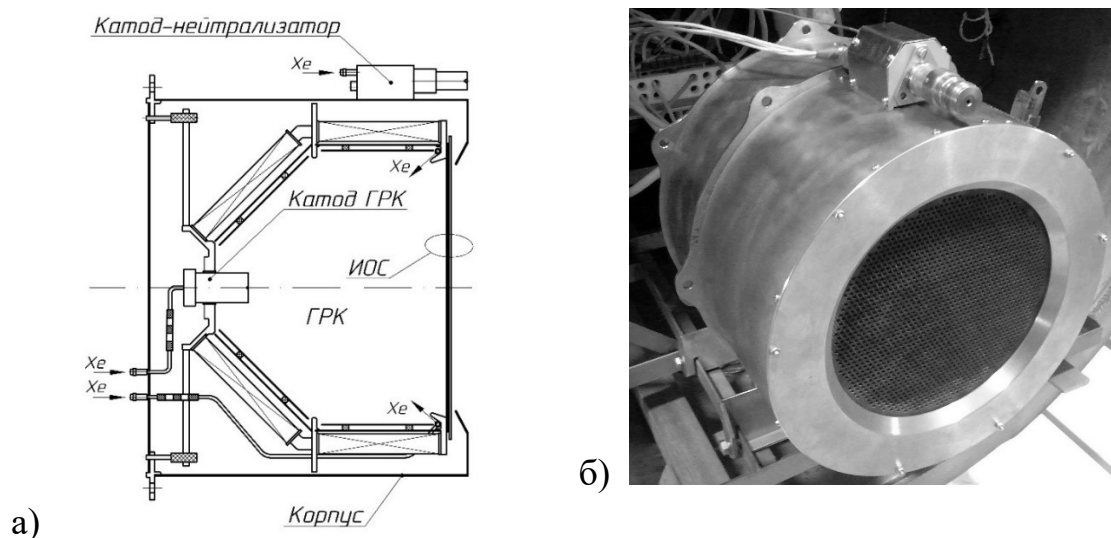


Рисунок 67 - Ионный двигатель ИД-200: а) упрощённая схема; б) внешний вид

Газообразный ксенон подаётся в ГРК частично через полый катод, частично через кольцевой газораспределитель, расположенный вблизи ИОС. Такое

расположение газораспределителя позволяет увеличить время пребывания атомов внутри ГРК до того, как они попадут на ИОС, и тем самым повысить вероятность их ионизации.

Магнитное поле внутри газоразрядной камеры создаётся при помощи электромагнитных катушек, намотанных на ферромагнитные сердечники. Магнитная система включает два набора магнитных катушек. Первый расположен снаружи вдоль цилиндрической части ГРК, второй – вдоль конической части. Токи в катушках разных зон направлены в противоположных направлениях.

5.3 Экспериментальная установка

Испытания проводились на установке КВУ-90 Центра Келдыша [83]. Вакуумная камера имеет объем 90 м^3 при диаметре 3,8 м. Рабочее давление в камере в ходе испытаний не превышало $1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ (по показаниям ионизационной лампы, отградуированной по азоту). Вакуумная камера защищена от воздействия ионного потока охлаждаемой графитовой мишенью, размещённой внутри камеры. Электропитание двигателя осуществлялось от стендовой стойки системы электропитания, которая способна обеспечить питание ионного пучка мощностью до 35 кВт. Для подачи ксенона в ГРК и катоды использовалась система подачи рабочего тела на основе регуляторов расхода газа с расходом в коллектор ГРК – до 3 мг/с, в катод ГРК – до 1,5 мг/с, в катод-нейтрализатор – до 0,7 мг/с. Для контроля и записи параметров двигателя использовалась компьютерная система сбора данных на основе пакета LabVIEW.

5.4 Распределение плотности ионного тока

Основной целью экспериментов было сравнение рабочих диапазонов тока у ИОС с круглыми и с квадратными отверстиями и проверка результатов численного моделирования, согласно которым эти диапазоны для обоих ИОС должны быть близки друг к другу. Однако из-за того, что плотность плазмы и плотность ионного тока внутри ГРК существенно изменяется в радиальном направлении, для сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования необходимо знать зависимость от радиуса плотности ионного тока, поступающего из объёма

ГРК к внутренней поверхности ИОС. Для определения этой зависимости были предварительно проведены измерения радиального распределения плотности тока в ионном пучке вблизи ионно-оптической системы. В этих экспериментах использовался ранний вариант ИОС с титановыми электродами, имеющими сферическую форму.

Измерения проводились при помощи набора из пяти зондов Фарадея, которые по конструкции аналогичны зондам, использовавшимся для диагностики струи холловских двигателей. Зонды были смонтированы на специальном кронштейне так, что расстояние от ускоряющего электрода до собирающей поверхности зондов было одинаковым для всех пяти зондов. Схема и внешний вид системы зондовых измерений показан на рисунке 68.

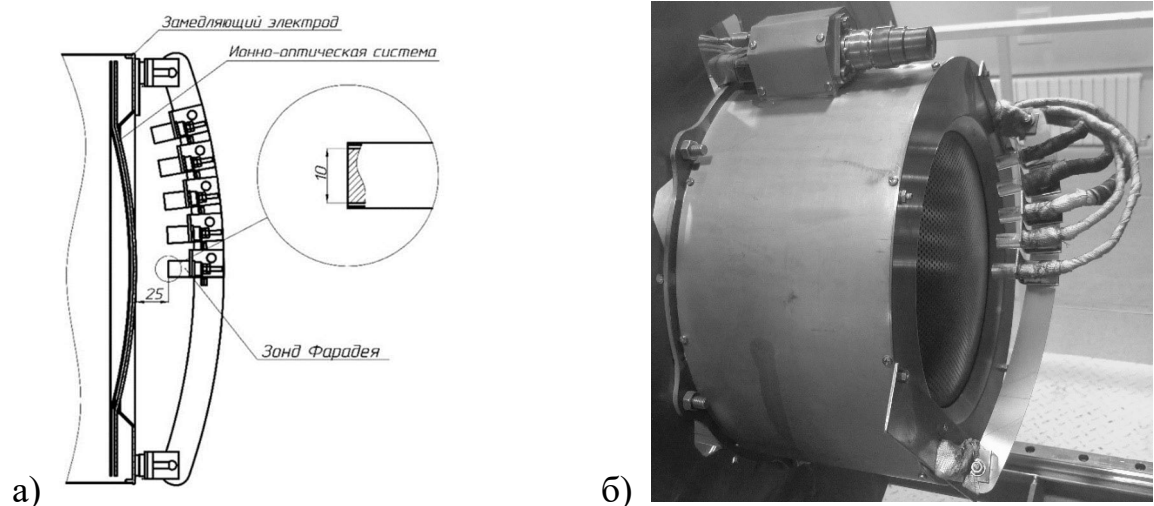


Рисунок 68 - Система зондовых измерений распределения плотности тока:

а) схема; б) внешний вид

Была выполнена серия измерений на нескольких режимах, отличающихся мощностью разряда в ГРК и током в катушках электромагнитов. На каждом режиме значение плотности тока внутри ГРК определялось по значению плотности тока в пучке, исходя из зависимости эффективной прозрачности ИОС для ионов от плотности тока внутри ГРК. Данные об эффективной прозрачности были получены в предыдущем разделе путём численного моделирования единичной ячейки ИОС.

Измерения показали, что форма распределения плотности ионного тока по радиусу слабо зависит от мощности разряда и определяется, главным образом, величиной тока в катушках магнитной системы. На рисунке 69 показаны нормированные на максимальное значение распределения плотности тока перед ИОС, измеренные при токах в магнитных катушках 1.5, 2.5 и 3.5 А.

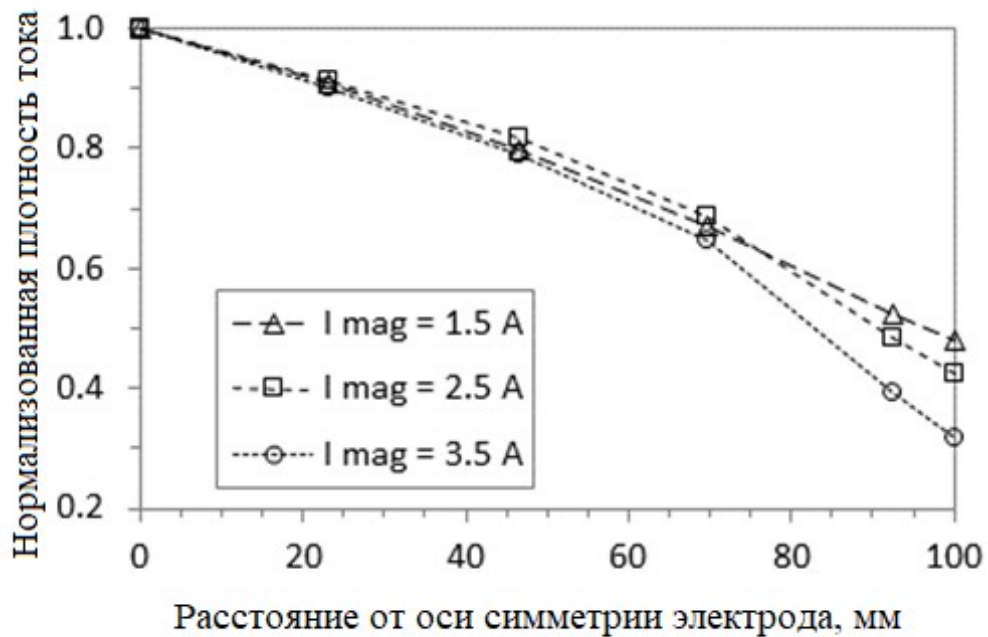


Рисунок 69 - Нормированные распределения плотности тока перед ИОС при разных токах в магнитных катушках.

При увеличении тока в магнитных катушках происходит рост эффективности работы двигателя, который сопровождается снижением цены ионы и ростом газовой эффективности. Однако для сравнительного исследования свойств ИОС был выбран режим с током в катушках 1.5 А, так как в нём наблюдается наиболее однородное распределение тока ионов по радиусу. В этом режиме обеспечиваются наиболее благоприятные условия для сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

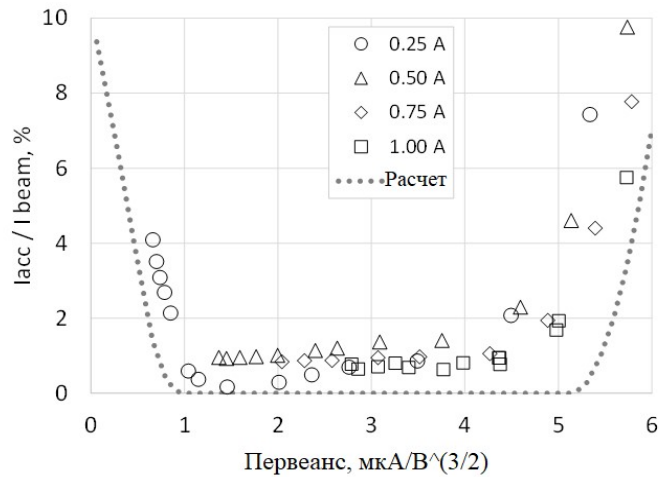
5.5 Диапазоны первеанса

Основной эксперимент по определению диапазонов первеанса ИОС состоял в измерении тока ионного пучка и тока ионов на ускоряющий электрод при

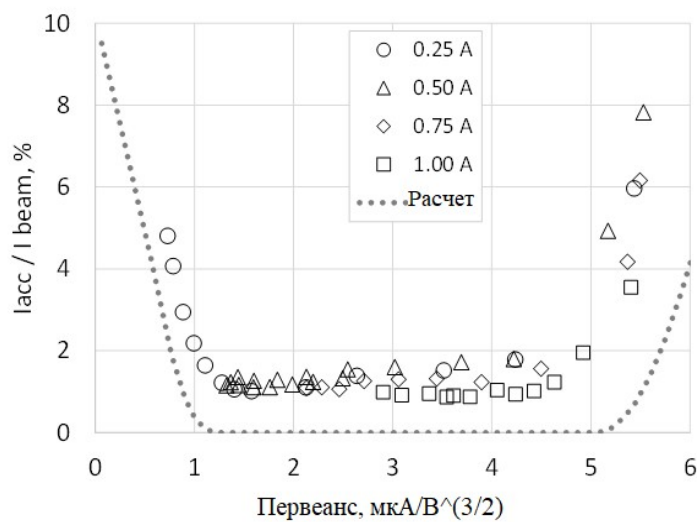
изменении мощности разряда в ГРК и полного ускоряющего напряжения. Во всех экспериментах задавался фиксированный расход рабочего тела, равный 1.5 мг/с. Также фиксировался потенциал ускоряющего электрода на уровне -430 В. Ток ионного пучка задавался путём регулировки мощности разряда в ГРК. При нескольких значениях полного тока пучка были измерены зависимости тока на ускоряющий электрод (I_{acc}) 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 представлены на рисунке 70. Для удобства анализа и сравнения результатов, полученных при различных тока пучка, были построены зависимости отношения тока на ускоряющий электрод к току пучка от первеанса, который определяется выражением $P_n = I_{beam}/U_t^{3/2}$, где I_{beam} – ток пучка, U_t – разность потенциалов между эмиссионным и ускоряющим электродами.

На рисунке 70 также показаны кривые, полученные в результате численного моделирования по программе IOS-3D. Расчёты выполнялись с учётом измеренной нормированной зависимости плотности ионного тока в ГРК от радиуса. Так как для каждого режима работы двигателя значение максимума плотности тока в центре ГРК заранее не было известно, то расчёт проводился методом последовательных приближений. Сначала задавалось некоторое значение максимума плотности тока в центре ИОС и с учётом полученного размерного распределения плотности тока по радиусу выполнялся расчёт токов элементарных пучков отдельных апертур, расположенных на разных расстояниях от оси. Путём суммирования этих значений вычислялось расчётное значение полного тока пучка. Затем варьировалось значение плотности тока в центре ИОС так, чтобы рассчитанный ток пучка совпал с током, измеренным в эксперименте. После этого для найденного размерного распределения плотности тока вычислялся полный ток ионов на ускоряющий электрод как сумма значений этого тока, вычисленных для элементарных ячеек, расположенных на разных расстояниях от оси.



а)



б)

Рисунок 70 - 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

На обоих графиках видно, что отношение тока на ускоряющий электрод к току пучка возрастает при низких значениях первеанса из-за перефокусировки ионов и при больших значениях первеанса из-за недостаточной фокусировки ионов. В отсутствие прямого перехвата вклад в ток на ускоряющий электрод создают медленные вторичные ионы, образующиеся в результате перезарядки ускоренных ионов на нейтральных атомах. Отношение тока этих ионов к току пучка определяется величиной газовой эффективности и уровнем остаточного вакуума в вакуумной камере. Полученные значения составляют около 1%, что является типичной цифрой для условий наземных испытаний ионных двигателей. Минимальные и максимальные значения первеанса у обеих ИОС близки друг к

другу. Минимальное значение у ИОС с круглыми апертурами составляет примерно $1.2 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и $1.3-1.4 \text{ мкА/В}^{3/2}$ у ИОС с квадратными апертурами. Максимальные значения составляют около $4.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

На графиках также видно, что результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментом. 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. Кроме того, на точность вычислений могли повлиять погрешности в аппроксимации экспериментальных значений плотности тока, которые были измерены только в пяти точках. Наконец, к повышенному току первичных ионов на ускоряющий электрод могли приводить отклонения формы отверстий от расчётной, а также погрешности взаимной юстировки эмиссионного и ускоряющего электрода. Полученные данные, подтверждающие близость по абсолютным значениям рабочих диапазонов первеансов эталонной ИОС с круглыми апертурами и ИОС новой конструкции, согласуются с проведенными исследованиями на двигателе ИД-100 [84].

Таким образом, сравнительные экспериментальные исследования ИОС с круглыми апертурами, расположенными в узлах гексагональной решётки, и ИОС нового типа с апертурами в форме квадратов со скруглёнными углами подтвердили сделанный ранее по результатам численного моделирования вывод о том, что эти системы могут обладать сходными функциональными характеристиками. В эксперименте было показано, что диапазоны первеанса, в котором отсутствует прямой перехват ионов на ускоряющий электрод, у этих ИОС очень близки друг к другу. При изготовлении ИОС из углерод-углеродных композитных материалов, обладающих высокой стойкостью к ионному распылению, новая конфигурация апертур может обеспечить более высокую механическую прочность за счёт сохранения неперерезанных углеродных волокон в перемычках между отверстиями. Это открывает перспективу повышения ресурсных и прочностных характеристик ИОС при создании новых ионных двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При достижении поставленных в настоящей диссертации задач были получены следующие результаты:

1. Разработана ИОС нового типа с плоскими электродами из УУКМ с квадратными апертурами со скругленными углами, обеспечивающая повышенную механическую прочность за счёт сохранения неповреждённых нитей в перемычках между отверстиями, при сохранении высоких функциональных характеристик, свойственных традиционным ИОС с круглыми апертурами.

2. Расчётным путём определены оптимальные параметры новой формы апертур, при которых достигается максимальный диапазон рабочих значений первеанса при минимальной прозрачности 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 коэффициентах линейного температурного расширения 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 первогоанса ИОС с квадратными апертурами и их близость к соответствующим диапазонам традиционных ИОС с круглыми апертурами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГРК	газоразрядная камера
ЗЭ	замедляющий электрод
ИД	ионный двигатель
ИОС	ионно-оптическая система
КА	космический аппарат
КЛТР	коэффициент линейного температурного расширения
КПД	коэффициент полезного действия
РТ	рабочее тело
УУКМ	углерод-углеродный композиционный материал
УЭ	ускоряющий электрод
ЭРД	электроракетный двигатель
ЭЭ	эмиссионный электрод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lev D. , et al. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years // 35th International Electric Propulsion Conference Georgia Institute of Technology, IEPC-2017-242, Atlanta, Georgia, U.S.A. – 2017 – pp.1–18.
2. Edwards C. H., et al. The T5 Ion Propulsion Assembly for Drag Compensation on GOCE // ESA SP-569, International GOCE User Workshop “GOCE, The Geoid and Oceanography”, ESA-ESRIN, Frascati, Italy. – 2004.
3. Koroteev A.S., Lovtsov A.S., Muravlev V.A., Selivanov M.Y., and Shagayda A.A. Development of ion thruster IT-500 // Eur.Phys. J.D 71– №5 – 2017 – pp. 311
4. Christensen J. A., Benson G., Bond T., Gallagher J., and Matranga M. The NSTAR Ion Propulsion Subsystem for DS1 // 35th Joint Propulsion Conference, AIAA-99-2972, Los Angeles, CA, U.S.A. – 1999.
5. Brophy J. R., et al. Development and Testing of the Dawn Ion Propulsion System // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2006-4319, Sacramento, California, U.S.A. – 2006.
6. Kuninaka H., et al. Hayabusa Asteroid Explorer Powered by Ion Engines on the way to Earth // 31st International Electric Propulsion Conference, IEPC-2009-267, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, U.S.A. – 2009.
7. Nishiyama K., et al. Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System // Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, IEPC-2015-333/ISTS-2015-b-333, Hyogo-Kobe, Japan. – 2015.
8. Lewis R. A., Luna J. P., Coombs N., Guarducci F. Qualification of the T6 Thruster for BepiColombo // Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, IEPC-2015-132/ISTS-2015-b-132, Japan. – 2015.
9. Garner C.E., Rayman M.D., and Brophy J.R. In-Flight Operation of the Dawn Ion Propulsion System Through Year One of Cruise to Ceres // Presented at Joint

- Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan. – 2015.
10. Brophy J. R., et al. Implementation of the Dawn Ion Propulsion System // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2005-4071, Tucson, Arizona, U.S.A. – 2005.
 11. Brophy J. R., Polk J. E., and Goebel D. M. Development of a 50,000-s, Lithium-fueled, Gridded Ion Thruster // 35th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2017-042, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, U.S.A. – 2017.
 12. Groh K.H., Leiter H.L., Lob H.W., “Design and Performance of the New RF-Ion Thruster RIT-15”, 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-98-3344, Cleveland, OH, U.S.A. – 1998.
 13. Goebel D. M. and Katz I., Fundamental of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters // Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, JPL Space Science and Technology Series, 2008, p.-486
 14. Garner C.E., Brophy J.R. Fabrication and testing of carbon-carbon grids for ion optics // AIAA/SAE/ASME/ASEE, 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-92-3149, Nashville, TN, U.S.A. – 1992.
 15. Mueller J., Brown D.K., Garner C.E., and Brophy J.R. Fabrication of Carbon-Carbon Grids for Ion Optics // 23rd International Electric Propulsion Conference, IEPC-93-112, Seattle, WA, U.S.A. – 1993.
 16. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // под ред. Академика РАН А.С. Коротеева, М.: Машиностроение, 2008, -280 с.
 17. Haag T., Patterson M., Rawlin V., Soulas G. Carbon-based ion optics development at NASA GRC // 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-94, Pasadena, CA, U.S.A. – 2001.
 18. Kitamura S. and Hayakawa Y. Fabrication of carbon-carbon composite ion thruster grids. Improvement of structural strength // 25th International Electric Propulsion Conference, IEPC-97-093, Cleveland, OH, U.S.A. – 1997.

19. Zhang D. et al. On the mechanical behavior of carbon-carbon optic grids determined using a bi-axial optical extensometer // *Journal of Material Science*, 39 (2004) 4495-4505.
20. Wirz R.E., Anderson J.R., Katz I., and Goebel D.M. Time-Dependent Erosion of Ion Optics // *Journal of Propulsion and Power*, Vol.: 27, Issue.1, Pages. 211-217.
21. Martinez R. A. Electric Field Breakdown Properties of Ion Thruster Optics // Thesis, In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado Fall, 2007.
22. Sengupta A., et al. An Overview of the Results from the 30,000 Hr life Test of Deep Space 1 Flight Spare Ion Engine // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3608, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
23. Polk J. E., et al. An Overview of the Results from an 8200 Hour Wear Test of the NSTAR Ion Thruster // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 99-2446, Los Angeles, California, U.S.A. – 1999.
24. Rosenberg D. and Wehner G.K. Sputtering Yield for Low Energy He⁺, Kr⁺, and Xe⁺ Ion Bombardment // *J.Appl. Phys.* 33, 1842 (1962).
25. Weijnsfeld C. H., Hoogendoorn A., and Koedam M. Sputtering of Polycrystalline Metals by Inert Gas Ions of Low Energy (100-1000 eV) // *Physica*, Vol. 27, 1961, p. 763.
26. Williams J. D. Differential Sputtering Behavior of Pyrolytic Graphite and Carbon-Carbon Composite Under Xenon Bombardment // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3788, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
27. Blandino J. J., Goodwin D. G., Garner C. E. Evaluation of Diamond Grids for Ion Thruster Optics: Low Energy Sputter Yield Measurements // 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 96-3203, Lake Buena Vista, FL. – 1996.
28. Tartz M., Neumann H., Leiter H., Esch J. Pyrolytic Graphite and Carbon-Carbon Sputter Behavior Under Xenon Ion Incidence // 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC 2005-143, Princeton University, U.S.A. – 2005.

29. 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.
30. Killinger R, Bassner H, Muller J, Kukies R. RITA ion propulsion for ARTEMIS lifetime test results // 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2000-3273, Las Vegas, NV, U.S.A. – 2000.
31. Leiter H.J., Killinger R., Bassner H., Muller J., Kukies R., Frohlich T. Development and performance of the advanced radio frequency ion thruster RIT-XT // 28th International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France. – 2003.
32. Leiter H.J., Loeb H.W. and Schartner K.H. RIT15S and RIT15LP – The Development of High Performance Mission Optimized Ion Thrusters // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, A99-31233, Los Angeles, California, U.S.A. – 1999.
33. Groh K.H., Leiter H.L., Lob H.W. Design and Performance of the New RF-Ion Thruster RIT-15 // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-98-3344, Cleveland, OH, U.S.A. – 1998.
34. Groh K.H., Loeb H.W., Mueller J., Schmidt W. and Schuetz B. RIT 35 RF-ion truster – Design and performance // 19th AIAA/GGLR/JSASS International Electric Propulsion Conference, AIAA-87-1033, Colorado Springs, Colorado, U.S.A. – 1987.
35. Bassner H., Bond R., Thompson V., and Groh K. The development of the ESA-XX ion thruster //, 25th International Electric Propulsion Conference, IEPC-97-016, Cleveland, OH, U.S.A. – 1997.
36. Crofton M.W. Evaluation of the T5 (UK-10) ion thruster: summary of the principal results // IEPC-95-91. – 1995.
37. Bond R.A., Fearn D. G., Wallace N. C., Mundy D.H. The optimization of the UK-10 ion thruster extraction grid system // 25th International Electric Propulsion Conference, IEPC-97-138, Cleveland, OH, U.S.A. – 1997.

38. Wallace N. C., Fearn D. G., Copleston R.E. The design and performance of the T6 ion thruster // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cleveland, OH, U.S.A. –1998.
39. Snyder J.S., Goebel D.M., Hofer R.R., Polk J.E., Wallace N.C., and Simpson H. Performance evaluation of the T6 ion engine // Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, No. 2, March-April, 2012.
40. Garner G.E. and Brophy J.R. Fabrication and testing of carbon-carbon grids for ion optics // AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 92-3149, Nashville, TN, U.S.A. – 1992.
41. Garner C.E., Brophy J.R., Pless L.C., and Barnett J.W. The effect of nitrogen on xenon ion engine erosion // AIAA/DGLR/JSASS, 21st International Electric Propulsion Conference, AIAA 90-2591, Orlando, FL, U.S.A. – 1990.
42. Meserole J.S. Erosion resistance of carbon-carbon ion optics // Journal of propulsion and power, Vol. 17, No. 1, January-February 2001
43. Meserole J.S. Fabrication and testing of 15-cm carbon-carbon grids with slit apertures // 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE, AIAA-95-2661, Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, CA, U.S.A. – 1995.
44. Makowski K. 8-cm C-C grid analysis // Private communications, December 16, 2002
45. Rawal S.P. et al. Performance evaluation of 8-cm diameter ion optics assemblies fabricated from carbon-carbon composites // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3614, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
46. Patterson M.J. et al. Ion propulsion development activities at the NASA Glenn Research Center // 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-088, Pasadena, CA, U.S.A. – 2001.
47. Haag T. and Soulas G. Performance of 8-cm pyrolytic –graphite ion thruster optics // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2002-4335, Indianapolis, Indiana, U.S.A. – 2002.
48. Pano M.K., Hart S.L., Hanna A.A., and Schneider A.C. Fabrication and Vibration Results of 30-cm Pyrolytic Graphite ion Optics // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint

- Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3615, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
49. Haag T. and Soulas G.C. Performance and Vibration of the 30 cm Pyrolytic Ion Thruster Optics // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2003-4557, Huntsville, Alabama, U.S.A. – 2003.
 50. Mueller J., Brophy J.R., Brown D.K. Design, fabrication and testing of 30-cm dia. dished carbon-carbon ion engine grids // AIAA/ASME/SAE/ASEE, 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Lake Buena Vista, FL, U.S.A. – 1996.
 51. Snyder J.S., Brophy J.R., Goebel D.M. and Beatty J.S. Development and Testing of Carbon-based Ion Optics for Optics for 30-cm Ion Thrusters // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2003-4716, Huntsville, Alabama, U.S.A. – 2003.
 52. Randolph T. and Polk J. An Overview of the Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) Activity // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3450, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
 53. Beatty J., Snyder J.S., Shih W. Manufacturing of 57cm carbon-carbon composite ion optics for the NEXIS ion engine // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2005-4411, Tucson, AZ, U.S.A. – 2005.
 54. Foster J.E. et al. The high power electric propulsion (HiPEP) ion thruster // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3812, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
 55. Haag T. Mechanical design of carbon ion optics // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2005-4408, Tucson, Arizona, U.S.A. – 2005.
 56. Meckel N., Polaha J. and Juhlin N. Structural analysis of pyrolytic graphite optics for the HiPEP ion thruster // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2004-3629, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
 57. Williams G.J. Jr. et al. Analysis of the Pyrolytic Graphite ion optics following the 2000-hour wear test of the HiPEP ion thruster // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2006-5005, Sacramento, California,

- U.S.A. – 2006.
58. Polk J. et al. Large carbon-carbon grids for high power, high specific impulse ion thruster // Space Technology Applications International Forum Albuquerque, NM, USA, <http://hdl.handle.net/2014/6528>.
 59. Patterson M.J. et al. High thrust-to-power annular engine technology // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA 2015-3719, Orlando, FL, U.S.A. – 2015.
 60. Funaki I., Kuninaka H., Toki K., Shimizu Y., Nishiyama K., and Horiuchi Y. Verification Tests of Carbon-Carbon Composite Grids for Microwave Discharge Ion Thruster // J. of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 1, Jan-Feb 2002, pps. 169-175.
 61. Kitamura S. et al. Fabrication and testing of carbon-carbon composite grids for a 14 cm ion thruster // IEPC-95-93
 62. Kuninaka H. et al. Development of microwave discharge ion thruster for asteroid sample return mission // 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 96-2979, Lake Buena Vista, FL, U.S.A. – 1996.
 63. Funaki I. et al. 20mN-class Microwave Discharge Ion Thruster // 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-103, Pasadena, CA, U.S.A. – 2001.
 64. Nishiyama K., et al. Research and Development Status of Microwave Discharge Ion Thruster μ 20 // 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2005-055, Princeton University, U.S.A. – 2005.
 65. Hosoda S. et al. Intermediate report of MU-20 microwave discharge ion thruster development // 31st International Electric Propulsion Conference, IEPC-2009-155, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, U.S.A. – 2009.
 66. Zhang S. et al. Mechanical analysis of C/C composite grids in ion optical system // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition) (2019)
 67. Brophy J.R., Mueller J. and Brown D.K. Carbon-carbon ion engine grids with non-circular apertures // 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-95-2662, San Diego, CA, U.S.A. – 1995.
 68. Farnell C.C., Williams J. D., and Wilbur P. J. Numerical simulation of ion thruster optics // 28th International Electric Propulsion Conference, IEPC-03-073, Toulouse,

- France. – 2003.
69. Williams J. D., Laufer D. M., and Wilbur P. J. Experimental performance limits on high specific impulse ion optics // 28th International Electric Propulsion Conference, IEPC-03-128, Toulouse, France. – 2003.
 70. Edwards C. H. and Blott R. J., // 54th International Astronautical Congress, IAC Paper 03-S.4.09, Bremen, Germany, 2003
 71. Shagayda A. Simulation of charged particles in the ion-optical systems of ion engines (IOS-3D) // Software Package No. 2014610277, 2014.
 72. Shagayda A. // 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 2015–188, Hyogo-Kobe, Japan, 2015.
 73. Shagayda A., Nikitin V., and Tomilin D. // Vacuum 123, 140 (2016).
 74. Shagayda A. The program of calculation of rarefied gas flows and flows of charged particles in electrophysical devices (GASEL) // Software Package No. 2012612872, 2012.
 75. Muravlev V. A. and Shagayda A. A. // 26th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 1999–162, Kitakyushu, Japan, 1999.
 76. Shagayda A. and Madeev S. Performance limits of ion extraction systems with non-circular apertures // Review of Scientific Instruments – 2016. – № 87 – pp. 043301-1 – 043301-7
 77. Lovtsov A. S., Shagayda A. A., Muravlev V. A., and Selivanov M. Y. // 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 2015–291, Hyogo-Kobe, Japan, 2015.
 78. 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 – Том 8 – № 2 – 2016 – С. 140-150.
 79. Волков Д.П., Заричняк Ю.П. Теплофизические свойства углерод-углеродных композиционных материалов // Теплофизика высоких температур, 1995, том 33, №6, с.942 – 947.
 80. Snyder J.S. and Brophy J.R. Performance characterization and vibration testing of 30-

- cm carbon-carbon ion optics // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-3959, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A. – 2004.
81. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др., Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений; Под. общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.:Машиностроение, 1986. – 384 с.
82. Madeev S., Selivanov M., Shagayda A., and Lovtsov A. Experimental study of ion optics with square apertures for high-power ion thrusters // Review of Scientific Instruments – 2019 – № 90 – pp. 043302-1 – 043302-6.
83. Gorshkov O., Ilyin A., and Rizakhanov R. // 6th Propulsion for Space Transportation of the XXI Century Symposium, Versailles, France, 2002, Paper S20_2.
84. 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)