

СЕМЕНОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

РАСПЫЛЕНИЕ КЕРАМИК И КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ПОТОКАМИ
ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор Шкарбан Игорь Иванович

Официальные оппоненты:

Бачурин Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Ярославский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ), профессор

Беграмбеков Леон Богданович – доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор

Ведущая организация: ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»

Защита диссертации состоится 05 октября 2015 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), <http://www.mai.ru/events/defence> .

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.08, д.т.н., профессор  Зуев Юрий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Интерес к распылению керамических материалов под действием ускоренных ионов атомного масштаба обусловлен, прежде всего, их широким использованием в различных ионных и плазменных устройствах. Потребность в количественных данных по распылению керамик и их композитов испытывает любое направление техники, связанное с разработкой или эксплуатацией ионно-плазменных ускорителей. В первую очередь это относится к электрореактивным двигателям (ЭРД) и, в частности, стационарным плазменным двигателям (СПД), используемым для стабилизации и коррекции орбит космических аппаратов. Наличие эрозионных характеристик керамик необходимо как с точки зрения прогнозирования ресурса этих двигателей, так и с точки зрения воздействия на элементы конструкции КА. Такие данные публикуются достаточно редко, при этом получены в основном на однокомпонентных керамиках. Актуальность данной работы заключается в том, что в ней исследованы не только однокомпонентные керамики, но и керамические композиты, используемые в лётных образцах ЭРД или рассматриваемые к использованию в перспективных моделях данного вида техники.

Целью работы являлось экспериментальное исследование интегральных характеристик ионного распыления керамик и их композитов, предназначенных для использования в СПД и ионных ускорителях иного назначения. Конкретными решаемыми задачами в рамках исследования являлись следующие:

1. Исследование зависимостей интегральных характеристик распыления керамик и их композитов от параметров ионного потока (энергии и угла падения ионов на поверхность) в диапазоне их изменения, характерном для СПД.
2. Исследование влияния температуры поверхности на интегральные характеристики распыления керамик и их композитов.
3. Исследование влияния химического состава и концентрации компонент керамических композитов на их интегральные характеристики распыления.

На защиту выносятся следующие основные положения, определяющие научную новизну полученных в диссертации результатов:

1. Методика определения коэффициентов распыления керамических материалов, учитывающая влияние заряженных частиц на диэлектрические поверхности, а также особенности поведения многокомпонентных пористых структур в условиях вакуума и высоких температур.
2. Количественные данные по ионному распылению керамик и керамических композитов, а также их зависимости от энергии и угла падения ионов.
3. Результаты исследования влияния концентрации компонент бинарных керамических композитов на величину коэффициента распыления.
4. Результаты исследования влияния температуры поверхности керамических материалов на величину их коэффициентов распыления.

Степень новизны и практическая значимость полученных результатов:

1. Исследована дозовая зависимость коэффициента распыления керамик и их композитов, имеющая место в начальный период ионного облучения. Наличие зависимости свидетельствует о протекании в многокомпонентных материалах переходного процесса, связанного с изменением химического состава, структуры поверхностных слоёв и формированием микрорельефа поверхности.

2. Исследованы зависимости коэффициентов распыления керамик и керамических композитов от энергии и угла падения бомбардирующих ионов. Получены новые количественные данные о распылении многокомпонентных материалов в условиях воздействия на их поверхность ионов низких энергий.
3. Впервые исследована зависимость коэффициента распыления бинарных керамических композитов от концентрации компонентов в широком диапазоне её изменения. Показано отклонение зависимости от аддитивного закона.
4. Исследована зависимость коэффициента распыления керамических материалов от температуры поверхности. Впервые обнаружено, что, в отличие от металлов, рост коэффициента распыления наблюдается не вблизи температуры плавления материала (для металлов $\sim 0,8T_{пл}$), а значительно раньше. Увеличение интенсивности распыления с ростом температуры связано не с испарением, как считалось ранее, а с увеличением собственной энергии атомов материала, что эквивалентно снижению поверхностного потенциального барьера.
5. Впервые исследовано влияние температуры поверхности на угловую зависимость коэффициента распыления. Обнаружено, что с увеличением температуры зависимость становится менее резкой.
6. Создана база данных по ионному распылению конструкционных керамических материалов (либо общего назначения, либо специализированных для использования в СПД) при облучении их поверхностей ионами низких энергий.
7. Полученные результаты в сочетании с теплофизическими и конструктивными характеристиками керамических материалов позволяют оптимизировать выбор материала при разработке перспективных моделей стационарных плазменных двигателей и прогнозировать их ресурс.

Вклад автора в проведенное исследование. Разработана методика определения коэффициентов распыления диэлектрических пористых структур, проведен полный объем экспериментальных исследований с последующей обработкой и обобщением полученных данных.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- на Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Ion-Surface Interactions) – 1997, 2001, 2003, 2005 и 2013 г.г.;
- на Международной конференции по электроракетным двигателям (International Electric Propulsion Conference) – 1999, 2001 и 2007 г.г.;
- на Межвузовском семинаре «Плазма – поверхность» (МАИ, кафедра «Авиационно-космическая теплотехника», рук. Ю.А. Рыжов) – 2008 г.

Представленные результаты опубликованы в 6 статьях в реферируемых журналах, а также материалах международных конференций.

Значительная часть полученных в работе результатов использовалась на аэрокосмических предприятиях при проектировании стационарных плазменных двигателей (ОКБ «Факел», НИИ ПМЭ МАИ, Cauffman & Robinson (США), Jet Propulsion Laboratory (США) и SNECMA (Франция)).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 103 страницы, 42 рисунка и список цитируемой литературы из 128 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, изложена научная и практическая ценность, а также описана структура диссертации. Описана проблема ресурса стационарных плазменных двигателей, обусловленная эрозией стенок ускорительных каналов под действием ионной бомбардировки, показана роль керамик в обеспечении требуемого ресурса и необходимость поиска новых материалов с повышенной устойчивостью к ионно-плазменным воздействиям.

Первая глава диссертации содержит обзор современного состояния исследований в области распыления керамик ускоренными потоками ионов.

На основании публикаций, посвящённых разработке и эксплуатации СПД, определён круг керамических материалов, используемых или предлагаемых для изготовления разрядных камер и ускорительных каналов двигателей. Как правило, используются тугоплавкие керамики с высокой механической прочностью и устойчивостью к длительным температурным нагрузкам. Изначально разрядные камеры изготавливали из электроизоляционных керамик общего назначения (корунд, АБН), однако в последнее время наблюдается переход на материалы, специально создаваемые для СПД – например, БП ($\text{BN}+\text{SiO}_2$) или композит $\text{BN}+\text{Si}_3\text{N}_4$. При этом основное внимание сконцентрировано на использовании нитрида бора – либо практически чистого (американская керамика АХ-05 и отечественная ВН-90), либо с добавками, улучшающими его конструкционные свойства, хотя, при этом, ухудшающими устойчивость к распылению.

В качестве рабочего тела для СПД используется ксенон, обладающий, несмотря на высокую стоимость, рядом положительных качеств: инертностью, что исключает химическую эрозию стенок; высокой эффективностью ионизации. Энергия ионов на выходе ускорительного канала составляет 300-500 эВ, и наблюдается тенденция к её увеличению. Однако данные о характеристиках распыления интересны и при более низких энергиях, т.к. стенки ускорительных каналов подвергаются воздействию ионов различных энергий – от пороговых до значений, соответствующих разрядному напряжению.

Проведён анализ публикаций, посвящённых экспериментальному и теоретическому исследованию ионного распыления, рассмотрены существующие физические модели процесса, определены его количественные характеристики и основные факторы, наиболее сильно влияющие на их величину.

Распыление поверхности под действием ионного облучения является одним из эффектов, сопровождающих взаимодействие ускоренных ионов с твердым телом, и представляет собой процесс выбивания атомов вещества в результате их взаимодействия с бомбардирующими ионами. Количественной характеристикой процесса является коэффициент распыления Y , определяемый как количество распыленных атомов, приходящихся на один падающий ион ($Y=n_d/n_i$, атом/ион). В прикладных задачах часто используют массовый ($S_m=dm/dQ$, мг/Кл) и объёмный ($S_v=dV/dQ$, мм³/Кл) коэффициенты распыления – количество распыленного вещества (массы или объёма), отнесённого к дозе облучения. Все определения связаны между собой соотношениями:

$$Y = 10^{-3} \cdot \frac{\bar{e} \cdot N_A}{M} \cdot Y_m; \quad Y_v = \frac{Y_m}{\rho},$$

где $\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ 1/моль; M – атомная масса материала (г/моль); ρ – плотность распыляемого вещества.

На величину коэффициента распыления влияют как свойства облучаемого материала (масса и энергия связи атомов, плотность, пористость и т.д.), так и характеристики бомбардирующих ионов (масса, заряд, энергия, угол падения и др.). При экспериментальном определении значение коэффициента распыления зависит также от условий проведения эксперимента (уровень и чистота вакуума, плотность ионного тока). Известно более 20 параметров и условий проведения процесса, в той или иной степени влияющих на значение Y . Критерием степени важности этих параметров считают отношение максимального и минимального значений коэффициента при изменении данного параметра во всём используемом диапазоне. К наиболее сильно изменяющим коэффициент распыления параметрам относятся заряд и масса иона, а также его энергия – при изменении энергии иона от 5-10 эВ до 10^7 эВ значение Y изменяется от 10^{-5} до 10^2 - 10^3 ат/ион.

Для описания процесса ионного распыления было предложено несколько моделей, предполагающих два основных механизма. Согласно первому, распыление обусловлено локальным разогревом материала в зоне падения иона, т.е. происходит испарение материала. Согласно второму, распыление происходит за счет передачи энергии и импульса иона атомам материала в каскадах упругих столкновений. Экспериментальные данные по распылению свидетельствуют о справедливости каскадно-импульсного механизма.

Среди существующих моделей наиболее полно объясняет закономерности распыления теория П.Зигмунда, хорошо описывающая распыление аморфных и поликристаллических материалов в диапазоне энергий от пороговых до $\sim 10^5$ эВ. В основе теории лежит представление о распылении как о процессе, который определяется рассеиванием иона в материале на большие углы. Рассеиваний может быть больше, чем одно, и возникает изотропный по всем направлениям каскад столкновений, в результате которого часть атомов получает импульс, направленный в сторону поверхности – если энергия таких атомов превышает потенциальный барьер, они покидают поверхность, и происходит распыление.

Коэффициент распыления, согласно теории Зигмунда, определяется решением уравнения Больцмана для движения смещенных атомов в приближении экранированного кулоновского потенциала взаимодействия и плоского потенциального барьера на поверхности. Теория учитывает изменение вида потенциала взаимодействия иона с атомами материала в различных энергетических диапазонах. В упрощенном виде коэффициент распыления записывается как

$$Y = 0,042 \alpha S_n / U_0$$

где $\alpha(M_2/M_1, \theta)$ – безразмерная функция, монотонно увеличивающаяся с увеличением отношения масс M_2/M_1 вследствие увеличения числа столкновений с рассеиванием на большие углы, $S_n(E)$ – ядерная тормозная способность, U_0 – энергия, определяющая высоту потенциального барьера на поверхности (поверхностная энергия связи). Коэффициент распыления зависит от энергии иона через ядерную тормозную способность – как и ядерная тормозная способность, с увеличением

энергии растёт, достигает максимума, положение которого зависит от атомных номеров иона и атома, и при дальнейшем увеличении энергии уменьшается.

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов, согласно теории Зигмунда, может быть охарактеризована соотношением:

$$Y(E, \theta) = Y(E, 0)(\sin \theta)^{-f}$$

где f – параметр, зависящий от соотношения масс иона и атома. В диапазоне энергий ионов 10^2 - 10^5 эВ при отношении $M_2/M_1 < 3$ параметр $f=1,7$. Для больших отношений масс этот параметр уменьшается и достигает единицы при $M_2/M_1=7$. Экспериментальные данные свидетельствуют, что соотношение справедливо в диапазоне углов падения ионов от нормали к поверхности до некоторого $\theta_{кр}$, после которого коэффициенты распыления снижаются и падают до нуля при угле падения 90° . Значение $\theta_{кр}$ определяется энергией и массой бомбардирующих ионов.

В дальнейшем Зигмунд предложил ещё несколько формул для коэффициента распыления при различных типах соударений атомов и энергиях ионов. Другие исследователи (И. Ямамура, Д. Богдански и др.) вводили поправки для лучшего соответствия экспериментальным данным. Однако теория Зигмунда не объясняет все закономерности ионного распыления. Так, согласно ей, пространственное распределение распыленных частиц носит изотропный характер и не зависит от угла падения ионов на поверхность, что противоречит экспериментальным данным.

Количественных данных по распылению различных материалов публикуется много. Исследованы практически все элементы, представляющие интерес в тех или иных областях техники, а также ряд многоэлементных материалов (химических соединений, сплавов). Однако распылению керамик и особенно керамических композитов посвящено достаточно малое количество публикаций, не позволяющее получить представление о распылении материалов данного класса. Исследования распыления керамик проводятся в МАИ, на Физфаке МГУ и в ряде зарубежных научных центров. Исследуются интегральные и дифференциальные характеристики распыления, при этом используются как экспериментальные методы (весовой, профилометрический, радиочастотный), так и методы компьютерного моделирования (в основном метод молекулярной динамики). В целом исследуются различные типы керамик, однако основное внимание уделяется распылению нитрида бора и композитам типа «боросил» ($\text{BN}+\text{SiO}_2$). Анализ современных данных по ионному распылению керамических материалов позволяет сказать следующее:

- Данные по распылению керамических материалов публикуются, однако относятся, как правило, к однокомпонентным керамикам. Крайне мало сведений о распылении керамических композитов. Особенно это касается расчётно-теоретических исследований, где введение дополнительных компонентов усложняет и без того громоздкие расчётные модели.
- Представленные различными авторами данные заметно (иногда в несколько раз) отличаются друг от друга, что затрудняет их практическое использование.
- Количественных данных по распылению керамических материалов недостаточно ни для научного понимания вопроса и построения его физических моделей, ни для применения в инженерных расчётах. Влияние энергии и угла падения ионов на характеристики распыления из опубликованных работ прослеживается, однако

зависимость их от ряда других факторов (например, химический состав материала или температура поверхности) практически не установлено.

Вторая глава содержит описание методики проведения экспериментов по ионному распылению керамических материалов, а также разработанной для этой цели установки и её основных элементов.

Эксперименты проводились на высоковакуумном экспериментальном стенде МАИ на кафедре «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника» при остаточном давлении $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. В процессе экспериментов давление повышалось до значений $(6-9) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. за счет натекания рабочего тела. Для ограничения миграции паров масла в рабочую зону, связанной с работой диффузионного насоса, в вакуумную систему включена криоловушка, охлаждаемая жидким азотом до температуры $T=150$ К, что позволило снизить давление паров масла в камере примерно на 1,5 порядка.

Коэффициент распыления определялся весовым методом, а именно $Y_m = \Delta m / (I_i \cdot \tau)$ [мг/Кл], где Δm – потеря массы мишени за время облучения τ , I_i – средний за время τ ионный ток на мишень. Потеря массы измерялась с помощью аналитических весов с точностью 0,1 мг. Ионный ток измерялся зондом, имеющим те же геометрические характеристики, что и исследуемая мишень, и периодически вводимым в поток.

Схема эксперимента представлена на рисунке 1. Поток ионов, ускоренный до энергии E_0 источником 1, проходил через диафрагму 2, вырезающую центральную, наиболее плотную часть потока, и поступал на исследуемую мишень 3, установленную на опорно-поворотном устройстве 4. На этом же устройстве размещен зонд 5, предназначенный для измерения ионного тока. Устройство позволяет размещать и устанавливать в потоке до шести объектов (мишеней и зондов) при различных углах относительно продольной оси потока.

В качестве источника ионов применялся ускоритель с замкнутым дрейфом электронов (УЗД) с диаметром канала 35мм, позволяющий получать устойчивые потоки ионов в диапазоне энергий от 100 до 400 эВ при плотностях ионного тока на поверхности мишени до 30 мА/см^2 .

Методика определения коэффициента распыления разработана с учетом следующих немаловажных особенностей, характерных как для исследуемых материалов, так и для используемого экспериментального оборудования:

1. Керамические материалы в большинстве случаев являются диэлектриками и при облучении ионами заряжаются, что приводит к торможению ионного потока. Для нейтрализации этого процесса на выходе источника установлен катод-компенсатор, инжектирующий в поток электроны. Зондовые измерения показали, что нескомпенсированность потока в данном случае не превышает 2-3 В, что не окажет заметного влияния на результаты экспериментов. При этом, согласно

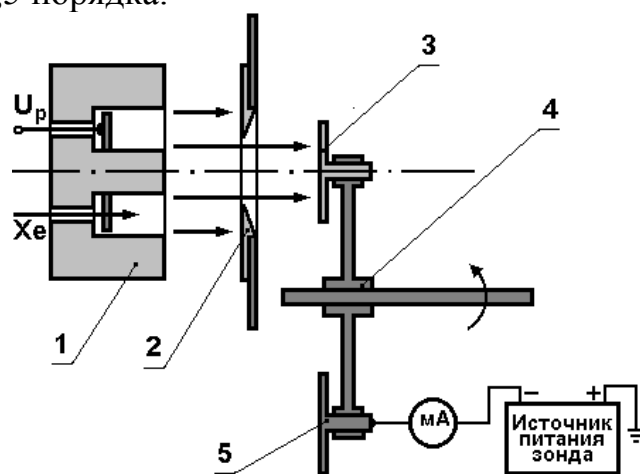


Рисунок 1 – Схема эксперимента: 1 – источник ионов; 2 – диафрагма; 3 – мишень; 4 – опорно-поворотное устройство; 5 – ионный зонд.

проведённым в МГУ исследованиям, воздействие электронов низких энергий не приводит к распылению.

- Генерируемый источником поток ионов имеет заметное угловое расхождение. При этом угол падения ионов на поверхность влияет на величину коэффициента распыления. В связи с этим ионный поток подавался на мишени через коллимирующую диафрагму. Как показали расчёты, расходимость потока в этом случае не превышала 5° , что, согласно анализу угловых зависимостей коэффициента распыления, не приведёт к заметным погрешностям при определении среднего угла падения ионов и значений Y .
- Ионы, покидающие ускорительный канал, распределены по энергиям, при этом помимо однозарядных ионов присутствуют двух- и трехзарядные. Для определения средней энергии ионов исследован зарядовый и энергетический состав потока. Компьютерная обработка полученных при различных разрядных напряжениях спектров позволила рассчитать средние энергии ионов (таблица 1).

Таблица 1. Средняя энергия ионов при различных разрядных напряжениях

Рабочий газ	Средняя энергия ионов \bar{E} , эВ, при разрядном напряжении U_p			
	$U_p = 160$ В	$U_p = 200$ В	$U_p = 300$ В	$U_d = 350$ В
Ar	123,4 (0,77 $\bar{e}U_p$)	143,3 (0,72 $\bar{e}U_p$)	211,7 (0,71 $\bar{e}U_p$)	281,4 (0,70 $\bar{e}U_p$)
Kr	146,8 (0,92 $\bar{e}U_p$)	194,0 (0,97 $\bar{e}U_p$)	280,9 (0,94 $\bar{e}U_p$)	385,2 (0,96 $\bar{e}U_p$)
Xe	146,6 (0,92 $\bar{e}U_p$)	196,7 (0,98 $\bar{e}U_p$)	296,3 (0,99 $\bar{e}U_p$)	397,3 (0,99 $\bar{e}U_p$)

- Важным фактором, определяющим достоверность экспериментальных данных, является динамическая чистота поверхности. В процессе эксперимента на поверхность мишени из остаточной атмосферы камеры поступает поток частиц

плотностью $n_{ад} = \sum \frac{p_i \cdot N_A}{\sqrt{2\pi \cdot M_i \cdot R \cdot T}}$, $1/\text{м}^2\text{с}$, где p_i – парциальное давление i -й

составляющей атмосферы (Па), R – универсальная газовая постоянная, N_A – число Авогадро, T – температура окружающей среды. Адсорбированные частицы десорбируются, а также распыляются ионным потоком, в результате чего на поверхности устанавливается их равновесная концентрация:

$$N_{рав} = n_{ад} / \left(K_{дес} + \frac{j_i Y}{\bar{e} N_{мон}} \right),$$

где $K_{дес}$ и Y – коэффициенты десорбции и распыления частиц, j_i – плотность ионного тока, \bar{e} – элементарный заряд, $N_{мон} = (N_A \cdot \rho / M_{cp})^{2/3}$ – плотность моноатомного слоя (ρ – плотность адсорбированных частиц, M_{cp} – средняя атомная масса атмосферных составляющих). Значение $N_{рав}$ определяет степень покрытия поверхности адсорбированными частицами $\theta = N_{рав} / N_{мон}$. Распыляясь вместе с атомами мишени, адсорбированные частицы влияют на результат эксперимента – измеренные значения Y оказываются ниже реальных. При высокой концентрации таких частиц, они полностью экранируют поверхность мишени от ионного пучка, в результате чего она не распыляется. Очевидно, что о корректности экспериментальных данных можно говорить в том случае, когда динамика поверхностных процессов обеспечивает чистую от адсорбируемых загрязнений поверхность. Условие динамической чистоты поверхности можно записать как $N_{рав} < N_{мон} \times \theta_{пр}$, где $\theta_{пр}$ – предельная степень покрытия, превышение

которой ведет к искажениям результатов. Выполнение этого условия определяется плотностью ионного тока. Согласно расчетам, при остаточном давлении $\sim 10^{-5}$ мм.рт.ст. для обеспечения степени чистоты поверхности на уровне $\theta_{np}=0.05$ плотность ионного тока должна быть не менее $8-12 \text{ мА/см}^2$. Подтверждением данных расчетов служит рисунок 2, где приведена экспериментальная зависимость коэффициента распыления от плотности ионного тока при давлении остаточной атмосферы $\sim 10^{-5}$ мм.рт.ст. и энергии ионов 300 эВ. С учетом данного графика плотность ионного тока в экспериментах поддерживалась на уровне $14-15 \text{ мА/см}^2$, что позволило иметь динамически чистую поверхность мишеней.

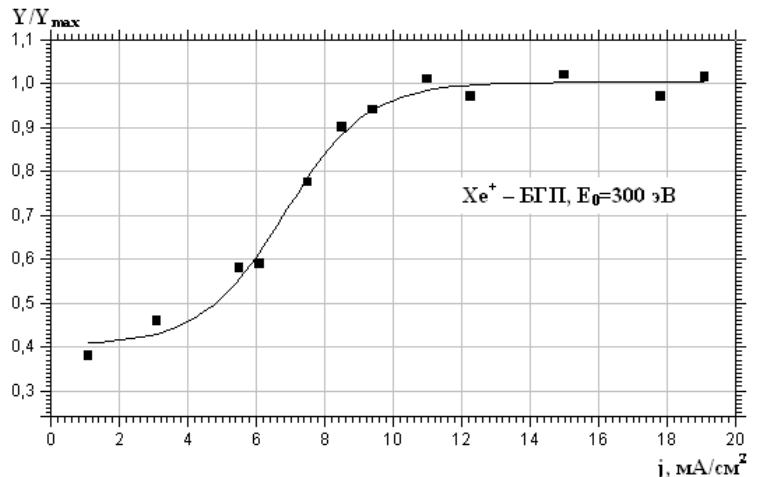


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента распыления керамики БГП от плотности ионного тока

5. Известно, что на величину Y влияет доза облучения поверхности (Φ , Кл/см²). Считается, что для получения стабильных результатов доза облучения должна превышать 10^{16} см^{-2} . Это справедливо, в основном, для металлов, однако для многоэлементных материалов, а также пористых структур (что характерно для керамик) значения доз облучения, при которых наблюдаются стабильные данные, могут быть выше. В процессе исследования установлено, что для керамик дозовая зависимость коэффициента распыления проявляется в более широкой области доз облучения – до $10^{20}-10^{21} \text{ см}^{-2}$. На рисунке 3 представлены зависимости Y некоторых керамик от дозы облучения, набранной образцами в течение нескольких экспериментов. Видно, что с увеличением дозы облучения значения Y снижаются и стабилизируются возле некоторого значения. Наличие зависимости $Y(\Phi)$, проявляющейся, в отличие от металлов, при дозах, характерных для некоторых плазменных устройств, ставит неоднозначность в вопросе о величине Y , и её исследование может оказаться полезным для применения данных о распылении в конструкторских разработках. Однако ионные дозы, характерные для СПД, находятся в гораздо (на 2 порядка) более высокой области, и, по-видимому, дозовая зависимость не играет особой роли при оценке ресурса двигателей. Поэтому в

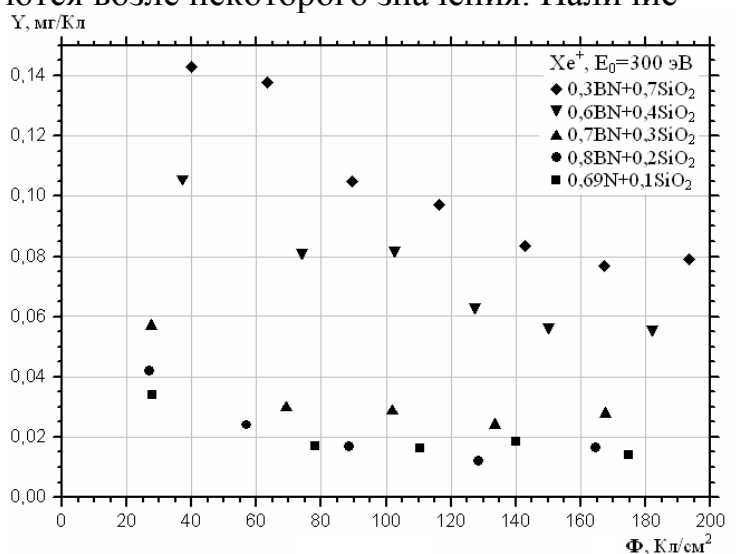


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента распыления керамик от дозы облучения.

данной работе исследованию зависимостей $Y(\Phi)$ придавалось в основном методическое значение: при исследовании энергетических, угловых и иных зависимостей коэффициента распыления необходимо предварительно определить дозовую зависимость значений Y вплоть до выхода её на стационарный режим. При этом за величину Y (в заданных параметрах E_0 и φ) следует принимать значение, возле которого зависимость $Y(\Phi)$ стабилизируется.

Приведённые выше особенности были учтены при экспериментальном определении коэффициента распыления всех керамических материалов, исследованных в данной работе. Отработка экспериментальной методики проводилась на ряде металлов, характеристики распыления которых в своё время были изучены другими исследователями (Плешивцев, Weisenfeld, Wehner, Stewart и др.), при этом совпадение данных было как качественным, так и количественным.

Третья глава посвящена описанию экспериментального исследования зависимости интегральных характеристик распыления керамик и керамических композитов от энергии и угла падения бомбардирующих ионов.

На первом этапе исследований изучены характеристики распыления простых однокомпонентных керамик – когда-либо использовавшихся в СПД или входящих в состав композитов, предназначенных для такого использования. Исследованы диоксид кремния (SiO_2 , средняя атомная масса $\bar{M} = 20$ г/моль), нитрид кремния (Si_3N_4 , $\bar{M} = 20$ г/моль), нитрид бора (BN , $\bar{M} = 12,5$ г/моль) и оксид алюминия (Al_2O_3 , $\bar{M} = 20,4$ г/моль). На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента распыления от энергии ионов (данные при энергии 300 эВ соответствуют уровням стабилизации кривых $Y(\Phi)$).

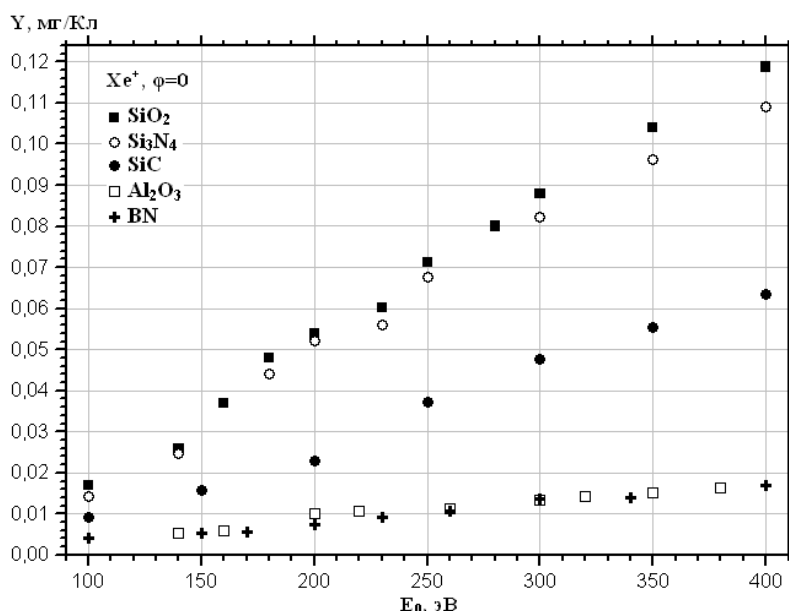


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента распыления однокомпонентных керамик от энергии ионов.

Видно, что коэффициенты распыления керамик с увеличением энергии растут, при этом зависимости $Y(E_0)$ для данного диапазона энергий близки к линейным, что соответствует большинству экспериментальных и расчётных данных для одноэлементных материалов. Следует отметить, что материалы по своим значениям Y сильно различаются. Наибольшими значениями обладает диоксид кремния. Несколько ниже (примерно на 7-9%) значения Y для нитрида кремния.

Наименьшими коэффициентами обладают оксид алюминия и нитрид бора – их значения по сравнению с SiO_2 и Si_3N_4 в среднем в 5-8 раз ниже.

Влияние кристаллической структуры материала на величину Y , исследованное на примере нитрида бора (ромбическая и гексагональная структуры) незначительно. Несколько более высокие значения демонстрирует ромбический BN, однако это превышение малозаметно. К тому же не исключено, что при таких дозах ионного облучения происходит перестройка поверхностных слоев материала (по крайней мере, на глубину развития каскада столкновений, приводящего к распылению) и говорить об исходной упорядоченности атомов не имеет смысла. Поэтому при дальнейшем исследовании характеристик распыления нитрида бора различие структур материала не учитывалось – исследовались, как правило, образцы обеих структур, однако значения коэффициентов распыления усреднялись.

Как следует из рисунка 4, для повышения ресурса ускорительных каналов СПД целесообразно применять нитрид бора или оксид алюминия. Однако по ряду конструктивных и физических свойств эти материалы не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям. В связи с этим для задач СПД был предложен ряд керамических композитов, в основу которых входила какая-либо из трудно распыляемых керамик – нитрид бора или оксид алюминия. С точки зрения величины коэффициента распыления наиболее интересными из таких композитов, оказались сиалон ($\text{Si}_{4,5}\text{Al}_{1,5}\text{O}_{1,5}\text{N}$), АБН ($\text{AlN}+\text{BN}$), СБН (сиалон+BN) и БГП ($\text{BN}+\text{SiO}_2$). Зависимости коэффициентов распыления этих композитов от энергии ионов представлены на рисунке 5. Видно, что, как и для однокомпонентных керамик,

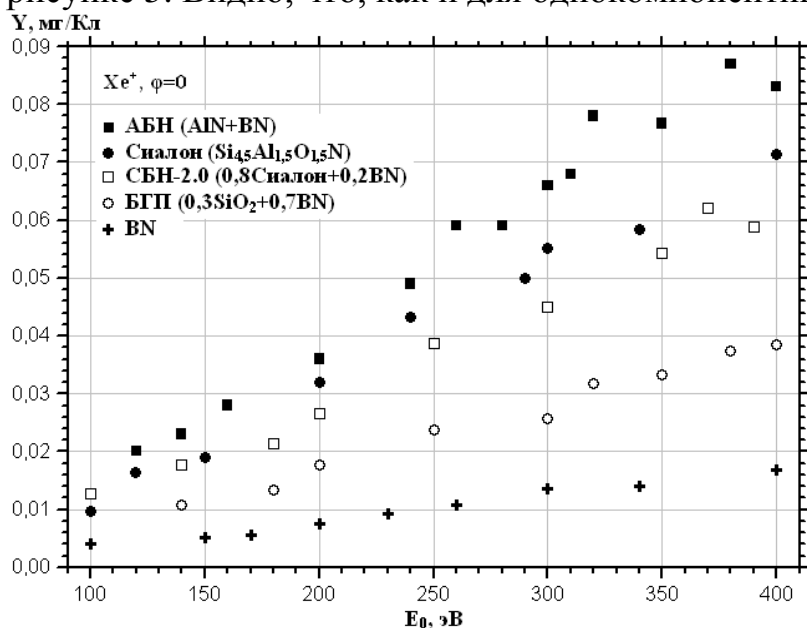


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента распыления керамических композитов от энергии ионов

зависимость $Y(E_0)$ для композитов в данном диапазоне энергий возрастают и близки к линейным. Однако в количественном смысле картина несколько отличается – значения коэффициентов распыления исследованных композитов ниже, чем у легко распыляемых оксида и нитрида кремния, но выше, чем у трудно распыляемых нитрида бора и оксида алюминия. При этом наилучшими характеристиками распыления обладает материал БГП, состоящий (по данным изготовителя) из 70% нитрида бора и 30% диоксида кремния.

Угловые зависимости коэффициентов распыления определялись при углах падения ионов от 0 до 70° (от нормали к поверхности). Для углов свыше 70° расходимость ионного потока затрудняет достоверное определение среднего угла падения, что вносит заметные погрешности в измерение коэффициента распыления. На рисунке 6 приведены значения коэффициентов распыления керамических материалов в зависимости от угла падения ионов при энергии ионов 300 эВ, нормированные значениями Y при облучении по нормали. Характер зависимостей $Y(\varphi)$ для исследованных материалов совпадает с общепринятыми представлениями о влиянии угла падения ионов на распыление и экспериментальными данными, полученными для других материалов. При увеличении угла падения ионов значения Y возрастают, достигают максимума и затем снижаются, стремясь, по-видимому, к 0 при углах падения, близких к 90° . При этом до углов, близких к максимуму распыления, зависимость $Y(\varphi)$ описывается выражением $Y(\varphi) \sim Y_0 \cdot \cos^{-n} \varphi$, где Y_0 – значение коэффициента распыления при облучении поверхности по нормали ($\varphi = 0$), а n – параметр, зависящий от энергии ионов и свойств облучаемого материала.

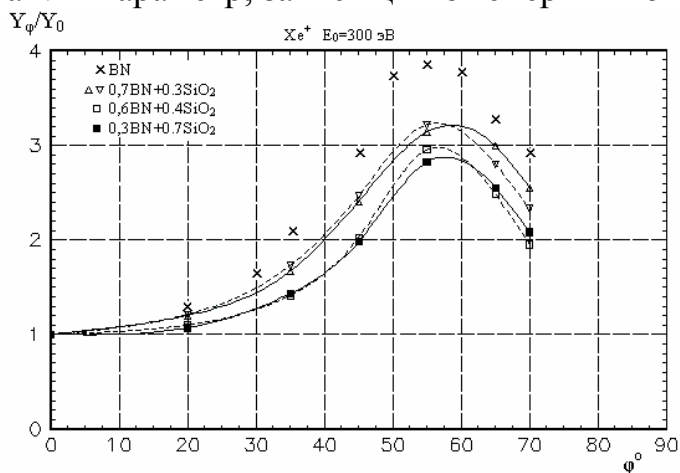


Рисунок 6 – Зависимость относительных значений коэффициента распыления керамических материалов от угла падения ионов на поверхность.

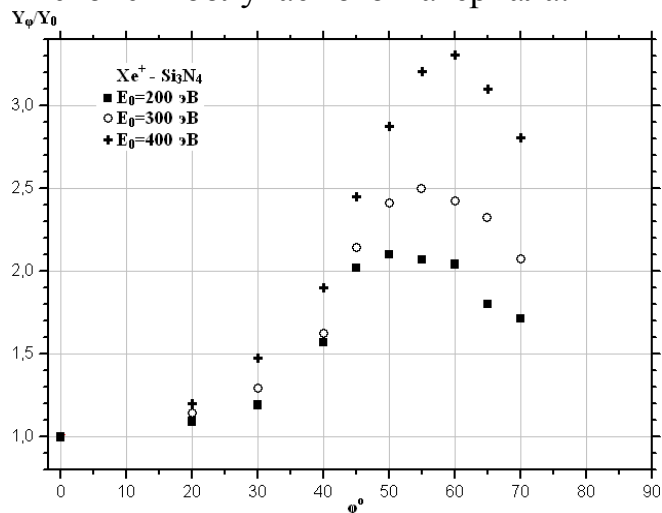


Рисунок 7. Угловые зависимости коэффициентов распыления нитрида кремния при различных энергиях ионов

Из представленных зависимостей можно сделать два основных вывода:

Во-первых, величина максимума зависимости исследованных материалов различна, при этом можно отметить одну закономерность – материалы с меньшим коэффициентом распыления имеют более выраженную угловую зависимость. Это обстоятельство отмечалось в монографии Ивановского и Петрова, хотя речь шла о распылении одноэлементных материалов.

Во-вторых, при энергии ионов 300 эВ максимум зависимости для всех исследованных материалов наблюдается при углах падения ионов $55-60^\circ$. Однако положение максимума зависит от энергии ионов. На рисунке 7 приведены угловые зависимости коэффициента распыления нитрида кремния при различных энергиях ионов. Видно, что при увеличении энергии крутизна зависимости и уровень её максимума увеличиваются, при этом максимум смещается в сторону больших углов падения – примерно на $0,05^\circ$ на 1 эВ увеличения энергии. Существует соотношение, опубликованное Пранявичусом и Дудонисом, согласно которому можно определить угол падения ионов, соответствующий максимальному коэффициенту распыления:

$$\varphi_{\max} = \frac{\pi}{2} - \left[\frac{5\pi \cdot a_0^2 \cdot N^{2/3} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot E_R}{E_0 \cdot (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})} \right]^{1/2},$$

где E_R – энергия Ридберга; E_0 – энергия иона. Согласно этому выражению, на величину φ_{\max} влияют порядковые номера иона Z_1 и атома облучаемого материала Z_2 , а также энергия иона E_0 . Анализируя формулу в контексте проводимых в работе исследований, можно сказать следующее. В экспериментах значение Z_1 не менялось – мишени облучались ксеноном ($Z_{Xe} = 68$). При этом средние значения Z_2 образцов, кроме нитрида бора, близки между собой и меняются лишь в некоторых пределах при изменении концентрации BN в композитах. Очевидно, что для исследованных материалов не следует ожидать сколько-нибудь заметного различия в положении максимумов зависимости $Y(\varphi)$, что и наблюдается на рисунках 6 и 7 (небольшое смещение в сторону больших углов наблюдается лишь для нитрида бора, у которого среднее значение Z_2 меньше по сравнению с остальными керамиками). Таким образом, для рассматриваемого здесь случая единственным фактором, определяющим положение максимума зависимости, остаётся энергия ионов, увеличение которой, как видно из формулы, должно приводить к смещению максимума в сторону больших углов. Результаты расчёта значений φ_{\max} , проведённого с использованием данного соотношения для нитрида кремния, облучаемого ионами ксенона с энергиями 100-500 эВ, приведены на рисунке 8.

Расчётные данные, демонстрируют в целом нелинейное увеличение угла падения, соответствующего максимуму распыления. Однако в диапазоне энергий 200-400 эВ эта зависимость близка к линейной, и можно считать, что максимум распыления смещается в среднем на $0,08^\circ$ на 1 эВ увеличения энергии ионов. Это несколько больше полученного в эксперименте значения, что, возможно, объясняется, угловой расходимостью ионного потока, имеющей место в эксперименте. Тем не менее, при энергиях ионов 300 и 400 эВ полученные в эксперименте значения φ_{\max} совпадают с результатами расчёта.

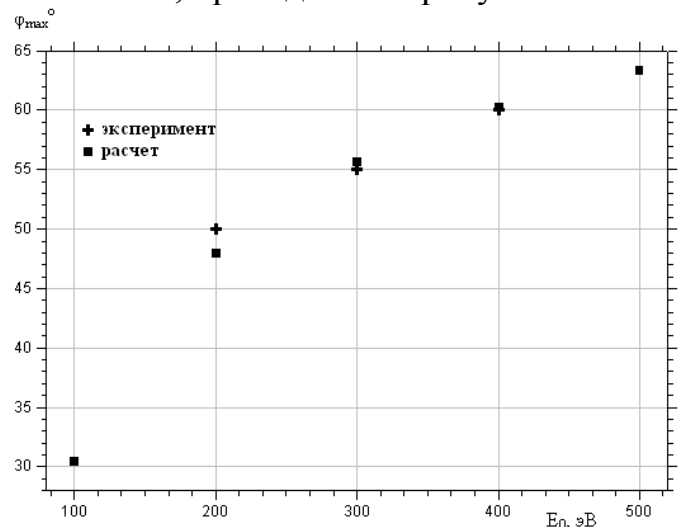


Рисунок 8 – Зависимость значения угла φ_{\max} для нитрида кремния от энергии ионов Xe^+

В целом энергия ионов в рассматриваемом диапазоне влияет на положение максимума угловой зависимости Y не очень заметно – в большей степени она влияет на величину максимума. Как видно из рисунка 7, при увеличении E_0 с 200 до 400 эВ значение φ_{\max} возрастает почти в 2 раза. Для практического применения это обстоятельство гораздо более важно, чем не так уж и заметное смещение максимума угловой зависимости распыления.

Сравнение полученных результатов с данными, полученными рядом других авторов (Y.Garnier, M.Britton и др.) приведено на рисунке 9. Видно, что полученные в данном исследовании результаты достаточно точно совпадают с данными,

которые получили А.Уалин (методом QCM – кварцевого «взвешивания») и М.Бриттон (методом лазерной профилометрии), однако не вполне соответствуют результатам «весовых» измерений У.Гарнье – примерно в 1,5 раза ниже их.

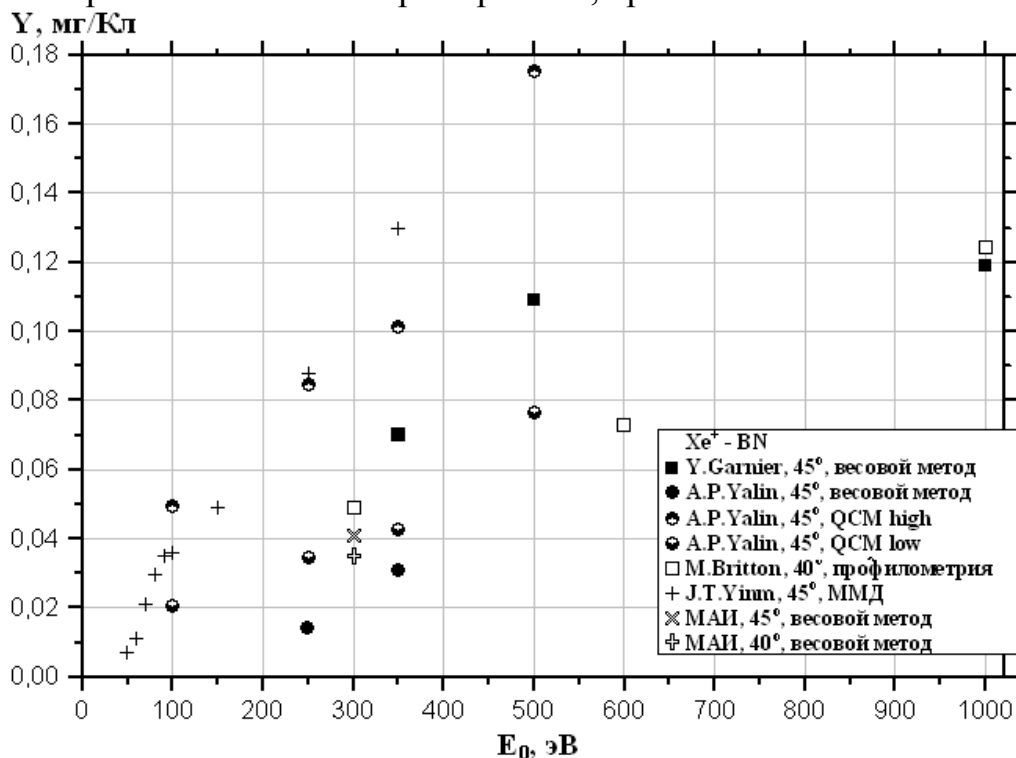


Рисунок 9 – Сравнение расчётных и экспериментальных данных по распылению керамических материалов

Четвертая глава посвящена изучению влияния концентрации исходных компонент на характеристики распыления керамических композитов различного состава. Исследованы три бинарных композита: борисил ($\text{BN}+\text{SiO}_2$), композит нитрида бора с нитридом кремния ($\text{BN}+\text{Si}_3\text{N}_4$) и сиалон ($\text{Si}_{4,5}\text{-Al}_{1,5}\text{-O}_{1,5}\text{-N}$) с добавками нитрида бора. За исключением композита «сиалон + BN» концентрации компонент изменялись во всём возможном диапазоне их изменения – от 0 до 1. Зависимости коэффициентов распыления от энергии ионов для исследованных композитов представлены на рисунках 10-12. Представленные графики демонстрируют примерно линейное возрастание коэффициента распыления. Однако

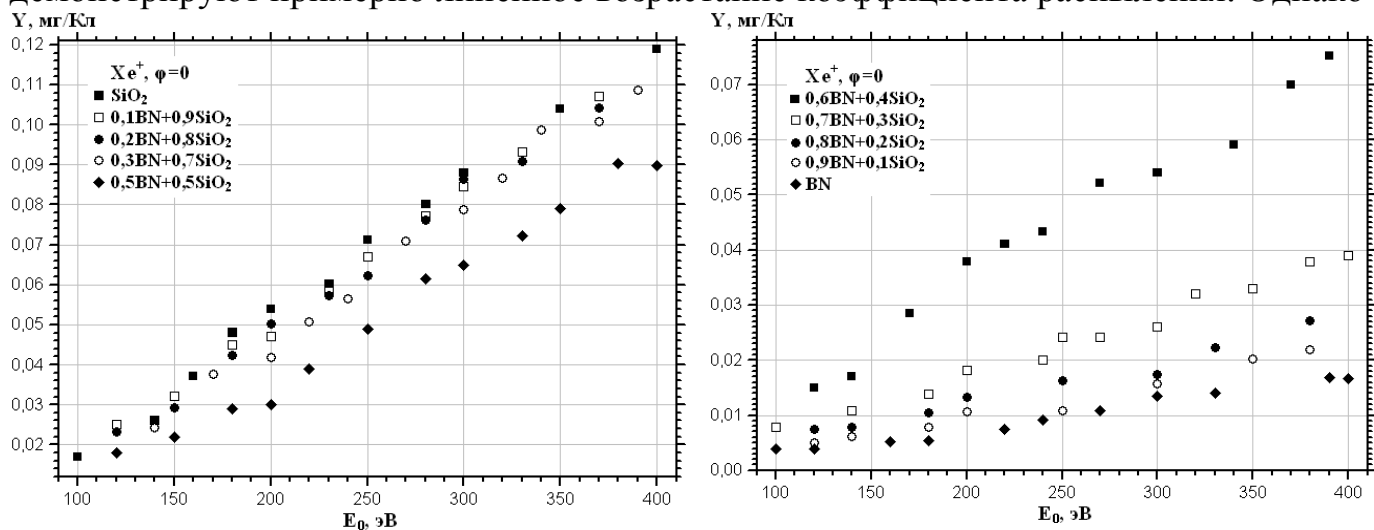


Рисунок 10 – Зависимость коэффициентов распыления композита $\text{BN}+\text{SiO}_2$ от энергии ионов

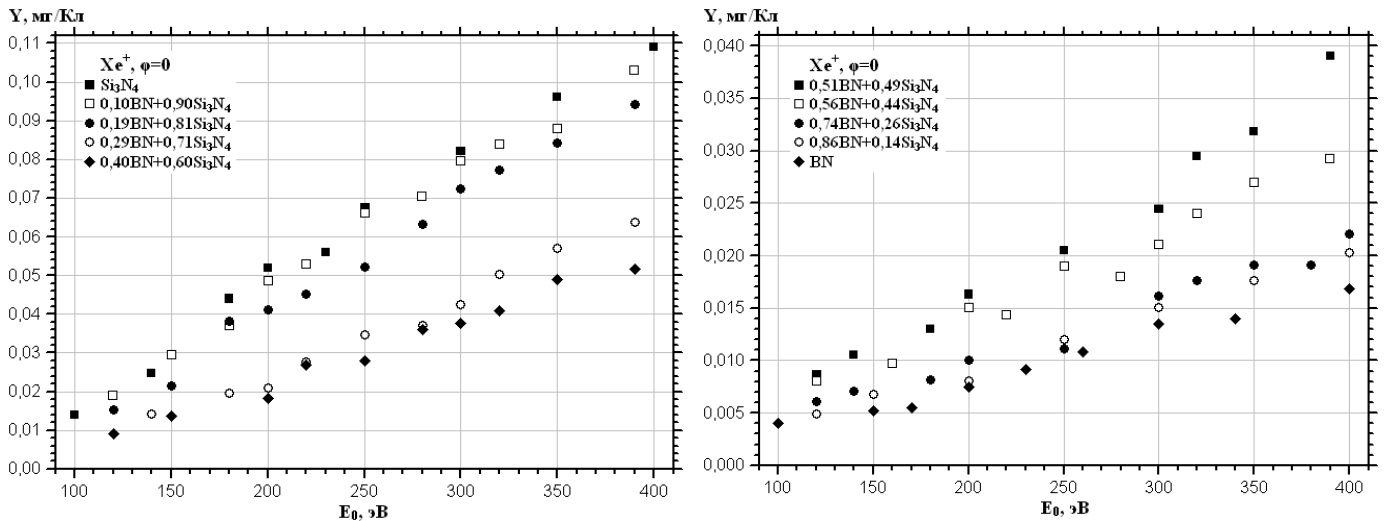


Рисунок 11 – Зависимость коэффициентов распыления композита $BN+Si_3N_4$ от энергии ионов

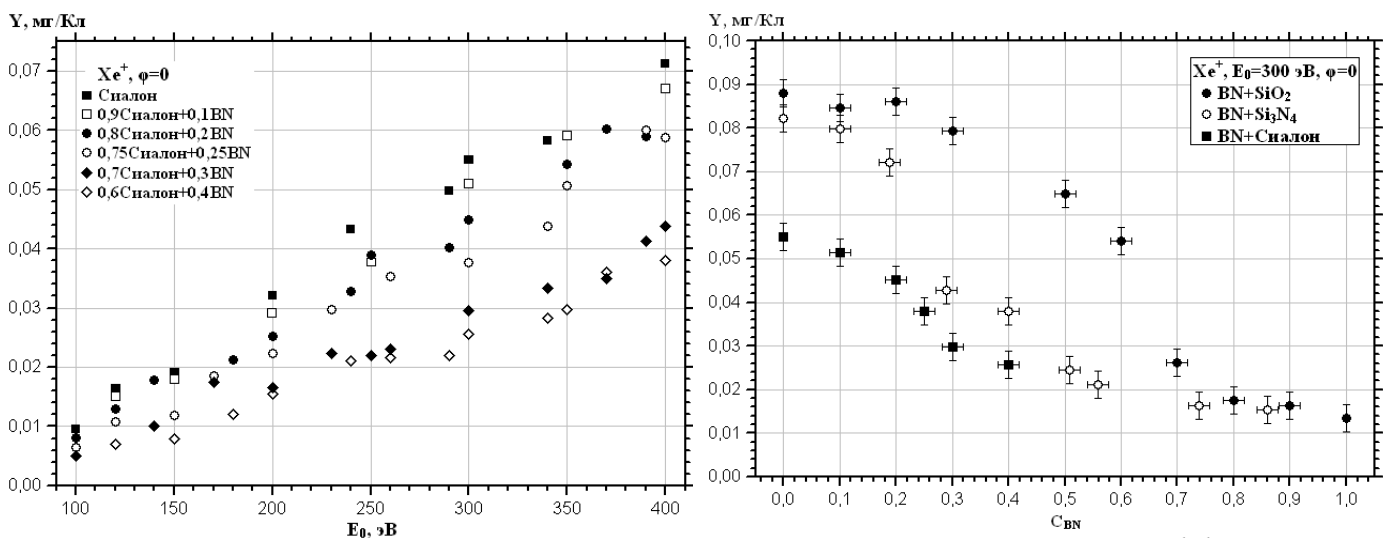


Рисунок 12 – Зависимость коэффициентов распыления композита Сиалон+BN от энергии ионов

Рисунок 13 – Зависимость коэффициентов распыления керамических композитов от концентрации нитрида бора

основной вывод из представленных данных заключается в том, что при увеличении концентрации трудно распыляемого компонента в составе композита (в данном случае нитрида бора) общий коэффициент распыления материала снижается.

На рисунке 13 приведены графики изменения величины коэффициента распыления композитов в зависимости от концентрации нитрида бора при энергии ионов 300 эВ. За точку $C_{BN} = 1$ принято значение Y для чистого нитрида бора, а в качестве точки $C_{BN} = 0$ используются значения коэффициента распыления для диоксида кремния, нитрида кремния или сиалона. Видно, что при увеличении концентрации BN коэффициент распыления снижается от значений для Y легко распыляемого компонента (SiO_2 и др.) до уровня соответствующего чистому BN. Однако это снижение носит нелинейный характер, и, как видно из графиков, по его интенсивности можно выделить три участка. Первый – в области концентраций нитрида бора на уровне $C_{BN} \leq 0.3$. Здесь достаточно слабое снижение коэффициента распыления по мере увеличения концентрации BN. Коэффициент распыления композита мало отличается от значений Y для легко распыляемого компонента,

который вносит основной вклад в общее распыление – влияние нитрида бора незначительно. На втором участке (C_{BN} от 0,3 до 0,7) наблюдается интенсивное снижение значений Y . Влияние трудно распыляемого нитрида бора на общий коэффициент распыления становится заметным и постоянно растёт, в то время как влияние легко распыляемого компонента падает. Наконец, на третьем участке (C_{BN} более 0,7) вклад нитрида бора в общую сумму распыления становится преобладающим, коэффициент распыления композита меняется слабо, и его значения близки к значениям для чистого нитрида бора.

Следует отметить различие значений Y для двух композитов $BN+SiO_2$ и $BN+Si_3N_4$. Значения Y для обоих легко распыляемых компонентов мало отличаются друг от друга (0,088 мг/Кл для SiO_2 и 0,082 мг/Кл для Si_3N_4), и на начальном и конечном участках изменения концентрации нитрида бора значения Y для обоих композитов близки – отличаются примерно на ту же величину, что и чистые нитрид и диоксид кремния. Однако в средней части зависимости композиты отличаются друг от друга сильно – при $C_{BN} = 0,4...0,5$ коэффициенты распыления композита с оксидом кремния в среднем в 2 раза выше, чем для композита с нитридом кремния. Этот факт позволяет сделать важный в практическом смысле вывод: при средних концентрациях BN композит с нитридом кремния более предпочтителен для использования в СПД, чем боросил (разумеется, только с точки зрения устойчивости к ионной эрозии – остальные факторы, играющие роль при выборе материала, в том числе конструкционные свойства здесь не рассматриваются).

Пятая глава посвящена исследованию влияния температуры поверхности на характеристики ионного распыления керамик и их композитов.

Для реализации данной части исследования методика эксперимента была несколько дополнена. Поскольку коэффициенты распыления определяются весовым методом, необходимо определить возможные потери массы мишени, связанные не с ионным распылением, а с десорбцией и испарением. Учитывая пористую структуру исследуемых керамик, величина таких потерь, особенно при температурах $\sim 1000^\circ C$, может оказаться значительной и соизмеримой с потерями массы за счет распыления. Поэтому перед исследованием распыления при высоких температурах проведены эксперименты по нагреву мишени в вакууме без облучения ионным потоком с целью выявления возможных тепловых потерь массы и внесения соответствующих корректировок в эксперимент. Отладочные эксперименты проводились на образце хорошо изученной керамики БГП ($0,7BN+0,3SiO_2$), показывающем неизменно стабильные экспериментальные результаты. В каждом эксперименте мишень вакуумировалась до остаточного давления, выдерживалась 60 минут при температуре $1100^\circ C$, затем охлаждалась в вакууме до комнатной температуры ($\sim 20^\circ C$), развакуумировалась и взвешивалась. В результате экспериментов установлено, что указанные выше потери массы имеют место. На рисунке 14 показана динамика изменения массы мишени керамики БГП после каждого эксперимента (за нулевой уровень принята исходная масса мишени). Видно, что на воздухе мишень интенсивно набирает массу, однако постепенно процесс выходит на насыщение, и масса мишени стабилизируется. Подобное поведение мишени естественно, т.к., будучи пористой структурой, керамика сорбирует атмосферные составляющие и, оказавшись в вакууме, обезгаживается, причем нагрев мишени до

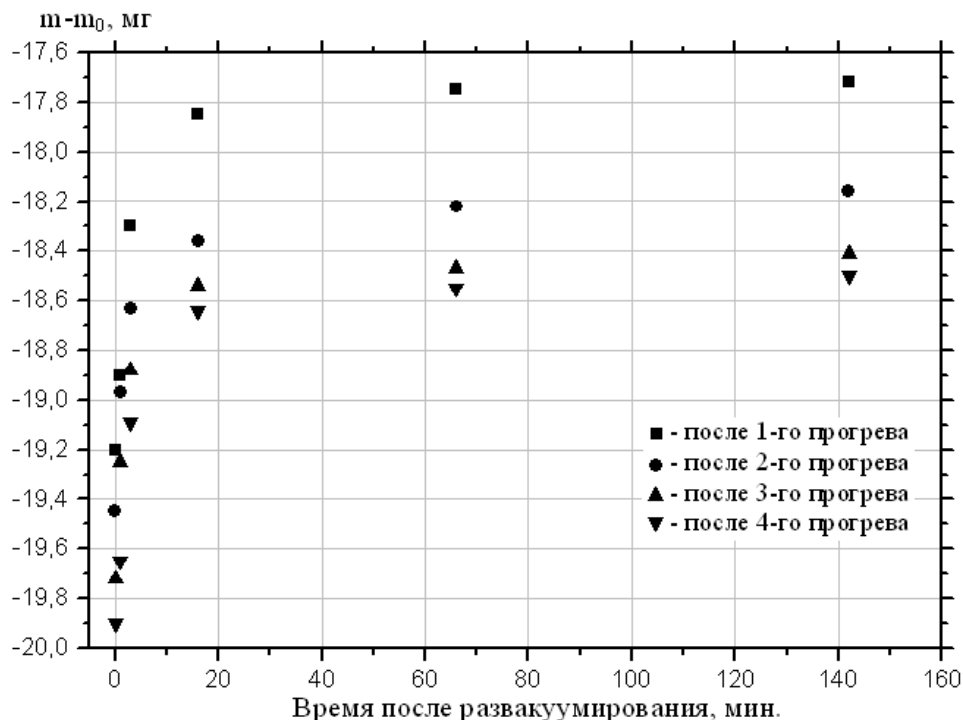


Рис. 14 – Динамика изменения массы керамики БГП после прогрева в вакууме.

высоких температур интенсифицирует этот процесс. После развакуумирования связанные с этим потери массы, компенсируются за счет сорбции атмосферных компонент. Вместе с тем, имеют место и необратимые потери массы, связанные, по-видимому, с обезгаживанием глубинных слоев мишени, которые после эксперимента не успевают быстро заполниться. Однако эти потери наблюдались в основном после первого прогрева (мишень потеряла около 18 мг) – в дальнейшем они не превышали 0,3 мг, что при потерях массы мишени за счет распыления ~3-4 мг не сильно скажется на результатах экспериментов. В связи с этим перед исследованием температурных зависимостей коэффициента распыления каждый из материалов подвергался подобному предварительному «отжигу» – несколько раз прогревался в вакууме без облучения ионным потоком до тех пор, пока потери массы мишени не минимизировались. При этом после «отжига» снимались и дозовые зависимости Y , которые количественно не отличались от полученных на «не отожженных» мишенях.

Экспериментальные зависимости коэффициентов распыления от температуры поверхности для композитов $\text{BN} + \text{SiO}_2$ и $\text{BN} + \text{Si}_3\text{N}_4$, а также для чистого нитрида бора представлены на рисунке 15. Энергия ионов Xe^+ составляла 300 эВ, облучение проводилось по нормали к поверхности. Данные получены в диапазоне температур 300-1100°C – нижняя граница диапазона обусловлена разогревом мишеней за счёт облучения ионным потоком (~300°C). Видно, что при увеличении температуры поверхности до 650-700°C значения Y практически не меняются – наблюдается некоторое их увеличение в пределах погрешности эксперимента, но уверенно считать его таковым, по-видимому, не корректно. При дальнейшем повышении температуры можно видеть интенсивный рост коэффициентов распыления, и при температурах 1000°C их значения в несколько раз превышают значения Y , полученные для «холодных» мишеней (для БГП в 3-4 раза). Следует отметить, что зависимость для композита $\text{BN} + \text{Si}_3\text{N}_4$ более пологая, чем для $\text{BN} + \text{SiO}_2$, причём

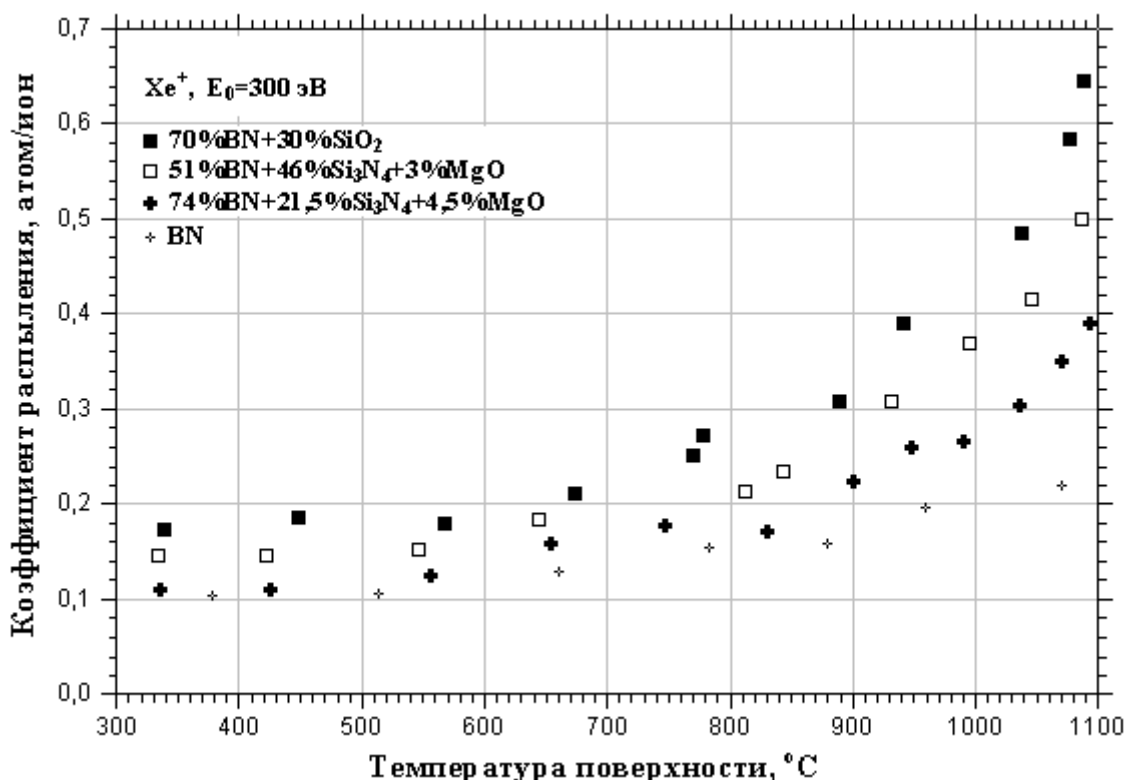


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента распыления керамик от температуры поверхности

увеличение концентрации BN снижает влияние температуры на коэффициент распыления композита. Сам же нитрид бора по сравнению с обоими композитами обладает ещё менее выраженной зависимостью $Y(T)$. Учитывая это обстоятельство, можно говорить о том, что при использовании керамических композитов в СПД целесообразно увеличение содержания нитрида бора в составе – и с точки зрения снижения коэффициента распыления, и с точки зрения уменьшения влияния на его величину температуры. При этом материалы на основе композиции BN+Si₃N₄ с точки зрения ионной эрозии более перспективны для практического использования, нежели «боросил».

На примере композита BN+Si₃N₄ исследовано влияние температуры поверхности на угловые зависимости коэффициентов распыления керамик. Эксперименты проводились при энергиях ионов 300 эВ и температурах 330 и 820°C, углы падения ионов изменялись от 0 до 62°. Нормированные значения Y при различных углах падения ионов и температурах поверхности приведены на рисунке 16. Характер зависимости коэффициента распыления от угла падения при увеличении температуры качественно не меняется, однако скорость роста Y с увеличением

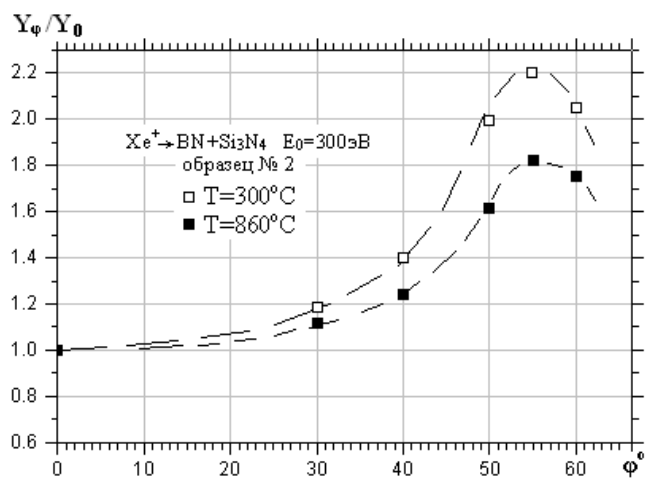


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента распыления композита BN+Si₃N₄ от угла падения ионов при различных температурах

угла падения для различных температур неодинакова – при низких T имеет место более сильный рост коэффициентов распыления, чем при высоких (большая крутизна угловой зависимости). При углах, близких к максимуму зависимости $Y(\varphi)$, превышение относительных коэффициентов распыления мишени, нагретой до 330 и 820°C, составляет 20%. Аналогичные данные получены специалистами Физфака МГУ при моделировании распыления нитрида бора методом молекулярной динамики (рисунок 17). Расчёты угловых зависимостей коэффициентов распыления проводились при температурах от 0 до 2800°C при углах падения ионов на мишень от 0 до 80°. Видно, что характер расчётных зависимостей идентичен

экспериментальным – с увеличением угла падения коэффициенты распыления растут, достигают максимума и затем начинают снижаться. Увеличение температуры мишеней приводит к снижению крутизны зависимостей – при высоких температурах кривые более пологие, чем при низких, а их относительные максимумы ниже. Для температур мишени в пределах 300-1300°C увеличение коэффициента распыления с ростом угла падения ионов примерно следует зависимости: $Y(\alpha)=Y(0)/\cos^{3/2}\alpha$. При более высокой температуре больше подходит аппроксимация: $Y(\alpha)=Y(0)/\cos^2\alpha$.

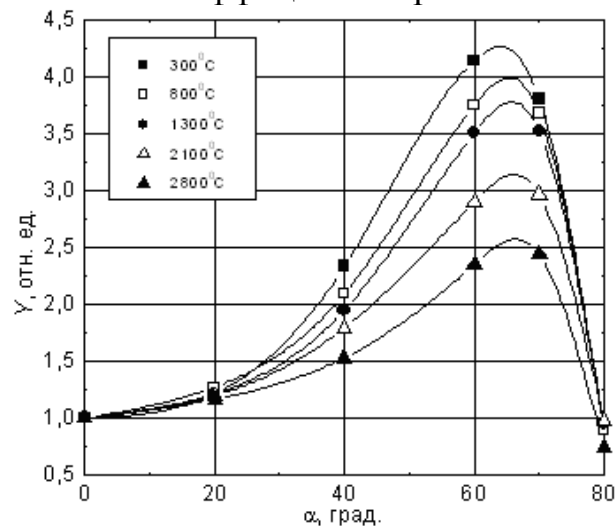


Рисунок 17 – Расчётные угловые зависимости коэффициентов распыления нитрида бора при различных температурах мишени

Следует отметить, что по сравнению с экспериментом расчётный максимум примерно на 10° смещён в сторону больших углов. Едва ли это расхождение можно объяснить различием состава материалов (в расчёте использовался чистый BN, а в эксперименте – композит BN+Si₃N₄), т.к. экспериментальный максимум для чистого нитрида бора (полученный на «холодной» мишени) также находится в пределах 55-60°. Вместе с тем, относительные значения расчётного и экспериментального максимумов (при энергии 300 эВ) практически совпадают – разница не превышает 5-7%. Обращает на себя внимание также то, что и в расчёте, и в эксперименте положение максимума зависимости с ростом температуры не меняется.

В Заключение приводится краткое изложение полученных результатов, их обобщение и выводы, а также даётся оценка возможного использования керамик и керамических композитов в существующих и разрабатываемых СПД.

По результатам проведённого исследования сделаны следующие выводы:

1. Проведён анализ экспериментальных и расчётных данных по распылению керамических материалов, полученных различным исследователями в России и за рубежом. Продемонстрирована их недостаточность для понимания физики распыления многокомпонентных материалов и применения в практических инженерных расчётах. На основании литературных данных определены и конкретизированы цели и задачи настоящего исследования.
2. На основе весового метода разработана методика определения коэффициентов распыления пористых диэлектрических материалов, учитывающая особенности

- их поведения в вакууме, а также под воздействием заряженных частиц. Исследована дозовая зависимость коэффициентов распыления керамических материалов. Разработан алгоритм определения послеэкспериментального веса мишеней в случае исследования пористых материалов, что позволило выделить потери массы вакуумно-сорбционного характера из общей величины потерь и, тем самым, определить потери распылительного характера. Методика отработана на металлах и «модельных» керамиках с заранее известными характеристиками распыления и показала удовлетворительные результаты.
3. Экспериментально исследованы энергетические зависимости коэффициентов распыления керамик при энергиях ионов Xe^+ от 100 до 400 эВ. Установлено возрастание коэффициента распыления с увеличением энергии и практически линейная зависимость для данного диапазона энергий. Крутизна зависимости и абсолютные значения коэффициентов распыления для различных материалов различаются – для крайних случаев исследованного спектра материалов в 5-7 раз. При этом наименьшей устойчивостью к ионному распылению из исследованных материалов обладают нитрид и оксид кремния, а наибольшей – нитрид бора и оксид алюминия. Для керамических композитов величина Y принимает промежуточные значения и зависит, главным образом, от концентрации трудно-распыляемого компонента.
 4. Проведены эксперименты по определению зависимости коэффициента распыления керамических материалов от угла падения ионов на поверхность. Эксперименты проводились в диапазоне углов $0-70^\circ$ (отсчитывается от нормали к поверхности). Установлено, что с увеличением угла падения коэффициенты распыления растут, достигают максимума, после чего интенсивно снижаются. Рост зависимости происходит по закону, близкому к $\cos^{-n}\phi$, где n – параметр, зависящий от материала и энергии ионов. Максимум зависимости для данного диапазона энергий наблюдается в интервале углов падения $55-60^\circ$, а его значение в 3-5 раз превышает значение Y при падении ионов по нормали. Сравнение полученных результатов с данными других авторов и демонстрирует удовлетворительное согласие. Увеличение энергии ионов приводит к увеличению крутизны зависимости и максимального коэффициента распыления, а также к смещению максимума зависимости в сторону больших углов.
 5. Исследована зависимость коэффициента распыления керамических композитов на основе нитрида бора от концентрации компонент. Установлено, что увеличение концентрации BN ведёт к снижению значений Y композита, при этом при концентрации более 70% значения Y композитов незначительно превышают значения чистого BN. Характер зависимости коэффициента распыления композитов от концентрации нитрида бора не подчиняется аддитивному закону (как это предполагалось ранее) и носит нелинейный характер.
 6. Экспериментально исследовано влияние температуры поверхности на коэффициенты распыления керамик и их композитов в диапазоне температур $300-1100^\circ\text{C}$ при энергии ионов 300 эВ. Установлено, что в интервале температур от 300 до 650°C значения коэффициентов распыления практически не меняются, однако при дальнейшем увеличении температуры интенсивно возрастают. При этом среди исследованных материалов наименее подвержен влиянию

температуры чистый нитрид бора – его значения Y даже при максимальном нагреве всего в 1,5 раза превосходят данные, полученные при 300°C. Для композитов эта зависимость сильнее – при температуре 1100°C их коэффициенты распыления в 3-4 раза превосходят значения «холодных» мишеней. Это обстоятельство противоречит существовавшему ранее утверждению о том, что температура поверхности не влияет на величину коэффициента распыления – данные, полученные при распылении металлов, свидетельствуют о том, что рост значений Y наблюдается лишь при температурах, близких к температуре плавления материала ($0,8T_{пл}$), что связано не столько с механизмом распыления, сколько с интенсификацией термического испарения материала.

7. Исследовано влияние температуры поверхности на угловые зависимости коэффициентов распыления керамических композитов. Исследования проведены при температурах 300 и 800°C. Впервые обнаружено снижение крутизны угловой зависимости и её максимума при увеличении температуры. Так, значение нормированного максимума коэффициента распыления при температуре 800°C примерно на 20% ниже, чем при температуре 300°C.

Список публикаций по теме диссертации

1. *С.В.Мадеев, А.А.Семенов, С.А.Хартов, И.И.Шкарбан.* Формирование «фрактальных» структур в межэлектродном зазоре в результате распыления электродов сеточных источников ионов. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, № 10, с. 26–31.
2. *Алексеевич М.Ю., Панков А.С., Сударев А.А., Семенов А.А.* Влияние состава композиционных керамик на их коэффициенты распыления. – Вестник ГКТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2013, № 2, С. 11-14 (658-661).
3. *А.А.Семенов, И.И.Шкарбан.* Влияние температуры поверхности на характеристики распыления керамик на основе нитрида бора. // Вестник Московского авиационного института – 2009, №1, с. 49.
4. *С.С.Еловигов, А.С.Мосунов, Ю.А. Рыжов, А.А.Семёнов, М.Ю.Толпина, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Угловые закономерности распыления нитрида бора и керамики на его основе при изменении температуры мишени. // Известия РАН. Сер.Физ. – 2006, Т.7, №8, С.1182-1188.
5. *Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, А.С.Мосунов, В.Е.Юрасова.* Особенности распыления ионами низких энергий бинарных соединений и композиционных мишеней. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Термоядерный синтез» –М.:2004, Вып.2, С.54-65.
6. *С.С.Еловигов, Е.Ю.Зыкова, А.С.Мосунов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Зависимость распыления нитрида бора от энергии, массы и угла падения ионов. // Известия АН. Сер. Физическая. – 2002, Т.66, №4, С.558-561.
7. *Л.Н.Лесневский, Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, А.Е.Трошин, И.И.Шкарбан.* Распыление плазменных покрытий на основе керамик и интерметаллических соединений – Сб. трудов 21-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ISI-2013), Ярославль, 22-26 августа 2013 г. – М.: Издательство «Телер», 2013, С. 174-176.
8. *Elvira Nikiporetz, Alexander Semenov, Igor Shkarban and Elena Khartova.* Sputtering progress of BN based ceramic by the flows of noncompensated charge plasma. // Proc. of the

- 30th International electric propulsion conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007 – IEPC 2007-7.
9. *М.М.Горшков, Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Влияние температуры мишени на угловые зависимости коэффициентов распыления керамик. // Сб. трудов 17-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – М.: Изд. МАИ, 2005, Т.1, С.111-113.
 10. *А.А.Семенов, С.А.Ситников, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Влияние концентрации нитрида бора на коэффициенты распыления композиционных керамических материалов. // Сб. трудов XVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью», Звенигород, 25-29 августа 2003 г. – М.: 2003, Т.1, С.180-181.
 11. *Vladimir Kim, Vyacheslav Kozlov, Alexander Semenov and Igor Shkarban.* Investigation of the boron nitride based ceramics sputtering yield under its bombardment by Xe and Kr ions. // Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-073 – Pasadena, California, USA. October 15-19, 2001.
 12. *В.П.Ким, А.А.Семенов, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Распыление керамик ионами Хе и Кг при энергиях 100-400 эВ. // Сб. трудов 15 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 2001, т.1, С.134-136.
 13. *С.С.Еловигов, А.С.Мосунов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Энергетическая зависимость распыления поликристаллического нитрида бора. // Сб. трудов 15 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 2001, т.1, С.116-119.
 14. *А.Н.Раннев, А.А.Семенов, О.Б.Соловьев.* Влияние температуры поверхности на скорость распыления керамики. // Сб. трудов 13 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 1997, т.1, С.136.