



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО  
Государственный научный центр Российской Федерации –  
федеральное государственное унитарное предприятие

**"Исследовательский центр  
имени М.В.Келдыша"**

**(ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша")**

ул. Онежская, д. 8, г. Москва, Россия, 125438  
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228  
ОКПО 07547339 ОГРН 1027700482303 ИНН/КПП 7711000836/774301001  
kerc@elnet.msk.ru; kerc@comcor.ru; http://www.kerc.msk.ru

07.09.2015 № 71-06/149

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по науке ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
доктор технических наук

А.М.Губертов

2015 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Семенова Александра Анатольевича на тему:

**«Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»**

#### **Актуальность темы исследований.**

Актуальность диссертационной работы определяется постоянно возрастающими требованиями по ресурсу, которые предъявляются к перспективным стационарным плазменным двигателям (СПД). Проведенные в диссертации исследования носят прикладной характер и напрямую связаны с разработкой новых типов материалов, увеличивающих срок службы двигателя. Ресурс определяется эрозионной стойкостью стенок разрядной камеры и ускорительного канала, выполненных из керамических материалов. Общей тенденцией является использование тугоплавких эрозионностойких керамических композитов на основе нитрида бора, обладающих высокой устойчивостью к температурным нагрузкам. Механические характеристики композиционных керамик определяются различными связующими добавками, влияние которых на итоговый коэффициент распыления композита не всегда известно. Усилия современных исследований направлены на выявление оптимального состава композита для узлов СПД, обладающих низким коэффициентом распыления и устойчивостью к механическим нагрузкам. Отсутствие систематических исследований интегрального коэффициента распыления в зависимости от концентрации связующей добавки не позволяло начать оптимизацию состава керамического композита по указанным выше критериям. Проведенные автором исследования конкретизируют круг материалов для проведения

механических испытаний, но и указывают на необходимость уточнения в вопросах разработки теорий, объясняющих процессы распыления сложных керамических композиционных материалов, поэтому тема представленной диссертации, а также результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, являются актуальными.

#### **Новизна исследований и полученных результатов.**

Научная новизна работы состоит в том, что впервые проведены системные исследования эрозионных свойств композиционных керамических материалов. Получены новые данные о влиянии состава композитов (как эрозионно-стойких составляющих, так и примесей) на интегральный коэффициент распыления. По результатам экспериментов были сделаны выводы о неприменимости аддитивных моделей для описания распыления композиционных керамик. Получены новые количественные данные о распылении многокомпонентных материалов. Выдвинуты гипотезы, объясняющие резкое различие в коэффициентах распыления композитов нитрида бора с нитридом и оксидом кремния. Обнаружено, что рост коэффициента распыления наблюдается не вблизи температуры плавления, а значительно раньше. Впервые обнаружено, что скорость роста коэффициента распыления определенных керамик с увеличением угла падения для различных температур не одинакова. В результате проведенных исследований получены данные, необходимые для проведения дальнейших работ по оптимизации состава керамических композитов при разработке перспективных СПД.

#### **Достоверность основных положений, выносимых на защиту.**

Обоснованность научных положений, достоверность результатов исследований и положений, выносимых на защиту, определяются корректностью применения исследовательской аппаратуры и условиями проведения экспериментов. Результаты экспериментов подтверждаются сопоставлением полученных в работе данных с экспериментальными и расчетными данными, полученными другими исследователями.

#### **Научная и практическая значимость полученных автором результатов.**

Разработанная автором методика определения средних энергий ионного потока на поверхности образца путем обработки энергетических распределений позволяет с высокой точностью проводить оценку коэффициента распыления и зависимости угла падения, соответствующего максимуму распыления, от энергии, несмотря на широкое распределение потока ионов по энергии. Определено влияние концентрации эрозионно-стойких составляющих на коэффициент распыления в керамических композитах, что открывает дорогу дальнейшим исследованиям по изучению механических характеристик композиционных керамик в целях выявления оптимального состава

применительно к СПД. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по использованию керамик и керамических композитов в конструкции деталей ЭРД.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Результаты диссертационной работы А. А. Семенова рекомендуется использовать в научной и производственной деятельности таких предприятий, как ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ФГУП ОКБ «Факел», МАИ, занимающихся исследованиями и разработкой стационарных плазменных двигателей. Часть результатов может быть отражена при чтении специальных курсов в МФТИ, МАИ, МЭИ, МИРЭА, МГТУ им. Н. Э. Баумана и других ВУЗов.

#### **Соответствие специальности.**

Диссертационная работа, посвящённая исследованию распыления керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий, соответствует специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Автореферат работы адекватно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые элементы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В разделе 2.1 автор постулирует, что энергетическая зависимость коэффициента распыления в диапазоне энергий 80-1000 эВ близка к линейной. Однако, по опубликованным справочным данным (Atomic data and nuclear data tables 62, 149-253 (1996), Article No. 0005) по распылению моноатомных мишеней ионами различных элементов (в том числе  $Ar^+$ ,  $Kr^+$ ,  $Xe^+$ ) в ряде случаев наблюдается существенное отклонение от линейности в указанном выше диапазоне. Линейную аппроксимацию при анализе энергетической зависимости коэффициента распыления стоит применять на более коротких энергетических промежутках, например: от 50 до 100 эВ, от 100 до 200эВ, от 200 до 500эВ, от 600 до 1000 эВ.

2. В разделе 2.4 автор указал, что провел расчет плотности ионного тока для обеспечения степени чистоты поверхности  $\theta_{пр} < 0.05$ . Однако, сам расчет в работе не приведен, а также не указаны способ получения и значение коэффициента десорбции, как одного из важнейших параметров в расчетной формуле.

3. В разделе 3 отмечается, что применительно к СПД интересен диапазон энергий от десятков (20-30) эВ до нескольких сотен (500-700) эВ, однако этот диапазон не

охватывается используемым в работе ионным источником (100 – 400 эВ). Стоит отметить, что использование в эксперименте ионного источника Кауфмана позволило бы исследовать диапазон высоких энергий (400 – 700 эВ), проведя весь спектр работ, начиная от обеспечения степени чистоты поверхности  $\theta_{пр} < 0.1$  при плотностях тока  $\sim 5 \text{ mA/cm}^2$  при давлении  $P_0 = 5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  Торр, до определения дозовой зависимости.

4. В работе подчеркиваются особенности распыления пористых материалов, однако, отсутствуют оценки пористости композитных керамик и ее влияние на микрорельеф распыляемой поверхности и коэффициент распыления.

#### **Общие выводы.**

Оценивая диссертацию А.А. Семенова в целом, можно заключить, что она представляет собой научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача исследования перспективных материалов, входящих в состав ответственных узлов стационарного плазменного двигателя и выработаны рекомендации по их применению с учетом полученных экспериментальных данных.

Отмеченные недостатки не влияют существенным образом на общее хорошее впечатление от работы.

По своему содержанию и полученным результатам работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», а её автор, Александр Анатольевич Семенов, **заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук** по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв составлен на основе обсуждения доклада А. А. Семенова по материалам диссертации на научном семинаре отдела электрофизики ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», изучения диссертации и автореферата. Отзыв рассмотрен и единогласно утверждён на заседании научно-технического совета отдела электрофизики 27.08.2015., протокол № 15-7/120.

Отзыв составил

Начальник отделения 3,

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

д.т.н.

Начальник отдела 120,

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

к. ф.-м.н.

Александр Вениаминович Семенкин

Александр Сергеевич Ловцов