

УДК: 621.455.

Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей

Антипов Е. А.^{1*}, Балашов В. В.^{2}, Вебер А. В.^{2**}, Куфтырев Р. Ю.^{3***}, Моголкин А. И.^{2**},
Нигматзянов В. В.², Панков А. И.^{2**}, Попов Г. А.^{2**}, Ситников С. А.^{2****}, Хартов С. А.^{2****}**

¹*Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения (ЦНИИМС), Ул. Заводская, Московская область, Хотьково, 141371, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993 Россия*

³*Российский химико-технологический университет (РХТУ), 1-ая Миусская, 3, Москва, 125047, Россия*

**e-mail: aviakompozit@mail.ru*

***e-mail: riame@sokol.ru*

****e-mail: ztk@mail.ru*

*****e-mail: k208@mai.ru*

Аннотация

Приводятся результаты отработки технологии изготовления элементов ионных двигателей: куполообразных перфорированных электродов ионных двигателей из углерод-углеродного композиционного материала и керамических разрядных камер. Экспериментально показано, что характеристики высокочастотных ионных двигателей слабо зависят от замены материала газоразрядной камеры.

Ключевые слова: конструкционные материалы ионных двигателей, электроды, композитный материал «углерод-углерод», газоразрядная камера, керамические материалы

Введение

Электроракетные двигатели (ЭРД) стали полноправным элементом космической техники, и применение их все больше расширяется. Это обусловлено тем обстоятельством, что замена

химических ракетных двигателей на ЭРД позволяет на сотни килограмм увеличить массу целевой аппаратуры при фиксированной массе космических аппаратов за счет уменьшения массы двигательной установки и топлива.

В связи с развитием космической техники и расширением круга задач, решаемых с помощью ЭРД, возрастают требования к уровню характеристик самих двигателей. При этом ключевым требованием к ЭРД является повышение удельного импульса тяги (скорости истечения рабочего тела из двигателя) в несколько раз по сравнению с достигнутыми на сегодняшний день в России показателями. В новых двигателях, разработкой которых занимается лаборатория высокочастотных ионных двигателей (ВЧ ИД) МАИ, могут быть реализованы скорости истечения до 80 тысяч метров в секунду, а ресурс – несколько десятков тысяч часов. Это позволит решать многие задачи освоения космического пространства на качественно новом, более высоком уровне.

Особенностью ВЧ ИД является использование высокочастотного электромагнитного поля для ввода энергии в плазму. Данный способ «нагрева» позволяет организовать процессы ионизации без зажигания разряда между электродами в газоразрядной камере. Это способствует существенному упрощению конструктивной схемы двигателя и кардинально решает проблему ресурса катодного блока, являющегося лимитирующим узлом аналогичных по схеме ускорения плазменно-ионных двигателей [1]. Вместе с тем применение высокочастотного разряда накладывает и ограничения не только на конструкцию, но и используемые материалы в двигателе. Все это осложняется масштабными факторами, как по геометрическим размерам, так и по уровню мощности двигателя.

В настоящее время в рамках программы по созданию энергосиловой установки мегаваттного класса начаты работы по проектированию ионных двигателей больших габаритов с мощностью 35 кВт и более. Технология производства конструктивных элементов ионных двигателей у нас в стране была развита в семидесятые годы прошлого века. В настоящее время ключевые технологии оказались частично утерянными, в частности изготовление тонких перфорированных электродов ионно-оптических систем (ИОС) особенного куполообразной формы большого диаметра. Для ВЧ ИД также принципиальным является возможность изготовления керамических газоразрядных камер (ГРК) большого диаметра. В связи с этим, с целью грамотной выработки рекомендаций по проектированию данных двигателей и освоения технологии их производства необходимо проведение специальных исследований. Результаты части из них рассмотрены в настоящей работе.

1. Выбор перспективных материалов и разработка технологии производства деталей ВЧИД

В настоящее время известны основные материалы, из которых за рубежом производятся элементы ИОС и ГРК для ВЧ ИД [2, 3]. В России ионные двигатели данной схемы не производятся, но серийно выпускаются технологические источники ионов, работающие по тем же физическим принципам [4], что и ВЧ ИД и содержащие те же основные конструктивные элементы, такие как ГРК и электроды, а также электроизолирующие кольца между электродами ИОС. Материалом для газоразрядных камер обычно служит кварцевое стекло, для изолирующих элементов используется керамика, а электроды ИОС выполняются из молибденовых и титановых сплавов. Однако, необходимость достижения для конструкции мощных ВЧ ИД высоких энергетических, массогабаритных, прочностных и ресурсных показателей, требуется рассмотреть новые материалы и разработать и реализовать соответствующие технологические решения.

1.1 Газоразрядная камера

Эффективность передачи ВЧ мощности от индуктора внутрь ГРК зависит от толщины и диэлектрических свойств материала стенки. Кроме того, материал стенки должен быть устойчивым к вибрационным и ударным нагрузкам, а также быть газонепроницаемым и не сублимировать.

С точки зрения диэлектрических свойств наилучшим материалом для ГРК является кварцевое стекло, однако, изготовление камер большого диаметра из данного материала представляется неоптимальной с точки зрения прочности и веса камеры.

Альтернативой кварцевому стеклу является керамика из окиси алюминия (корунд). Из корунда изготовлена в частности ГРК прошедшего сертификационные испытания немецкого ВЧ ИД RIT-22 [2].

Для изготовления изделий из корунда была применена технология горячего литья под давлением термопластичного шликера. При этом усадка химически чистого мелкодисперсного оксида алюминия при спекании составляет до 20% и зависит от химического состава и размера зерен шликера. Обычно при изготовлении крупных изделий на стадии удаления связующего происходит растрескивание материала и требуется применение полидисперсного материала, с соответствующей корректировкой размеров оснастки.

При отработке на базе данной технологии изготовления корпуса ГРК ВЧ ИД были преодолены трудности усадки мелкодисперсного оксида алюминия и растрескивания материала трехмерных тонкостенных изделий на стадии удаления связующего.

В процессе отработки технологического процесса был выбран оптимальный размер зерен шликера и подобраны размеры оснастки с учетом усадки. В результате изготовлены корундовые ГРК с толщиной стенки 5 мм диаметром 100 мм и 200 мм (см. рис 1 и 2).



Рисунок 1. ГРК из корунда диаметром 100 мм Рисунок 2. ГРК из корунда диаметром 200 мм

В качестве возможного варианта для изготовления ГРК была также реализовано применение семейства композиционных керамических материалов на основе нитрида кремния. Технология производства изделий из таких материалов разработана на кафедре 901 МАИ [3]. Эта технология объединила формовку изделий методом горячего литья композиционной пасты, содержащей кремниевый порошок, корундовый наполнитель и связующее с последующим окончательном формированием изделий в среде азота путем реакционного спекания нитрида кремния. Матрица из нитрида кремния обеспечивает незначительную усадку при спекании, высокие диэлектрические свойства и химическую инертность материала.



Рисунок 3. ГРК диаметром 100 мм из нитрида кремния и композита из 50% нитрида кремния и 50% окиси алюминия

1.2 Электроды ионно-оптической системы

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) отвечают по своим характеристикам практически всем требованиям, выдвигаемым к электродам ИОС (устойчивая структура благодаря переплетению нитей в каждом слое, высокая плотность, оптимальные теплофизические и физико-механические свойства в широком температурном интервале, низкий коэффициент линейного расширения). Однако углетекстолиты, обладая устойчивой структурой ткани, не обеспечивают требования по шероховатости поверхности. Наиболее тонкая ткань УТ-900-2,5 с количеством 3000 филаментов в нити имеет толщину монослоя $0,22 \div 0,24$ мм [5]. То есть, в зоне переплетения уточной нити с нитью основы образуется впадина глубиной до $0,1 \div 0,12$ мм (рисунок 4).

Иную картину можно наблюдать при рассмотрении УУКМ на основе войлоков или короткорубленных моноволокон (рисунок 5). Величина шероховатости в таких материалах соизмерима с диаметром углеродного моноволокна и может составлять 6-10 мкм.

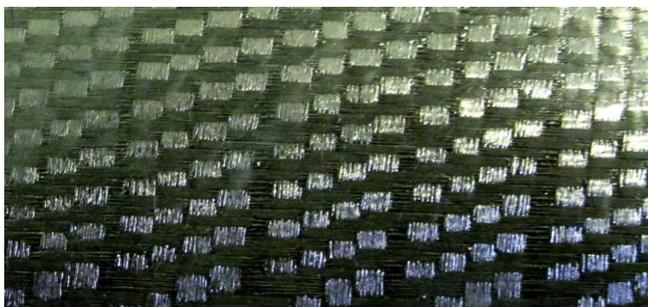


Рисунок 4. Внешний вид углерод-углеродного материала тканного типа армирования



Рисунок 5. Внешний вид углерод-углеродного материала войлочного типа армирования

С учетом обеспечения требований по шероховатости, целесообразно применять технологию изготовления электродов на основе слоистого углетекстолита со смещением направления основы каждого последующего слоя относительно предыдущего на 60° и с ламинирующими поверхностными слоями из углеродного материала войлочного типа с последующим пироуплотнением (газофазным насыщением пироуглеродом).

Сложной технологической задачей при изготовлении перфорированных электродов ИОС является получение системы отверстий заданной формы и расположения. Механическое сверление отверстий неприемлемо, так как возникает разрушение краев отверстий, а также внутри отверстий остаются волоски ткани основы (см. вид по стрелке на рис. 6).

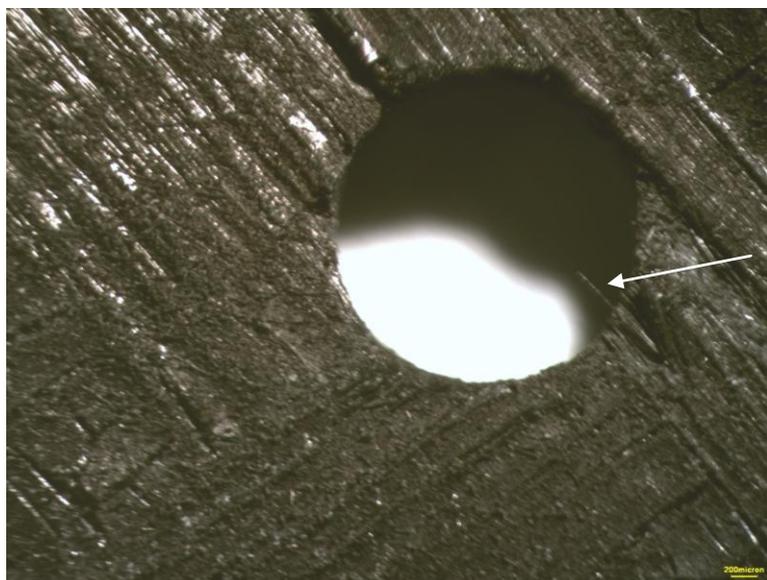


Рисунок 6 Вид отверстия в УУКМ, полученного механическим сверлением

Существенно более качественно получаются отверстия при их формировании лазерным лучем. На рисунке 7 показан фрагмент плоского электрода толщиной 2 мм с диаметром отверстий 1,2 мм и шагом 2,4 мм, полученный по такой технологии.

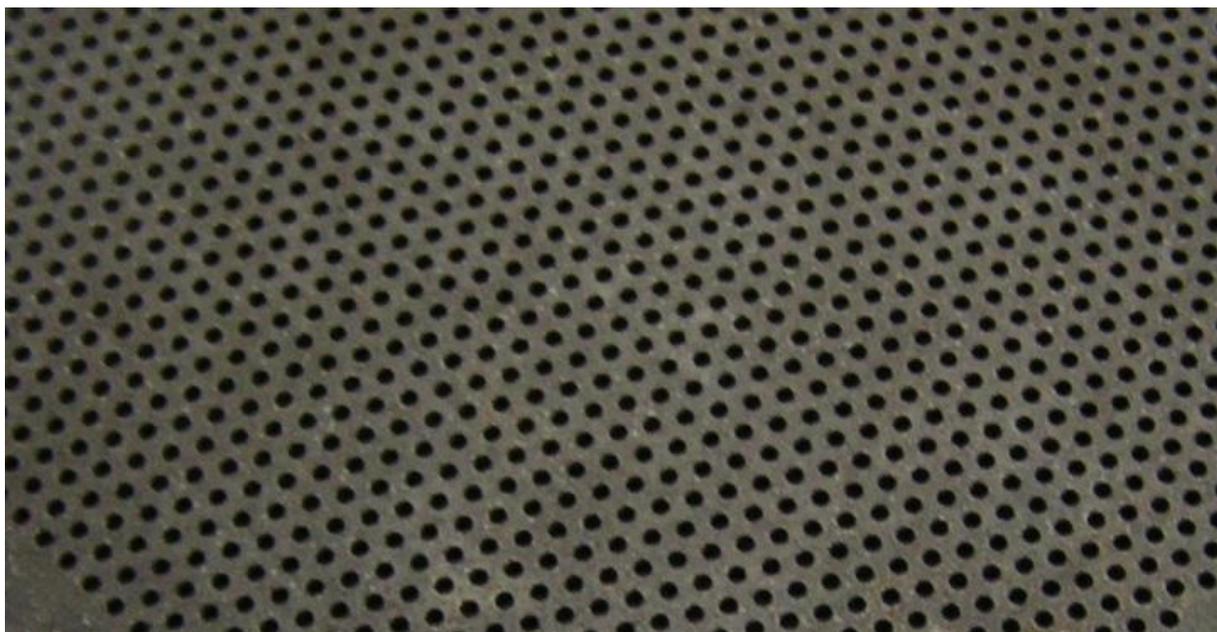


Рисунок 7. Фрагмент плоского электрода из УУКМ (промежуток между отверстиями 1,2 мм)

С учетом результатов отработки технологии получения плоских перфорированных электродов был выбран следующий процесс изготовления куполообразных электродов, который включает в себя следующие основные операции:

- подготовка пакета наполнителя;

- укладка наполнителя в матрицу прессформы послойно с пропиткой наполнителя 50% раствором феноло-формальдегидного связующего;
- прессование углепластиковой заготовки при температуре 160° под давлением $30\div 40\text{кгс/см}^2$ в течении $90\div 120\text{мин}$;
- карбонизация заготовки в среде азота при температуре $850\div 900^{\circ}\text{C}$ в ограничительной оснастке;
- насыщение пиролитическим углеродом в среде газа при температуре 1100°C в течении 350 часов в ограничительной оснастке;
- механическая обработка заготовки по внешнему диаметру;
- вырезка отверстий методом лазерной резки;
- насыщение пиролитическим углеродом в среде природного газа при температуре 1100°C в течении 250 часов.

При изготовлении куполообразного электрода с толщиной стенки 2,0 мм пакет наполнителя набирается из 3-х слоев ткани УТ-900 и двух слоев войлока с поверхностной плотностью $\approx 200\text{г/м}^2$ после высокотемпературной обработки.

При изготовлении куполообразного электрода с толщиной стенки 2,5мм пакет наполнителя набирается из 3-х слоев ткани УТ-900 и двух слоев войлока с поверхностной плотностью $\approx 350\text{ г/м}^2$ после высокотемпературной обработки, или из 6-ти слоев ткани УТ-900 и двух слоев войлока с поверхностной плотностью $\approx 140\text{ г/м}^2$ после высокотемпературной обработки. На рисунке 8 представлен куполообразный электрод, полученный по вышеизложенной технологии

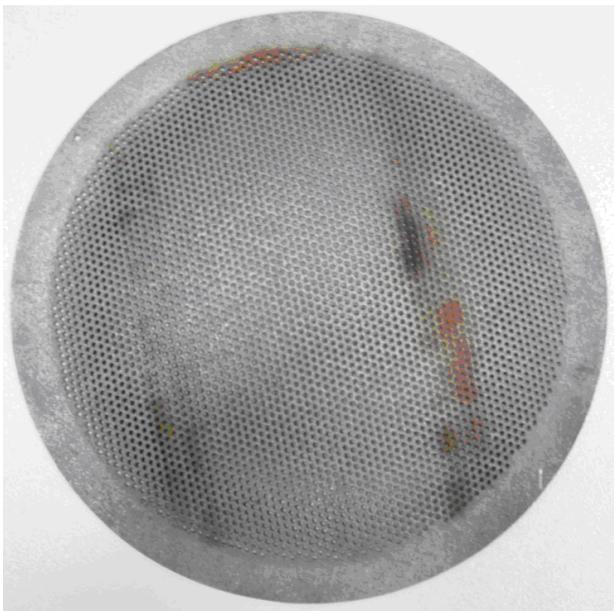


Рисунок 8. Куполообразный электрод из УУКМ диаметром 220 мм

Предложенная выше технология формирования отверстий в электроде дает положительный результат при расстояниях между отверстиями, соизмеримыми с их диаметрами, что характерно для ускоряющего электрода ИОС. Однако, требования для эмиссионного электрода – уменьшения и толщины и промежутка между отверстиями технология лазерного вырезания приводит к разрушению материала (рисунок 9).



Рисунок 9 Результат лазерного вырезания отверстий в УУКМ
(промежуток между отверстиями 0,5 мм)

В связи с этим был разработан технологический процесс изготовления отверстий на стадии операций формования углепластиковой заготовки по аналогии с процедурой, описанной в патенте США 5548953. На металлическую пластину со штифтами расположенными в соответствии с апертурной сеткой электрода наформовывается нижний слой углеродного войлока. В ряды между штифтами укладываются в трех направлениях углеродные волокна подходящей линейной плотности. Затем наформовывается верхний слой углеродного войлока. Полученный пакет (рисунок 10) пропитывается раствором связующего и закрывается пуансоном. Затем осуществляется термообработка углепластиковой заготовки в прессованном состоянии.

Электрод толщиной 1 мм, полученный по этой технологии, представлен на рисунке 11. Поскольку при образовании отверстий в данном случае не происходит механического повреждения нитей основы, такой электрод обладает более высокой прочностью, а отверстия не содержат волосков и заусенцев, которые при работе ВЧИД являются источниками межэлектродного пробоя.

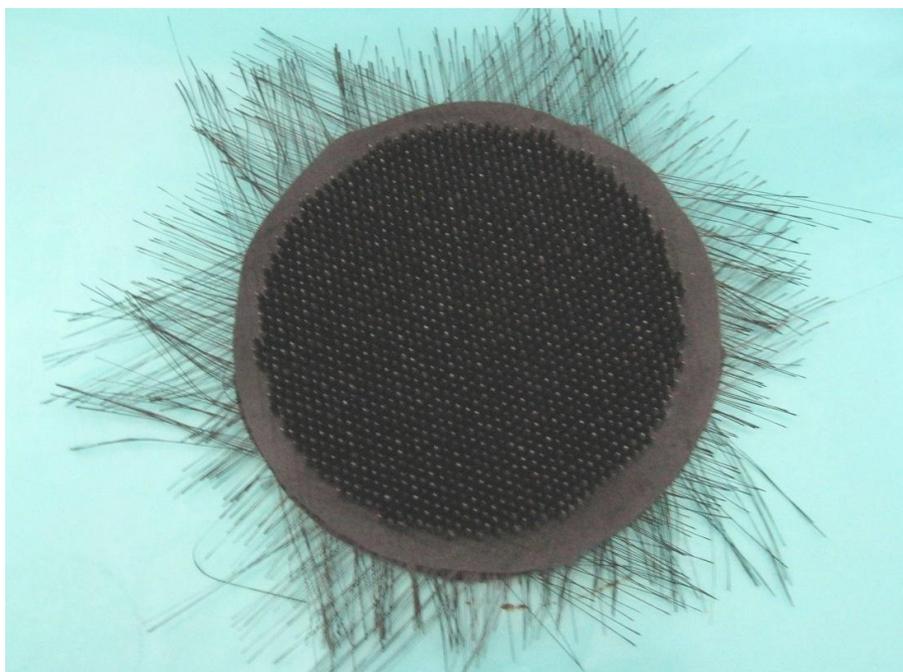


Рисунок 10. Собранный пакет наполнителя перед запрессовкой



Рисунок 11. Плоский 100 мм эмиссионный электрод из УУКМ (промежуток между отверстиями 0,5 мм)

2. Исследование работы ГРК из различных материалов

Для проведения исследований влияния материала стенок газоразрядной камеры на характеристики ВЧИД были отобраны как традиционные материалы ГРК: кварцевое стекло и окись алюминия (корунд марки ВК-100-2), так и новые – на основе нитрида кремния и нового материала для ГРК – керамического композита, содержащего равные доли корунда (оксида алюминия) и нитрида кремния – 50% Si_3N_4 + 50% Al_2O_3 . Исследования проводились в широком диапазоне мощностей (от 30 Вт до 300 Вт), расходов (от 0,2 мг/сек до 0,9 мг/сек), частот (от 1800 КГц до 2100 КГц). Одновременно с испытанием камер проводились испытания согласующих устройств различного типа, по этой причине на ионный ток ионный ток влияло изменение частоты, а также устройство согласующего. Мощность, при работе на согласующем схема которого представлена на рисунке 12, была ограничена 150 Вт.

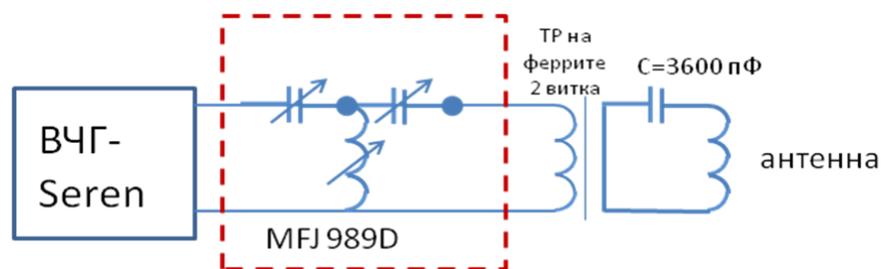


Рисунок 12. Схема согласующего устройства с трансформатором

Камера, изготовленная из SiO_2 , испытывалась только на данном согласующем устройстве и более не использовалась, т.к. не представляла особого интереса и вследствие длительной работы загрязнилась. Результаты, которые были получены, показаны на рисунках 13-15.

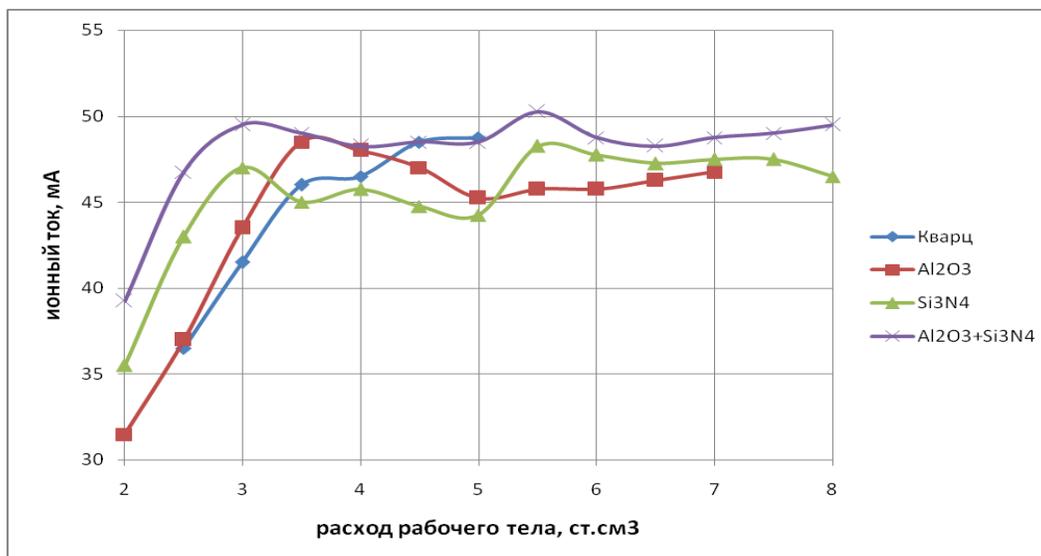


Рисунок 13. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 90 Вт

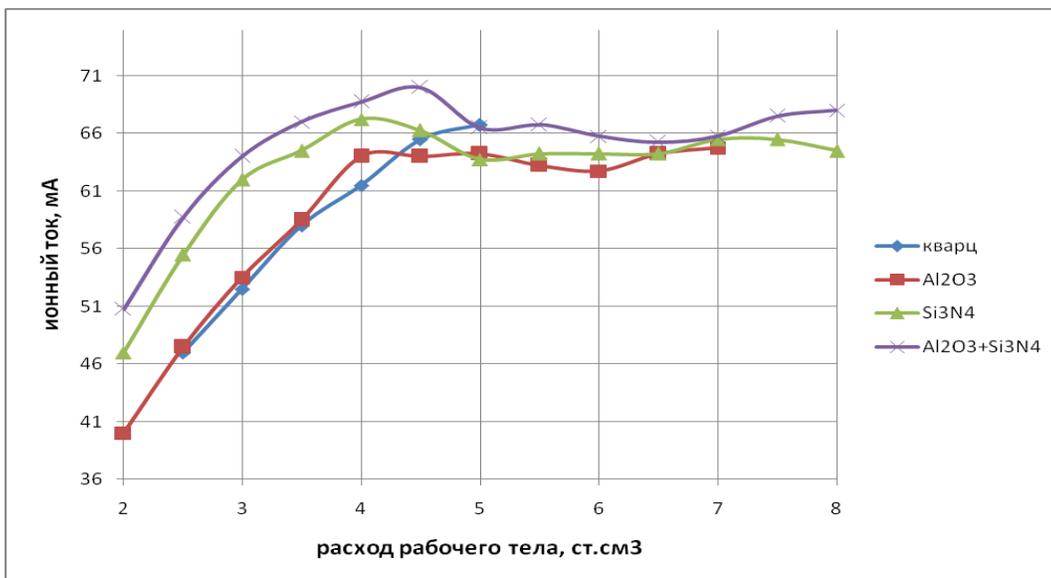


Рисунок 14. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 120 Вт

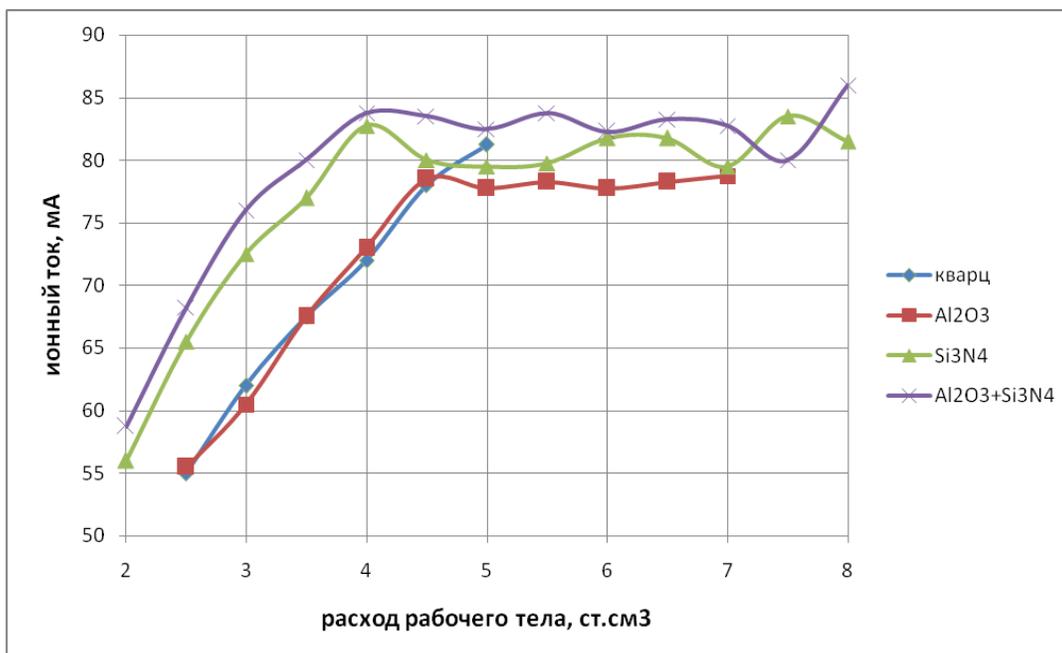


Рисунок 15. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 150 Вт

Из полученных результатов видно, что такие материалы как Si₃N₄ и Al₂O₃ с добавкой Si₃N₄, обеспечивают практически одинаковые характеристики по току. Кварц (SiO₂) и чистый Al₂O₃ дают немного меньший ток пучка на малых расходах рабочего тела, скорее всего это связано с конструктивными особенностями данных ГРК. Камера из кварца была составной, а камера из

Al_2O_3 неплотно прилегала к ионно-оптической системе. Все это допускало незначительные утечки рабочего тела.

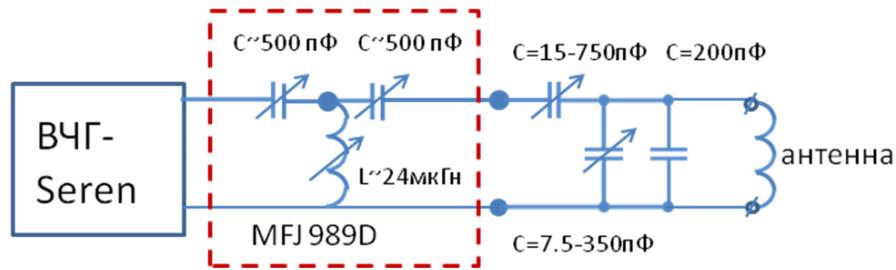


Рисунок 16. Схема согласующего с емкостным делителем

На рисунке 16 представлен другой тип согласующего, данное устройство позволяло работать на больших мощностях (до 300 Вт). Камера из кварца, как было сказано выше, не исследовалась. Экспериментальные результаты представлены на рисунках 17-19. Полученные значения на другом типе согласующего устройства, не меняют кардинально картины полученной ранее. Рост же величины тока обусловлен параметрами согласующего устройства. Также как и ранее, камеры из Si_3N_4 и Al_2O_3 с добавкой Si_3N_4 , имеют характеристики по току пучка выше, чем камера из чистого Al_2O_3 .

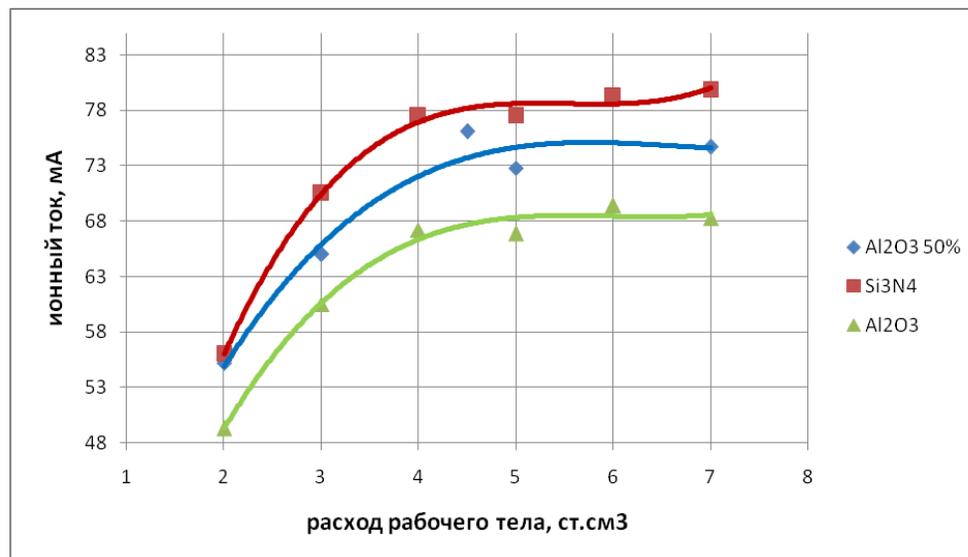


Рисунок 17. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 90 Вт

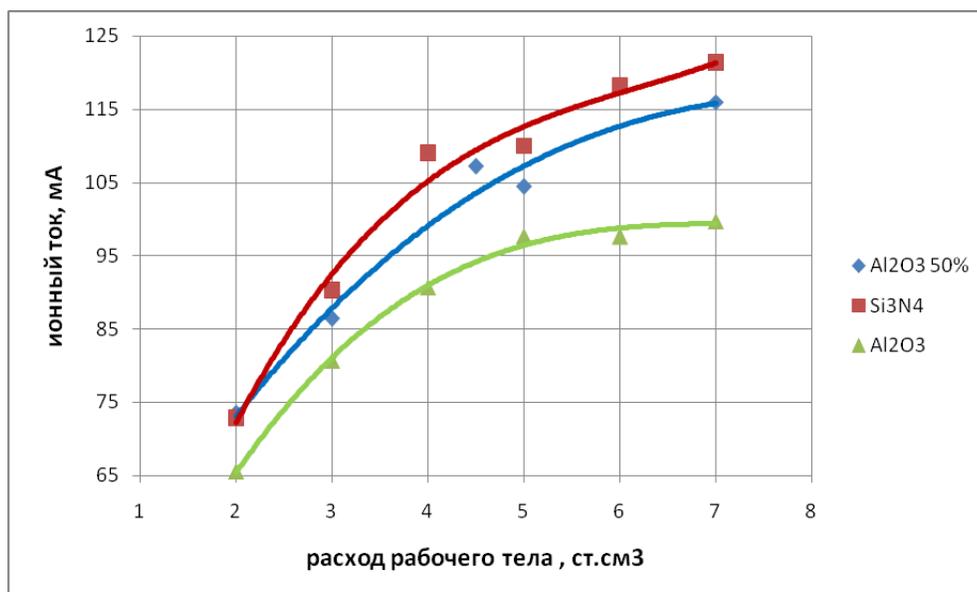


Рисунок 18. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 150 Вт

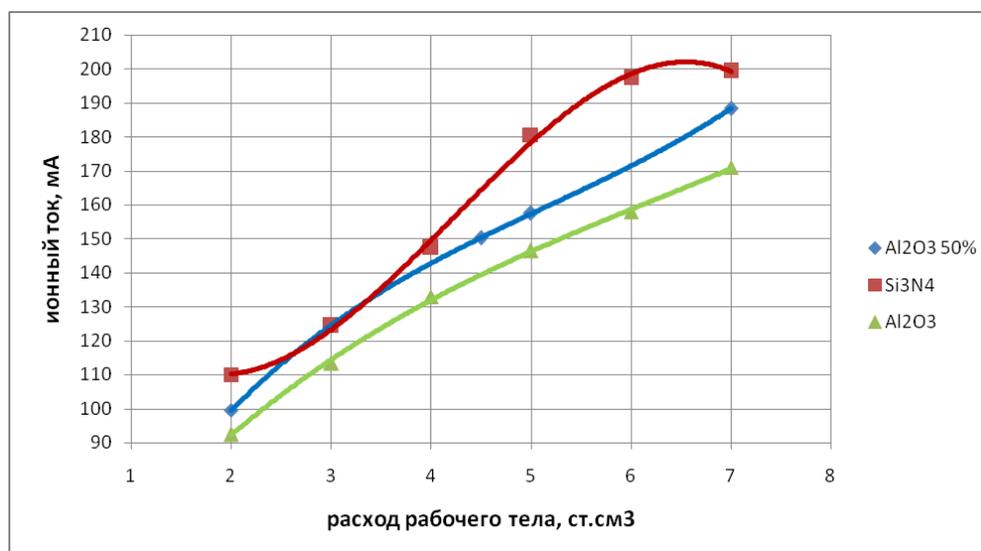


Рисунок 19. Сравнение экспериментальных данных для различных материалов ГРК при мощности 300 Вт

Выводы:

По результатам проведенных работ можно констатировать, что за относительно короткий срок была в нашей стране восстановлена технология производства основных конструктивных элементов высокочастотных ионных двигателей. Оработаны новые решения при производстве электродов из углерод-углеродного композиционного материала с учетом их перфорации. Было показано, что на этапе отработки двигателей можно использовать более дешевые керамики на основе нитрида кремния.

Библиографический список

1. Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / под ред. академика РАН А.С. Коротева. – М.: Машиностроение, 2008.
2. H.W. Loeb. “Principle of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT”. Workshop RIT-22 Demonstrator Test at Astrium at Giessen University”. – Giessen, Germany, 2010.
3. Ситников С.А., Фетисов Г.П., Ломазов Г.В. Разработка технологии получения композиционных керамических материалов на основе нитрида кремния. Вестник Московского авиационного института, 2010, т.17, №2, 87-90.
4. www.platar.ru
5. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод-углеродные волокна, углеродные композиты. – М.: «САЙН-ПРЕСС», 2007.