

На правах рукописи

МАСЛЕННИКОВ Сергей Павлович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ
ГЕНЕРАЦИИ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ И ОБЪЕМНЫХ ГАЗОВЫХ
РАЗРЯДОВ

Специальность 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Автор:

Москва – 2010 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (НИЯУ МИФИ)

Официальные оппоненты:

Долгачев Георгий Иванович, доктор физико-математических наук, РНЦ “Курчатовский Институт”.

Карелин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, РФЯЦ Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики.

Серов Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), г. Троицк

Защита диссертации состоится 08 июня 2010г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, в конференц-зале К-608, тел. (495)323-95-26, (495)324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан “___” _____ 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.С.Щедрин

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Устройства мощной импульсной энергетики и электроники находят широкое применение в научных исследованиях, промышленности и медицине. Одним из таких применений является использование газоразрядной плазмы, генерируемой мощными импульсными разрядами при давлениях близких или равных атмосферному.

Так, например, высокоскоростные газоплазменные потоки, формируемые в разрядном промежутке импульсного электротермического ускорителя, дают возможность провести эффективное ускорение и нагрев микрочастиц порошковых материалов и создать на этой основе высококачественные защитные и специальные порошковые покрытия. Этот способ нанесения порошковых покрытий на поверхность различных изделий, обладает рядом потенциальных преимуществ по сравнению с традиционными газотермическими методами, реализуемыми в детонационных и HVOF установках, плазмотронах. Электротермические ускорители позволяют проводить ускорение микрочастиц до скоростей, недостижимых другими установками, в контролируемой по составу и давлению среде, в том числе в атмосферных условиях, а также в среде инертных газов. Обладая относительно малыми габаритами, электротермические ускорители допускают широкую перестройку режимов работы и могут относительно просто адаптироваться к технологическим условиям нанесения покрытий, в них используется электрическая энергия, которая экологически чище и безопаснее горючих газов.

Применение плазмы импульсно-периодического диффузного разряда, возбуждаемого в воздушной среде при атмосферном давлении, открывает широкие возможности для создания эффективной технологии стерилизационной обработки и обеззараживания объектов в различных биотехнических системах, очистки промышленных выбросов и токсичных отходов. Плазма газового разряда содержит широкий спектр агентов стерилизации: заряженные частицы, высоковозбужденные нейтралы, активные продукты плазмохимических реакций, ультрафиолетовое и, в ряде режимов, рентгеновское излучение. Комплексным воздействием перечисленных агентов определяется потенциально высокая эффективность плазменной стерилизации и малое время, требуемое для обработки изделий. Низкие температуры стерилизации позволяют обрабатывать термочувствительные материалы, широко используемые в современной промышленности и медицинской практике.

Цели диссертации. К основным целям работы относятся теоретические и экспериментальные исследования физических процессов формирования и распространения высокоскоростных газоплазменных потоков в электротермических ускорителях для ускорения микрочастиц порошковых материалов с целью нанесения покрытий на поверхности изделий, а также исследованию процессов генерации низкотемпературной плазмы импульсно-периодического диффузного разряда атмосферного давления для создания эффективной технологии стерилизационной обработки и обеззараживания различных объектов.

Научная новизна:

1. Впервые показано, что ускорение микрочастиц порошковых материалов до высоких скоростей при сохранении жесткого контроля режима их нагрева может быть проведено в области ударно-сжатого газа импульсного газоплазменного потока электротермического ускорителя.
2. Предложены новые способы формирования области ударно-сжатого газа на основе пространственно-временного профилирования ударной волны с использованием мультиразрядных схем разрядного узла электротермического ускорителя, а также с использованием профилированной геометрии ствола.
3. Получены новые данные о влиянии газодинамических процессов за срезом ствола электротермического ускорителя на скорость и температуру микрочастиц. Определены условия оптимизации расстояния от среза ствола до подложки, позволяющие избежать потери скорости микрочастиц и сохранить их тепловое состояние.
4. Впервые проведены расчеты и экспериментальные исследования динамического расслоения сгустка микрочастиц в электротермическом ускорителе, связанного с неоднородным гранулометрическим составом порошкового материала и конечными размерами области инъекции. Определены предельные значения массы навески инжектированного порошкового материала, при превышении которых происходят снижение скорости и деформации фронта ударной волны.
5. Разработаны физические модели процессов абляционного износа диэлектрических стенок разрядного промежутка под действием теплового излучения плазмы разряда в электротермическом ускорителе. Теоретически и экспериментально показано, что аблирующие слои проникают вглубь керамических изоляторов на глубину, не превышающую 1 мкм, а сам износ для рассматриваемых уровней запасенной энергии (~ 1 кДж) составляет около 1 мг/имп.

6. Впервые показано, что ресурс и энергетическая эффективность электротермического ускорителя могут быть значительно повышены при оптимизации геометрии разрядного узла, наилучшими ресурсными характеристиками обладает двухразрядная схема ускорителя с внешним ключевым элементом. Для снижения абляционного износа диэлектрических втулок предложено использовать эффект теплового барьера, реализуемого путем инъекции в разрядный промежуток порции микрочастиц порошкового материала.
7. На основании физического моделирования плазмохимических процессов определены оптимальные параметры систем импульсного электропитания диффузного разряда в воздушной среде атмосферного давления для эффективной наработки плазменных агентов стерилизации. Предельная величина напряженности электрического поля составляет 40-45 кВ/см при длительности импульсов 30-50 нс. Однородность пространственной структуры разряда повышается при воздействии импульсов напряжения с короткими фронтами ($t_f \leq 10^{-8}$ с).
8. Экспериментально определены условия генерации диффузных разрядов в электродных системах с резко неоднородным распределением электрических полей в диапазоне давлений воздуха от 10 до 760 Торр. Показано, что комбинированная система электропитания разряда на основе источников постоянного и импульсного напряжения способствует увеличению энергии разряда и улучшению равномерности его объемной структуры.
9. Проведены исследования диффузных объемных разрядов в воздухе атмосферного давления при использовании электродных систем с плазменным катодом, в которых синхронно возбуждаются два типа разрядов: диэлектрический барьерный разряд в решетчатом электроде на диэлектрической поверхности и диффузный разряд с объемной структурой. Экспериментально показана высокая эффективность наработки активных продуктов плазмохимических реакций в режиме объемного горения диффузных разрядов.

Практическая ценность.

Полученные в работе результаты позволяют создать на основе импульсного электротермического ускорителя прототип промышленной установки по нанесению покрытий из порошковых материалов, которая по своим потенциальным возможностям обладает существенными преимуществами перед аналогами – установками газотермического напыления. Использование разрядных узлов с мультиразрядной структурой и профилированной геометрией ствола позволяет осуществлять практически независимую регулировку скорости микро-

частиц и температуры их нагрева, проводить ускорение микрочастиц с широким диапазоном их размеров и плотностей порошкового материала до высоких значений скоростей. Электротермический ускоритель допускает проведение перестройки режимов его работы и может адаптироваться к различным технологическим и производственным процессам. Все это позволяет создавать условия для напыления покрытий с уникальными характеристиками.

Результаты исследований режимов генерации и характеристик импульсно-периодических диффузных разрядов, возбуждаемых в воздухе при атмосферных условиях, позволяют создать новые технологии стерилизации и обеззараживания с высокой эффективностью и малым временем обработки объектов. Стерилизационные плазменные установки на этой основе обладают высоким потенциалом для их внедрения в медицинских учреждениях, замкнутых биотехнических системах длительного функционирования и т.д. Эффективность плазменных стерилизаторов обусловлена широким спектром агентов стерилизации. Низкотемпературный характер плазмы разряда позволяет стерилизовать термочувствительные материалы, которые широко используются в различных областях науки и техники.

Основные результаты диссертационной работы используются в исследованиях, направленных на разработку, создание и практическое применение импульсных электрофизических установок и их элементов, которые проводятся в ФГУП ВНИИА (г. Москва), ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Троицк), ФГУП ВЭИ (г. Москва). Представленные в работе импульсные электротермические ускорители, а также результаты моделирования динамики газоплазменных потоков и ускорения микрочастиц порошковых материалов в электротермических ускорителях используются при проведении научно-исследовательских работ в РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на факультете «Автоматика и электроника» Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ».

Работы, вошедшие в диссертацию, выполнялись в рамках федеральных целевых программ “Интеграция”, “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы”. Часть работ была поддержана Российским Фондом Фундаментальных исследований (гранты 99-01-00315, 01-01-00533, 03-01-00707, 04-01-08004, 05-01-08111, 06-08-00593), а также Международным Научно-Техническим Центром (проекты 470-96, 3131-06).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ ускорения микрочастиц порошковых материалов областью ударно-сжатого газа, формируемой в головной части импульсного газоплазменного потока в электротермическом ускорителе.
2. Результаты анализа ускорения и нагрева микрочастиц в плазменной и ударно-сжатой областях импульсных потоков в аргоновой и воздушной средах.
3. Результаты физического моделирования динамики потоков и микрочастиц, анализа способов формирования области ударно-сжатого газа.
4. Результаты экспериментальных исследований структуры и характеристик газоплазменных потоков, динамики ускорения микрочастиц в электротермических ускорителях с различной конфигурацией разрядных узлов и геометрией каналов ускорения.
5. Результаты исследований эрозионных и абляционных процессов в разрядных узлах, теплового режима их работы, оптимизации геометрии разрядных узлов для повышения эффективности и ресурса электротермического ускорителя.
6. Результаты физического моделирования динамики компонентного состава газоразрядной плазмы и наработки продуктов плазмохимических процессов диффузного разряда.
7. Результаты экспериментальных исследований процессов генерации и характеристик диффузных разрядов в электродных системах с резко неоднородным распределением электрических полей в условиях низкого вакуума (разреженной газовой среде) и при атмосферном давлении.
8. Результаты исследований импульсно-периодических диффузных разрядов и динамики наработки активных продуктов плазмохимических реакций в электродных системах с плазменным катодом в воздушной среде при атмосферных условиях.

По мнению автора, эти положения можно квалифицировать, как решение крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, по исследованию физических процессов в электроимпульсных системах генерации газоплазменных потоков и объемных газовых разрядов для технологических применений.

Личный вклад автора заключается в выработке целей и постановке задач исследований, проведении физического моделирования изучаемых процессов, создании экспериментального оборудования, проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов. Основные ре-

зультаты исследований получены при непосредственном участии и под руководством автора.

Достоверность научных результатов подтверждается всесторонним анализом теоретических допущений, использованных при создании физических моделей, сравнением результатов моделирования и экспериментальных измерений параметров исследуемых явлений, дублированием измерений посредством использования различных экспериментальных методик, апробацией предложенных методов и методик при решении практических задач.

Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации были представлены на следующих симпозиумах и конференциях: 6-th European Symposium on electromagnetic launch technology. Netherlands, May 1997; 9-th Electromagnetic Launch Symposium. Edinburgh, Scotland, UK, May 1998; 10-th Electromagnetic Launch Symposium San Francisco, USA, May 2000; 11-th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Saint Louis, France, May 2002; 12th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Snowbird, Utah, USA, May 2004; 13-th Electromagnetic Launch Symposium. Potsdam, Germany, May 2006; 11-th IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimore, Maryland, June 1997; 12-th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, California USA. June 1999; 14-th IEEE International Pulsed Power Conference, Dallas, Texas, USA, June 2003; 15-th IEEE International Pulsed Power Conference, Monterey, California, June 2005; 16-th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, New Mexico, June 2007; 1-st Euro-Asian Pulsed Power Conference, Chengdu, China, September 2006; 26-th IEEE International Conference on Plasma Science. Monterey, California USA, June 1999; 6-th International Conference on the Science of Hard Materials, Lanzarote, Spain, March 1998; 1-st International Symposium on Nonthermal Medical/Biological Treatments Using Electromagnetic Fields and Ionized Gases, Norfolk, VA, April 1999; XIV, XV, XVI Научно-техническая конференция «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления», Судак, Украина, 2002, 2003, 2004 г.г.; XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Украина, 2005г.; Международная конференция «Профилактика, диагностика и лечение инфекционных болезней, общих для людей и животных» Ульяновск, Россия, 2006 г.; ежегодные научные конференции МИФИ, 1998 – 2009г.г.

Публикации.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе в 11 статьях в рецензируемых журналах, по тематике работы получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 216 источников.

Общий объем работы - 266 страниц, из них 224 страниц основного текста, 171 рисунок, 8 таблиц.

Краткое содержание диссертации.

Во введении приведен краткий обзор результатов научных исследований и технологических разработок в области газотермических методов нанесения порошковых покрытий и низкотемпературной плазменной стерилизации, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются ее цели, выносимые на защиту положения, научная новизна и практическая ценность.

Первая глава посвящена анализу динамики импульсных потоков, ускорения и нагрева микрочастиц порошковых материалов в электротермическом ускорителе с различными конфигурациями разрядного узла и ствола в воздушной и аргоновой средах.

Система уравнений физической модели ускорителя, описывающая процессы в разрядной области и стволе, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_a \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(P + \rho v^2) = -F_t, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(E + P)v] = \begin{cases} j^2 / \sigma - Q_{out}, & 0 \leq x \leq l \\ -Q_{out}, & x > l \end{cases} \end{array} \right., \quad \text{где} \quad \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_a = \frac{2 \sigma_s T^4}{r v + \varepsilon} \\ E = e + \frac{\rho v^2}{2} \\ Q_{out} = v \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_a \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь ρ , v , P , T — плотность, скорость, давление и температура плазмы, e — удельная внутренняя энергия плазмы, F_t — сила турбулентного трения, $j = i/S$ (i — разрядный ток, S — площадь поперечного сечения разрядной области), σ_s — константа Стефана Больцмана, ε — внутренняя энергия аблирующего материала, v — энтальпия материала стенок ствола, $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_a$ — изменение массы газа в разрядном

промежутке с учетом абляции стенок, r – радиус разрядной области и ствола ускорителя, Q_{out} — энергия излучения плазмы.

В предположении стационарности параметров потока система уравнений, описывающая динамику ускорения микрочастиц на стадии их плавления, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_p \frac{dv_p}{dt} = C_d \frac{\pi r^2}{2} \rho \cdot \text{sign}(v - v_p) \cdot (v - v_p)^2, \\ \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_p \cdot c_p \frac{dT_p}{dt} = 2\pi r \lambda \cdot Nu \cdot (T - T_p) \\ \frac{dx_p}{dt} = v_p \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь: v , ρ , T , λ – скорость, плотность, температура, коэффициент теплопроводности газа; C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; ρ_p , c_p – плотность, теплоемкость материала частиц; Nu – число Нуссельта; T_p , r , x_p , v_p – температура, радиус, координата и скорость микрочастиц.

В газоплазменном потоке электротермического ускорителя можно выделить две характерные области (рис.1): в головной части потока распространяется область ударно-сжатого газа (ОУСГ), за которой следует плазменный поток, образованный в результате истечения газа из разрядного промежутка.

Процесс ускорения микрочастиц в плазменном потоке сопровождается их интенсивным и неконтролируемым нагревом. При характерных температурах плазмы выше 15-20 кК до момента достижения температуры испарения микрочастицы успевают набрать скорость, не превышающую 10-20% от скорости потока (рис.2). В связи с этим ускорение микрочастиц в плазменном потоке является крайне неэффективным и не позволяет обеспечить контроль их теплового состояния.

Условия ускорения и нагрева микрочастиц радикально изменяются в ОУСГ. Благодаря относительно низким значениям температур и повышенной плотности газа к моменту полного проплавления микрочастицы способны приобретать скорости до 75-95 % от скорости потока (рис.3).

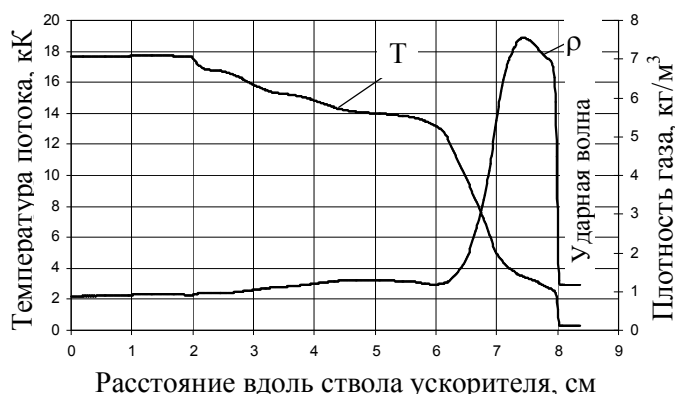


Рис.1. Распределение плотности (ρ) и температуры потока (T) вдоль ствола ускорителя в произвольный момент времени.

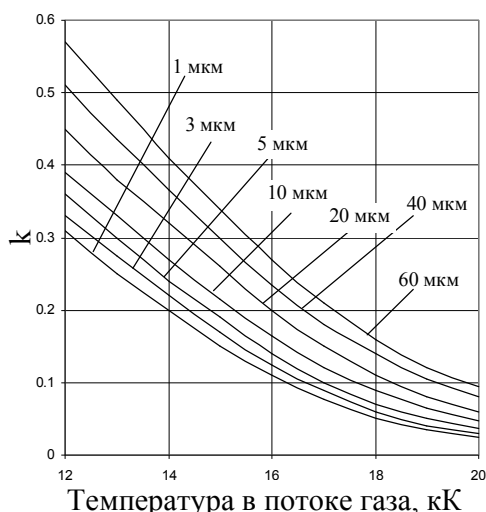


Рис.2. Зависимость относительной скорости (k) микрочастиц корунда различного диаметра от температуры потока аргонной плазмы. Скорость потока – 2 км/с.

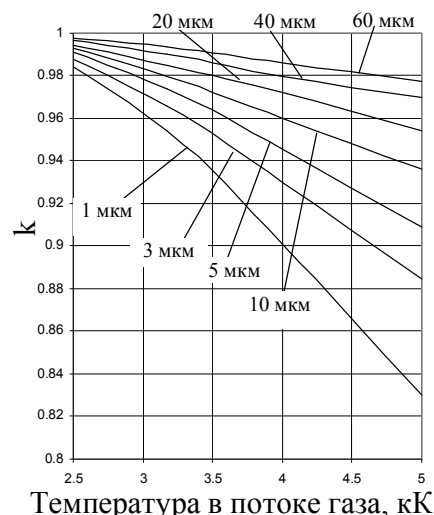


Рис.3. Относительная скорость (k) микрочастиц корунда различного диаметра на момент проплавления в аргонной среде. Скорость потока – 2 км/с, плотность – 8 кг/м³.

Для обеспечения условий ускорения микрочастиц порошковых материалов при заданном температурном режиме требуется сформировать ОУСГ определенной длины и плотности и сохранить высокую скорость газа (рис.4).

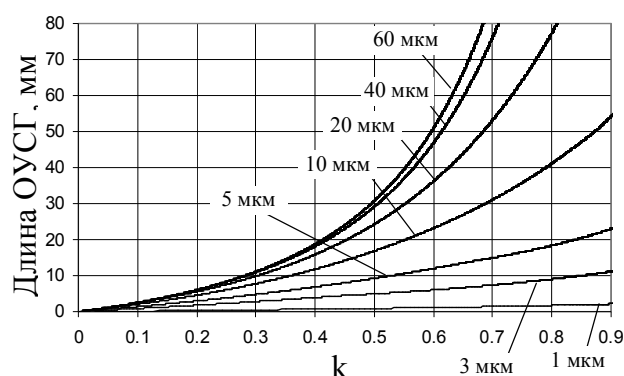


Рис.4. Зависимость длины ОУСГ от относительной скорости микрочастиц корунда в аргонной среде. Температура газа – 4 кК, скорость – 2 км/с, плотность – 8 кг/м³.

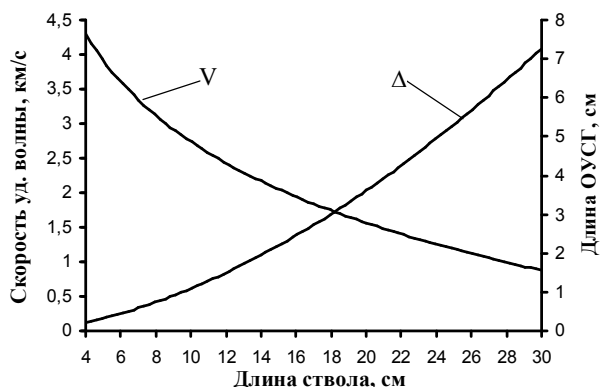


Рис.5. Зависимости скорости ударной волны (V) и длины ОУСГ (Δ) от длины ствола в классическом ускорителе

В ускорителе с классической структурой разрядного узла (один разрядный промежуток и однородный ствол) процесс формирования ОУСГ сопровождается интенсивным замедлением потока (рис.5), что накладывает ограничения на размер (1-5 мкм) и плотность материала (<4 кг/м³) микрочастиц, которые могут ускоряться в условиях контроля их теплового состояния.

Способ пространственно-временного профилирования ударной волны, реализуемый за счет использования мультиразрядных схем разрядного узла, расширяет возможности ускорителя по сравнению с его классической схемой.

Результаты моделирования процессов в двухразрядных ускорителях показали возможность практически независимого регулирования скорости и температуры микрочастиц с размерами до 15-20 мкм и плотностью их материала в диапазоне 4-8 кг/м³.

Использование профилированной геометрии ствола ускорителя (рис.6) позволяет существенно увеличить протяженность ОУСГ с сохранением скоростных характеристик потока.

Анализ процессов распространения потоков в профилированном ускорительном тракте выявил динамические эффекты, связанные с образованием локальных градиентов давлений в областях конусных переходов ствола. Передний градиент давления способствует увеличению скорости ОУСГ. Параметры ОУСГ могут регулироваться в широких пределах за счет изменения геометрических размеров бустерной полости, что создает условия для ускорения микрочастиц с широким диапазоном размеров (~5–50 мкм) и плотностей (~4–16 кг/дм³).

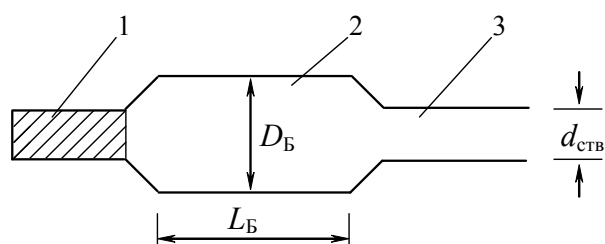


Рис.6. Конфигурация ствола ускорителя с профилированной геометрией ствола: 1 – разрядный промежуток; 2 – бустерная полость ствола; 3 – ствол

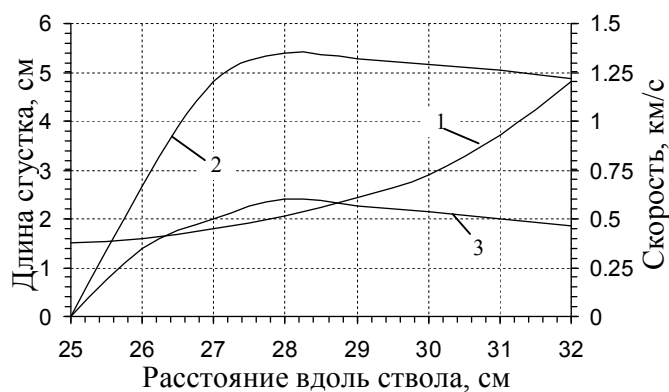


Рис.7. Динамика основных параметров сгустка микрочастиц по длине ствола: 1 – длина сгустка, 2 – скорость головной части сгустка, 3 – скорость хвостовой части сгустка

Движение микрочастиц порошка за срезом ствола ускорителя сопровождается отклонениями их траектории, изменениями скорости и теплового состояния, что влияет на качество наносимых покрытий. На основе физического моделирования определены условия, позволяющие соответствующим выбором дистанции напыления обеспечить сохранение температуры и скорости микрочастиц в процессе их движения к подложке.

Анализ динамики ускорения и нагрева сгустка микрочастиц в стволе ускорителя позволил выявить эффекты, приводящие к его расслоению (рис.7). Конечные размеры области инъекции порошка вдоль ствола и неоднородный гранулометрический состав исходного порошкового материала создают предпо-

сылки для формирования разброса скоростных и температурных параметров микрочастиц.

Во второй главе приведены результаты разработки функциональных узлов, цепей импульсного электропитания, исследуются электрические и энергетические характеристики разрядных узлов импульсных электротермических ускорителей.

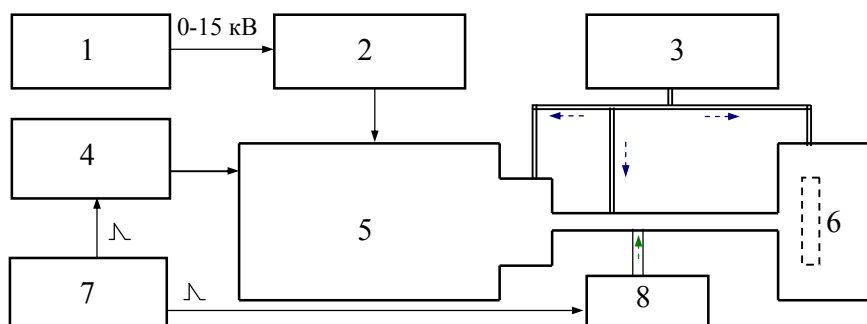


Рис.8. Структурная схема установок для исследования процессов нанесения покрытий: 1 – высоковольтное зарядное устройство; 2 – емкостный накопитель энергии; 3 – газовая система; 4 – блок поджига; 5 – ускорительный блок; 6 – камера нанесения покрытий в защитной среде; 7 – блок управления; 8 – дозатор порошковых материалов

Структурная схема электротермического ускорителя для исследований процессов ускорения микрочастиц порошковых материалов показана на рис.8. Фотографии ускорительных блоков экспериментальных установок с одним и двумя разрядными промежутками приведены на рис.9.

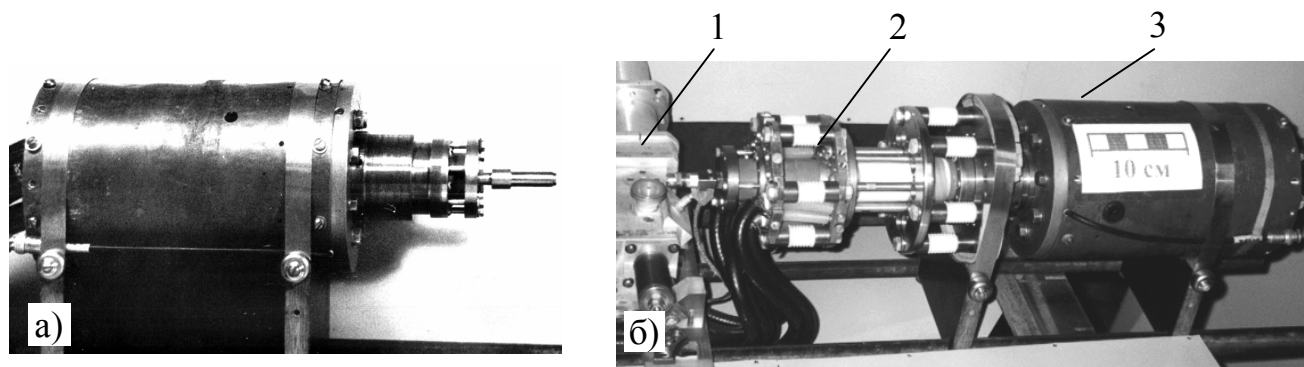


Рис.9. Внешний вид электротермических ускорителей с одним (а) и двумя (б) разрядными промежутками: 1- дозатор порошковых материалов; 2- вторая разрядная ступень; 3- ускорительный блок (первая разрядная ступень)

Цепи импульсного электропитания разрядных узлов ускорителей построены на основе емкостных накопителей энергии, эквивалентная емкость которых в зависимости от конкретных условий изменялась от 1 мкФ до 24 мкФ. Диапазон зарядных напряжений: 3-12 кВ. Максимальный уровень запасаемой энергии - 2 кДж.

На рис.10 представлены осциллограммы разрядных токов в ускорителе с классической структурой при длине разрядного промежутка $l_p=2$ см.

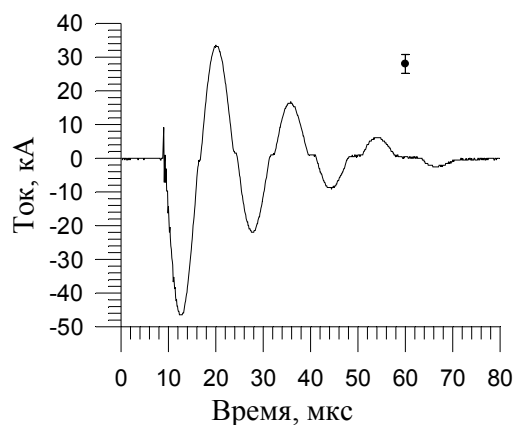


Рис.10. Осциллограмма разрядного тока (емкость накопителя энергии $C=12$ мкФ, $U_C=12$ кВ)

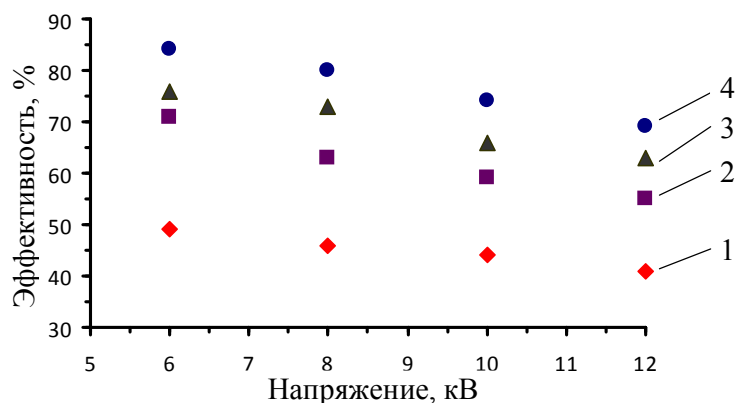


Рис.11. Экспериментальные значения эффективности вложения энергии в разряд для различных длин разрядного промежутка: 1 - $l_p=20$ мм (одноразрядный ускоритель); 2 - $l_{p2}=30$ мм; 3 - $l_{p2}=40$ мм; 4 - $l_{p2}=50$ мм (двухразрядный ускоритель)

Эффективность вложения энергии для исследованных схем ускорителей составляет от 40 до 85% и зависит от геометрии разрядного промежутка и мощности разряда (рис.11). Для повышения энергетической эффективности установок требуется согласование параметров разрядного узла и его системы электропитания. Сопротивление разряда вблизи максимумов тока имеет величину $10^{-2} - 10^{-1}$ Ом.

В третьей главе рассматриваются экспериментальное оборудование, измерительные методики, результаты исследований структуры и характеристик газоплазменных импульсных потоков, динамики ускорения сгустка микрочастиц, температурных параметров плазменных потоков в электротермическом ускорителе.

Анализ результатов измерений основных динамических параметров потоков, выполненных при различных конфигурациях стволов электротермических ускорителей, подтвердил неэффективность способа повышения скорости ОУСГ путем увеличения энерговложения в разряд и увеличения длины ствола.

Фоторазвертка истечения газоплазменных потоков на срезе ствола электротермического ускорителя (рис.12) отображает структуру потока: за фронтом ударной волны движется область с относительно слабым собственным свечением (ОУСГ), за которой следует плазменный поток.

Результаты теневого фотографирования позволили детализировать структуру головной части потока (рис.13). Определено, что однородность ОУСГ нарушается на ее задней границе, где происходит перемешивание с плазменной частью потока. В результате этого формируется переходная область потока, эффективная длина ОУСГ сокращается.

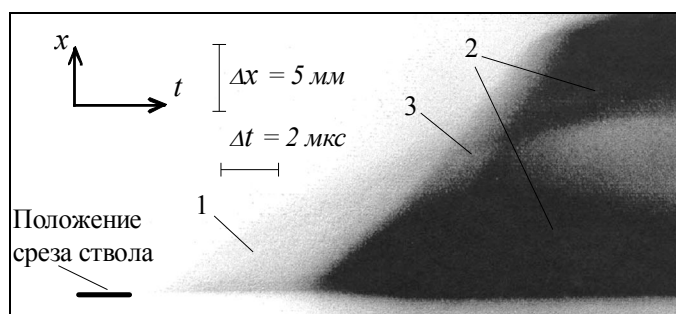


Рис.12. Фоторазвертка потока на срезе ствола ускорителя: 1 – низкотемпературная часть потока, 2 – плазменная часть, 3 – скачок плотности истекающей струи

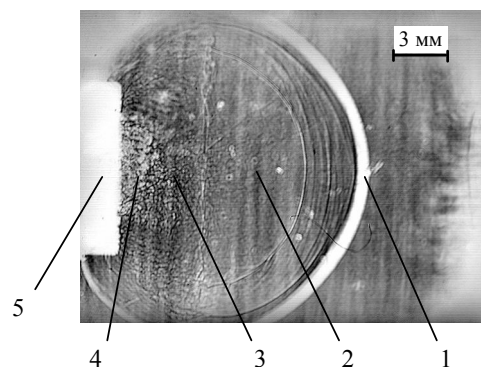


Рис.13. Теневая фотография потока в пространстве за срезом ствола: 1- фронт ударной волны, 2 - ОУСГ, 3- переходная область, 4- плазменная часть потока, 5- ствол.

Теневые исследования потоков в ускорителе с двумя разрядными промежутками позволили визуализировать процессы взаимодействия двух ударных фронтов и образования единого ударно-волнового течения (рис.14).

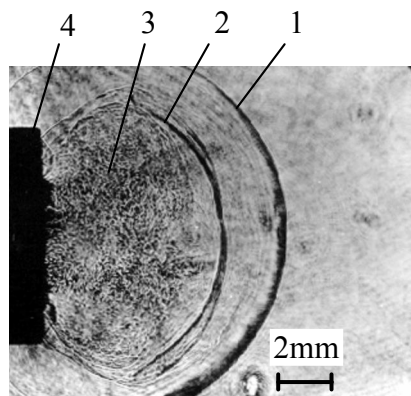


Рис.14. Теневая фотография потоков в двухразрядном ускорителе. 1- первая ударная волна, 2 - вторая первая ударная волна, 3 - плазменная часть потока, 4 - срез ствола

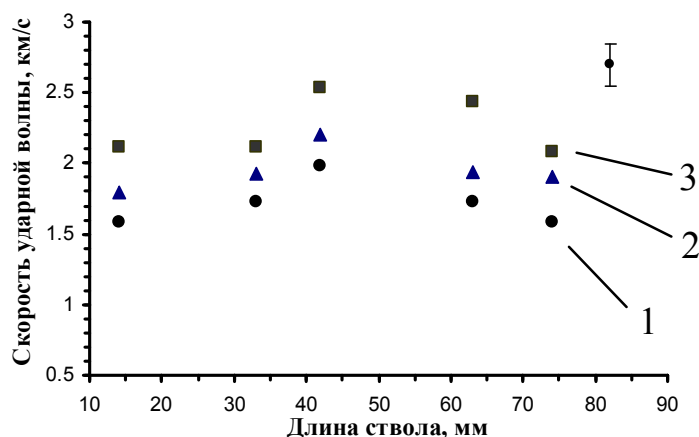


Рис.15. Экспериментальные значения скорости ударной волны в ускорителе с бустерной полостью $D_B=12$ мм, длиной $L_B=50$ мм: 1- $U_C=8$ кВ; 2- $U_C=10$ кВ; 3- $U_C=12$ кВ

В исследованиях динамики потоков в двухразрядных ускорителях выявлен эффект возрастания скорости потока и компрессии ОУСГ после срабатывания второго разрядного промежутка. Величина прироста скорости определяется уровнем энергии, вкладываемой во второй разрядный промежуток, что позволяет увеличить массу газа в ОУСГ, поднять ее скорость и, как результат, увеличить диапазон размеров ускоряемых микрочастиц.

На рис.15 представлены результаты измерения скорости ударной волны в ускорителе с профилированным стволом. Выявлен эффект доускорения головной части потока за счет локального скачка давления в конусном переходе полости ствола. Исследования динамики потоков показали возможность форми-

рования протяженной ОУСГ с сохранением ее высокой скорости, что способствует расширению диапазона размеров и плотности микрочастиц.

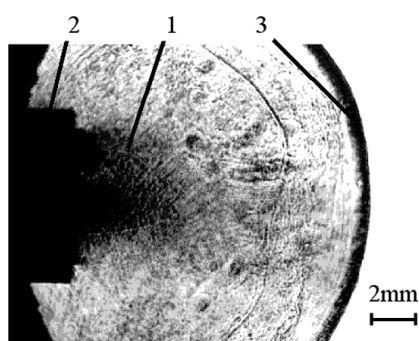


Рис.16. Теневая фотография истечения потока микрочастиц из ствола ускорителя. 1 – поток микрочастиц, 2 – ствол ускорителя, 3 – ударная волна.

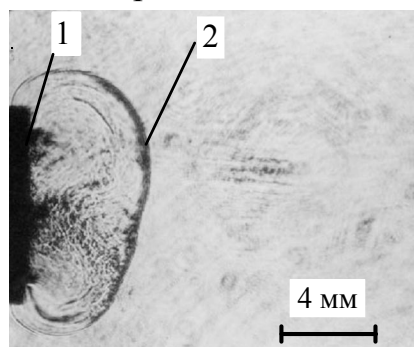


Рис.17. Теневая фотография деформированной головной ударной волны при ускорении неоднородной навески порошка: 1 – срез ствола; 2 – фронт ударной волны.

Исследования динамики ускорения микрочастиц в электротермическом ускорителе проведены на основе лазерного зондирования потоков. Теневая фотография потока микрочастиц в пространстве за срезом ствола приведена на рис.16. Выявлен эффект расслоения сгустка микрочастиц, показано, что при ускорении плотных и неоднородных сгустков микрочастиц происходит снижение скорости потока и деформация фронта ударной волны (рис.17).

Исследования температуры плазменных потоков электротермических ускорителей проведены методом относительных интенсивностей линий излучения с использованием четырех линий атомов меди в видимой части спектра. Значения температур плазменного потока лежат в диапазоне 15–30 кК (рис.18) и зависят от конкретных условий работы ускорителя. Температура потоков растет с увеличением уровня энерговложения в разряд, его удельной мощности.

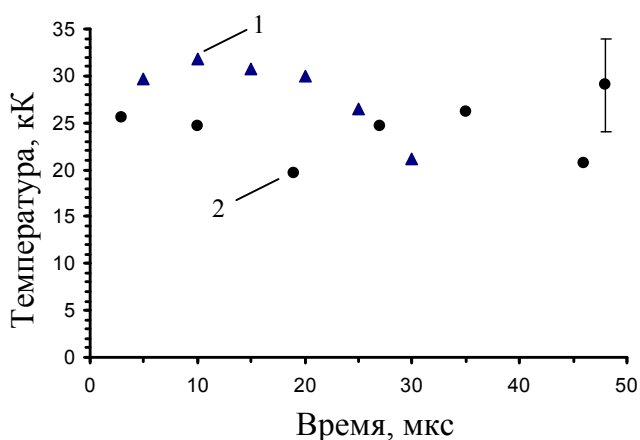
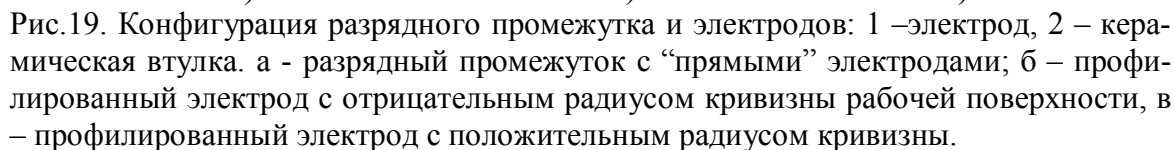


Рис.18. Динамика температуры потока: 1 - одно-разрядный ускоритель; 2 – ускоритель с двумя разрядными промежутками

В четвертой главе обсуждаются результаты исследований электроэрозионных и абляционных процессов элементов разрядного узла электротермического ускорителя, направленных на увеличение его срока службы.

Экспериментальные исследования эрозионных явлений в электродных системах различных конфигураций позволили оптимизировать форму электро-



Конфигурация электродов	Материал электродов	Унос массы электродов за импульс, мг/имп.
Непрофилированные (“прямые”) электроды (рис.19а)	Сталь	1,5
	Латунь	0,85
	ВНЖ	0,54
Электроды с вогнутым профилем (рис.19б)	Сталь	0,18
	Латунь	0,15
	ВНЖ	<0,01
Электроды с выпуклым профилем (рис.19в)	Сталь	0,20
	Латунь	0,22
	ВНЖ	<0,01

Исследования влияния структуры электродных систем на динамические характеристики потоков показали, что профилирование электродной поверхности не нарушает условия формирования высокоскоростных потоков и не снижает их скорости. Этому способствует сохранение геометрии капиллярной части разрядного промежутка, где выделяется основная доля энергии разряда.

Модель теплового излучения плазмы, используемая для анализа абляционных явлений в разрядном промежутке, построена в предположении локального термодинамического равновесия и изобарическом приближении. Основное уравнение модели, описывающее изменение удельной внутренней энергии газа ε , записывается:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = Q^{in} - Q^{rad}(t) - (\varepsilon(t) + p(t)) \frac{v^*(t)}{L(t)}. \quad (3)$$

Здесь Q^{in} – энергия, вкладываемая в единицу времени и единицу объема во вторую область потока, Q^{rad} – энергия радиационного излучения плазмы, p – давление газа, L – координата правой границы плазменной части потока, v^* – скорость в ОУСГ:

$$v^* = \frac{2c_0}{\gamma + 1} \left(M - \frac{1}{M} \right), \quad (4)$$

где M – число Маха, $\gamma=5/3$ – показатель адиабаты одноатомного газа (аргона), c_0 – скорость звука в невозмущенном газе. В модели учитывается двукратная ионизация, а также возбуждение электронных состояний нейтральных атомов и ионов.

Уравнение для изменения внутренней энергии газа дополняется уравнениями, описывающими кинематику потоков газа в канале ускорителя:

$$\frac{dL}{dt} = v^*, \quad \frac{dX_{sw}}{dt} = D_{sw}, \quad (5)$$

где $D_{sw}=Mc_0$ – скорость ударной волны, X_{sw} – координата ударной волны,

$M = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{p(t)}{p_0} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)}$, p_0 – начальное давление газа в канале ускорителя. В си-

лу малых линейных размеров течения плазмы в канале ускорителя, излучение нагретого газа не находится в термодинамическом равновесии с веществом.

Q^{rad} можно представить в следующем виде:

$$Q^{rad} = A_1 T^{1/2} n_e n_1 \left(1 + \frac{|e\tilde{E}_g^{(0)}|}{kT_g} \right) + 4A_1 T^{1/2} n_e n_2 \left(1 + \frac{|e\tilde{E}_g^{(1)}|}{kT} \right), \text{ Вт/м}^3 \quad (6)$$

где $A_1 = 1,42 \cdot 10^{-40}$, $\tilde{E}_g^{(0)}, \tilde{E}_g^{(1)}$ – энергии ионизации с наиболее низких электронно-возбужденных уровней нейтрального атома и первого иона соответственно. Температура в ОУСГ определяется по расчетной скорости ударной волны.

Результаты расчетов динамики радиационных потоков указывают на быстрый рост температуры и плотности потока излучения после инициирования разряда (рис.20). Эти параметры достигают своего максимума в момент окон-

чания поступления энергии в разряд, после чего плотность потока излучения интенсивно падает за времена $\sim 10^{-5}$ с. При характерных значениях токов разряда 50–70 кА плотность теплового потока, падающего на диэлектрические стенки, достигает 10^7 – 10^8 Вт/см².

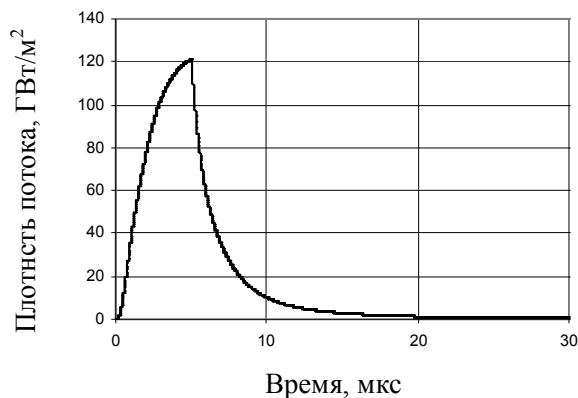


Рис.20. Динамика температуры и плотности потока излучения аргоновой плазмы разряда

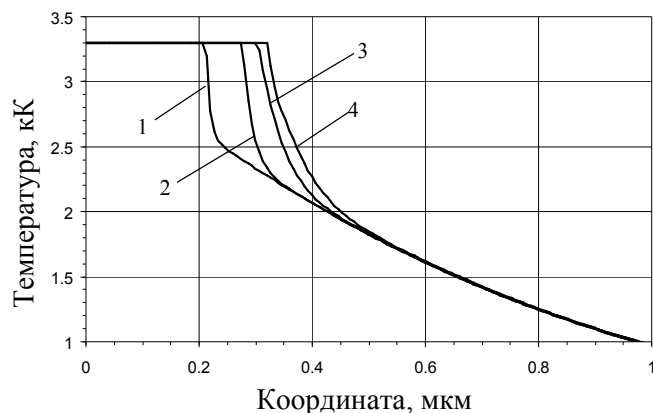


Рис.21. Распределение температуры по толщине корундовой втулки в различные моменты времени после начала разряда: 1 – 5 мкс; 2 – 10 мкс; 3 – 20 мкс; 4 – 30 мкс.

Результаты моделирования теплового излучения плазмы разряда являются исходными данными для анализа распространения теплового потока в диэлектрической стенке разрядного промежутка и динамики абляционных процессов. В физической модели используется одномерное описание нагрева диэлектрических стенок. Распределение температуры в стенке $T_{cm}(x,t)$ определяется на основе одномерного нестационарного уравнения теплопроводности:

$$a^2 \frac{\partial^2 T_{cm}}{\partial x^2} = \frac{\partial T_{cm}}{\partial t}, \quad x \geq 0 \quad t \geq 0 \quad (7)$$

с начальным и граничным условиями:

$$T_{cm}(x,0) = T_0, \quad \frac{\partial T_{cm}}{\partial x}(0,t) = -\frac{q(t)}{k}. \quad (8)$$

Здесь $a = \sqrt{k/c\rho}$, k – коэффициент теплопроводности диэлектрика, c и ρ – его удельная теплоемкость и плотность соответственно, $q(t)$ – плотность нестационарного теплового потока, излучаемого плазмой разряда на границу диэлектрика. Момент времени $t=0$ является моментом «включения» теплового потока.

На рис.21 представлены распределения температуры по толщине керамической (корунд) втулки разрядного промежутка в различные моменты времени для исследованных режимов работы ускорителя.

Применение керамических материалов с достаточно высококачественными теплофизическими характеристиками не позволяет добиться улучшения аб-

ляционной стойкости, так как из-за высокой плотности радиационного потока на поверхности втулок выделяется энергия, достаточная для испарения поверхностных слоев. Экспериментальные исследования показали, что абсолютные значения абляционного уноса массы с поверхности диэлектрических втулок составляют около 1 мг/имп.

С целью увеличения ресурсных параметров керамических изоляторов предложено использовать дополнительную инъекцию микрочастиц порошкового материала непосредственно в разрядный узел ускорителя. Моделирование показало, что в результате энергетических затрат, пошедших на испарение микрочастиц, снижается температура газоразрядной плазмы, уменьшается тепловая нагрузка на стенки промежутка, снижаются абляционные разрушения керамических изоляторов. Одновременно динамические характеристики газоплазменных потоков сохраняются.

В пятой главе исследуются ресурсные характеристики и тепловой режим разрядного узла электротермического ускорителя, рассматриваются вопросы оптимизации его геометрических параметров для адаптации к промышленным условиям эксплуатации.

Экспериментальные исследования показали, что традиционно используемая одноразрядная схема электротермического ускорителя, обладает наименьшим сроком службы. Самопробои разрядного узла возникают после нескольких сотен срабатываний. Основными причинами снижения электропрочности диэлектрических втулок является металлизация поверхности диэлектрических втулок, вызванная оседанием продуктов эрозии электродов и модификация поверхности керамики под воздействием тепловых потоков плазмы разряда.

Наилучшие ресурсные характеристики продемонстрировала двухразрядная схема ускорителя с дополнительным внешним ключом в контуре питания основного разряда. Максимальное число срабатываний разрядного промежутка превысило $6 \cdot 10^3$ импульсов, при этом основным ограничением на ресурс промежутка явился абляционный износ керамических втулок.

Оптимизация геометрических размеров разрядного промежутка и ствола позволяет повысить энергетическую эффективность, снизить эрозионный и абляционный износ элементов разрядного узла. В табл.2. приведены параметры электротермического ускорителя при различных режимах его работы. Здесь U_C – зарядное напряжение емкостного накопителя; W_C – энергия емкостного накопителя; d – внутренний диаметр разрядных промежутков; I_P – амплитуда тока разряда; r – усредненное значение сопротивления плазмы разряда; w_P – плотность

энергии; W_p -энергия, переданная в разряд; η -к.п.д. преобразования энергии в разряд, $\eta = W_p / W_c$; V -скорость ударной волны в заданной координате; T , P - максимальные температура и давление плазменного потока в разрядном промежутке.

Табл.2. Параметры разряда и потоков электротермического ускорителя

№	Исходные данные			Параметры разряда					Параметры потоков		
	U_c , кВ	W_c , Дж	d , мм	I_p , кА	r , мм	w_p , Дж/см ³	W_p , Дж	η , %	V , км/с	T , кК	P , атм
1	12	1728	6	76	50	790	1160	67	3,9	45	1400
2	10	1200	6	61	50	550	810	68	3,3	42	1000
3			4	46	110	1510	980	82	3,8	50	2600
4			3	34	190	2770	1030	85	3,9	55	4300
5	8	768	6	47	50	350	520	68	2,7	35	650
6			4	36	110	950	620	81	3	45	1500
7			3	27	190	1780	660	84	3,1	47	2700
8	6	432	6	31	60	210	310	71	2	28	366
9			4	25	110	520	340	79	2,3	36	920
10			3	19	200	940	350	80	2,4	38	1600
11	10	1200	6-4	46	110	1510	980	82	3	46	2400
12	10	1200	2-4	46	110	1510	980	83	3,8	50	2500

Увеличение давления газа в разрядном промежутке при снижении его диаметра требует принятия специальных мер для обеспечения механической прочности элементов разрядного узла. С этой целью предложено использование секционированных изоляторов. Экспериментально подтверждена устойчивость таких конструкций к воздействиям импульсных давлений разрядной плазмы.

Анализ тепловых процессов в конструкции ускорителя показал, что режим работы установки с частотой повторения импульсов ~ 1 Гц и энерговыделении в разряде около 1 кДж не создает проблем с нагревом элементов разрядного узла при его длительной работе в воздушной среде без принудительного охлаждения. Переход к условиям работы с частотой до 20 – 30 Гц возможен только при использовании систем водяного охлаждения элементов разрядного узла и всего ускорительного тракта.

В шестой главе рассматриваются вопросы, связанные с выбором режимов ускорения порошковых материалов, обсуждаются результаты исследований по нанесению покрытий с помощью электротермического ускорителя.

Анализ параметров системы питания электротермического ускорителя и его рабочих режимов позволил оптимизировать процесс нанесения покрытий. Оптимальная длительность процесса вложения энергии в разрядный промежуток составляет 5–10 мкс, при этом достигаются максимальные значения скорости ОУСГ с заданными параметрами. Плотность энергии, вкладываемой в разрядный промежуток, составляет 1–3 Дж/мм³. Для исследованных режимов максимальный уровень энергии, выделяющейся в разряде, составляет 1–2 кДж.

На основе анализа динамики ускорения и нагрева микрочастиц проведена оптимизация геометрии ствола, конфигурации разрядного узла и параметров системы питания ускорителя для нанесения покрытий порошка карбида вольфрама на кобальтовой связке (WC+Co) с размерами микрочастиц 5–20 мкм. Скорость мелкой фракции (~5 мкм) составила 2,3 км/с, скорость крупной фракции (~20 мкм) ~ 1,2 км/с. При этом условия ускорения порошка WC+Co характеризуются достаточно высокими энергозатратами, что связано с высокой плотностью порошка (16 кг/дм³).

Эксперименты по нанесению покрытий из порошковых материалов проведены на электротермических ускорителях с различными конфигурациями разрядных узлов. Подтверждена гибкость ускорителя в перестройке режимов его работы для реализации различных технологий нанесения покрытий.

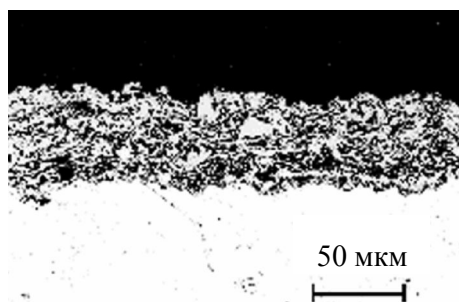


Рис.22. Микрошлиф покрытия композиционного порошка

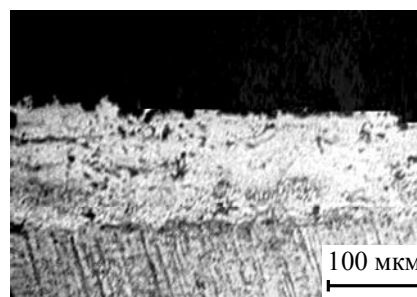


Рис.23. Микрошлиф покрытия из карбида вольфрама на кобальтовой связке

В экспериментах по напылению композиционного порошкового материала (ПН70Ю30) в воздушной среде были получены покрытия с величиной пористости на уровне 5% и адгезией около 30-50 МПа. Исследования микрошлифов (рис.22) указывают на наличие окислов в покрытии, возникающие за счет окисления порошка в процессе его ускорения в воздухе.

Покрyтия порошка карбида вольфрама на кобальтовой связке (WC+Co) наносились с помощью ускорителя с профилированным стволом в защитной среде (аргон). Выявлен эффект повышения однородности и плотности покрытий с ростом уровня энерговложения в разряд и скорости микрочастиц. Микротвердость покрытий для экспериментальных образцов достигает 1270 кг/мм². Фотографии микрошлифов показаны на рис.23.

Покрyтия, полученные с помощью импульсного электротермического ускорителя, обладают характеристиками на уровне покрытий HVOF-установок. Вместе с тем при использовании электротермических ускорителей возможности для улучшения характеристик покрытий далеко не исчерпаны, в частности, возможна оптимизация длины области инъекции микрочастиц, длины ускорения и дистанции напыления, предварительная подготовка и отсев порошкового материала.

В седьмой главе анализируются условия генерации низкотемпературной плазмы газового разряда с целью создания эффективных методов стерилизации и обеззараживания, рассматриваются результаты разработки экспериментального оборудования для исследований импульсно-периодических диффузных разрядов.

Высокая эффективность технологии стерилизации и обеззараживания на основе плазмы газового разряда обусловлена широким спектром агентов стерилизации. В то же время во многих плазменных стерилизаторах обрабатываемые объекты размещаются вне области горения разряда, что снижает стерилизующее влияние заряженных частиц и УФ-излучения. В этих условиях наиболее важную роль приобретают активные продукты плазмохимических реакций.

На основе расчетного моделирования проведен анализ динамики наработки продуктов плазмохимических реакций, и определены параметры системы импульсного электропитания. В основу физической модели положена кинетическая схема разряда в азотно-кислородной смеси, которая описывает широкий спектр реакций и позволяет определять компонентный состав газа в импульсно-периодическом разряде.

Расчеты показали, что при атмосферном давлении воздуха в случае превышения порогового уровня электронной концентрации ($n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в разряде создаются условия для интенсивного развития пространственных неустойчивостей. Показано, что при атмосферных условиях для генерации диффузных разрядов, обладающих объемной структурой и высокой эффективностью наработ-

ки продуктов плазмохимических реакций, требуются импульсы напряжения длительностью 30-50 нс, предельная величина напряженности поля составляет 40-45 кВ/см.

Табл.3. Параметры генераторов наносекундных импульсов

Параметр	Тип генератора			
	ГНИ-40/100	ГНИ-120/50П	ГНИ-120/200	ГНИ-60/1000
Максимальная амплитуда импульса, кВ	40	120	120	60
Длительность фронта импульса, нс (емкость нагрузки, пФ)	50-100	5 (10-20пФ)	5 (10-20пФ)	10 (10-20пФ); 30-50 (0,1-0,15нФ)
Диапазон длительностей импульсов, мкс	0,15 – 0,3	До 0,5	0,03 - 0,1	0,03 - 0,15
Эквивалентная емкость накопителя энергии, нФ	0,4	0,8	0,15	0,2
Максимальный уровень энергонакопления, Дж	0,3	5,7	1,1	0,4
Максимальная частота следования импульсов, Гц	100	50	200	1000

Разработанные генераторы наносекундных импульсов, составляющие основу системы электропитания экспериментальных установок, обеспечивают формирование импульсов напряжения с амплитудой до 120 кВ и частотой повторения до 1 кГц, диапазон длительностей импульсов составляет от 30 нс до 0,5 мкс (табл.3).

Исследования процессов генерации диффузных разрядов проведены с использованием двухэлектродных систем с резко неоднородным распределением электрических полей (острие-плоскость, проволока-плоскость и т.д.) и комбинированных электродных систем с плазменным катодом.

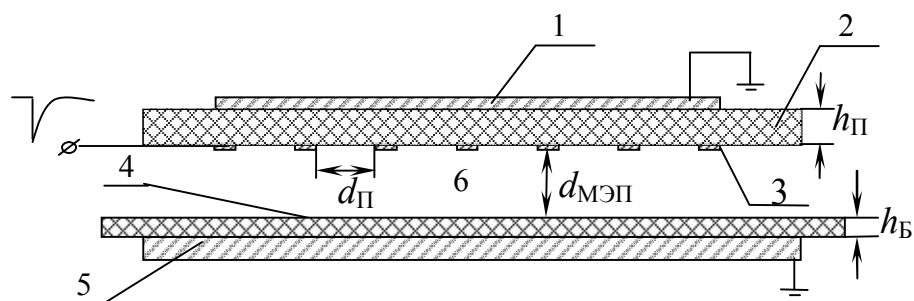


Рис.24. Структурная схема электродной системы для возбуждения двух типов разряда: 1,5 - заземленный электрод; 2 – диэлектрическая пластина высоковольтного электрода; 3 – гребенчатый высоковольтный электрод; 4 – диэлектрическая пластина; 6 – область горения диффузного разряда.

На рис.24 представлена структурная схема комбинированной электродной системы, в которой обеспечиваются условия одновременной генерации поверхностно-барьерного и диффузного разрядов.

Экспериментальные установки оснащены измерительным оборудованием для исследований электрических и спектральных характеристик разрядов (рис.25) измерений концентраций газовых компонент, образующихся в воздухе под воздействием диффузного разряда

В восьмой главе обсуждаются результаты исследований импульсно-периодических диффузных разрядов двухэлектродных системах с резко неоднородным распределением электрического поля.

Исследования диффузных разрядов в условиях низкого вакуума (10-200 Торр) показали, что пространственная структура и электрические характеристики разрядов зависят от многих факторов, особо следует отметить влияние давления газовой среды. При давлениях воздуха менее 30 Торр разряд имеет объемную форму и характеризуется однородным свечением, при более высоких давлениях (более 50-60 Торр) на фоне объемного свечения разряда формируются отдельные диффузные каналы. При увеличении давления свыше 130–150 Торр происходит контракция разряда.

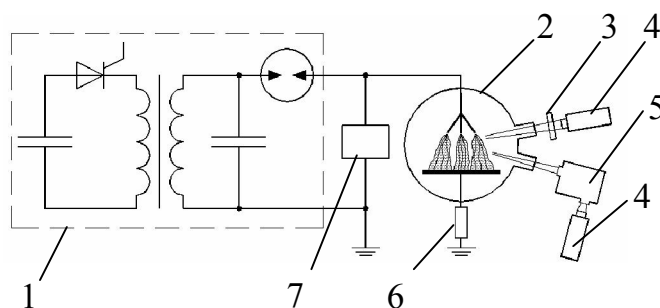


Рис.25. Схема установки и расположение измерительных устройств: 1 – импульсный генератор; 2 – газоразрядная камера; 3 – светофильтры; 4 – ФЭУ; 5 – монохроматор; 6 – токовый шунт; 7 – делитель напряжения.

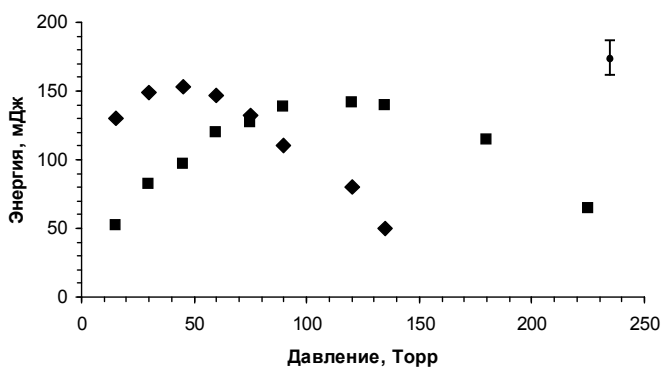


Рис.26. Зависимости амплитуды разрядного тока и энерговложения в разряд: ■ – без диэлектрического барьера; ♦ – с диэлектрическим барьером

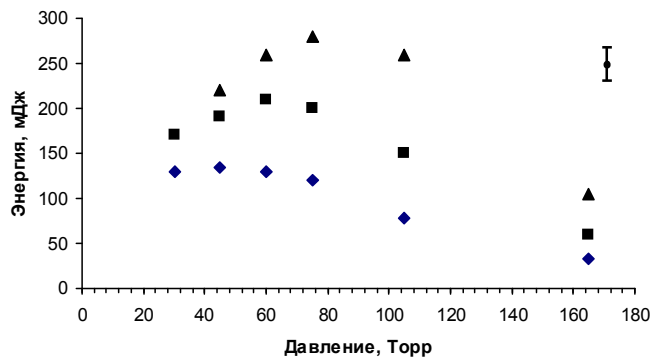


Рис.27. Зависимости энерговложения в разряд от давления при различных напряжениях смещения: ♦ – $U_{CM}=0$ кВ, ■ – $U_{CM}=-5$ кВ, ▲ – $U_{CM}=-10$ кВ.

Показано, что структура разряда изменяется при внесении в межэлектродный промежуток обрабатываемых предметов. Разряд локализуется в области расположения предмета, и диффузные каналы разряда «привязываются» к его

кромкам. Однородность разряда восстанавливается при вводе в межэлектродный зазор диэлектрических барьеров, при этом происходит изменение энергетических параметров разряда (рис.26).

Использование схемы электропитания, включающей в себя импульсный генератор и высоковольтный источник постоянного напряжения смещения, способствует увеличению энерговложения в разряд и расширению диапазона давлений зажигания разряда (рис.27). Одновременно наблюдается улучшение однородности структуры разряда, что происходит под влиянием коронного разряда, возбуждаемого вблизи кромок высоковольтного электрода. Фотографии разрядов, возбуждаемых в межэлектродном промежутке без установки и с установкой диэлектрического барьера, представлены на рис.28.

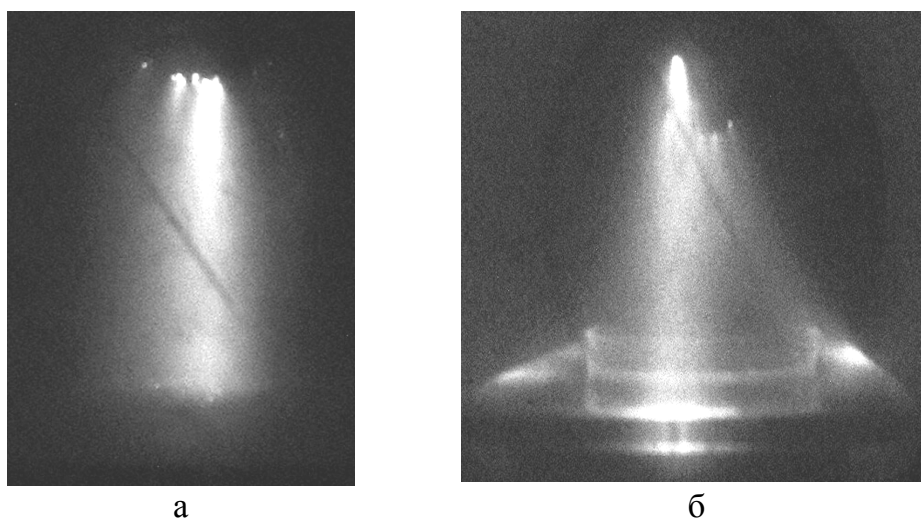


Рис.28. Фотографии диффузных разрядов ($d_{\text{мэп}}=8$ см, $P=40$ Торр): а - свободный межэлектродный промежуток; б - в межэлектродном промежутке установлены диэлектрический барьер и чашка Петри.

Для генерации импульсно-периодических диффузных разрядов при давлениях близких к атмосферному требуется применение систем электропитания, генерирующих импульсы напряжения с амплитудой более 100 кВ, длительностью менее 100 нс и длительностью фронтов 5–10 нс. На рис.29 представлена зависимость вкладываемой в разряд энергии от давления воздуха.

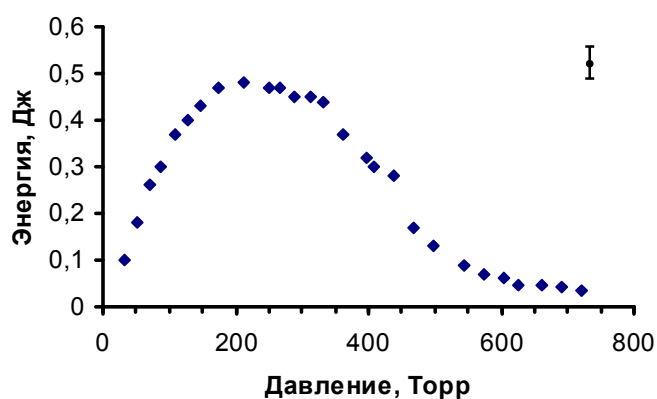


Рис.29. Зависимости амплитуды тока разряда и вкладываемой в разряд энергии от давления воздуха ($d_{\text{мэп}}=8$ см).

В диапазоне длин межэлектродного промежутка 6-8 см разряд локализован вблизи высоковольтного электрода и имеет вид импульсной короны. При длинах промежутков менее 5 см позволяет зажечь диффузный разряд при атмосферном давлении, структура разряда остается неизменной при уменьшении длины межэлектродного промежутка вплоть до 2,5 см. Дальнейшее сближение электродов газоразрядной камеры приводит к контракции разряда.

Эффективный объем диффузного разряда значительно увеличивается при использовании высоковольтного электрода, на котором создана система центров обострения электрического поля с малым радиусом кривизны поверхности (рис.30). На рис.31 приведен спектр излучения диффузного разряда. Основная доля энергии излучения лежит в ближней ультрафиолетовой области спектра (300-400 нм). В спектре четко выделяются полосы излучения молекулярного азота (315 нм, 337 нм, 357 нм).



Рис.30. Внешний вид диффузного разряда с многоострийным катодом

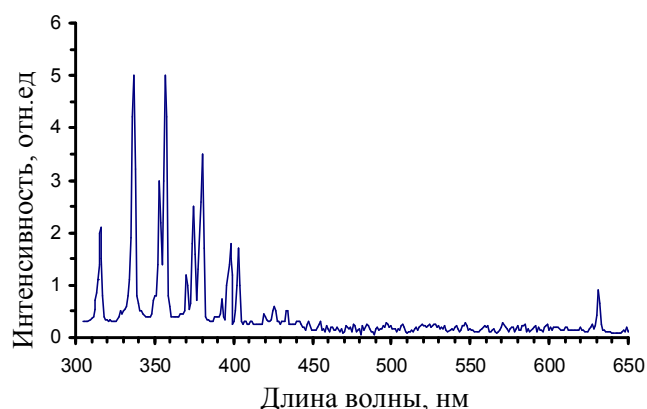


Рис.31. Спектр излучения разряда

Исследования пространственной структуры диффузных разрядов, проведенные с помощью метода автографов, показали, что разряд обладает макро- и микроструктурой (рис.32). Каждый из каналов разряда, перемыкающих межэлектродный промежуток, содержит множество микроканалов, количество которых изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен. Средний диаметр микроканалов составляет несколько десятков микрон.

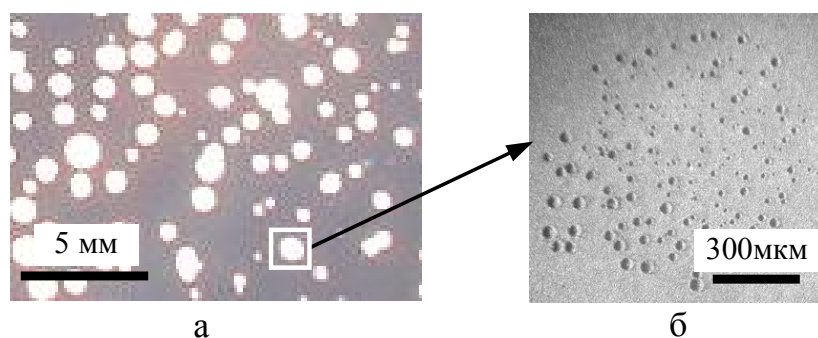


Рис.32. Макроструктура (а) и микроструктура (б) диффузных разрядов.

В девятой главе представлены результаты исследований процессов генерации диффузных разрядов в разрядных узлах с плазменными электродами, в которых реализуются условия одновременного зажигания двух типов разряда: поверхностного барьерного и объемного диффузного разрядов.

Анализ распределения электростатических полей в комбинированных электродных системах выявил критическое влияние геометрических параметров системы на распределение электрических полей, и, как следствие, на условия возбуждения разрядов. Максимальные напряженности поля (400-500 кВ/см) достигаются вблизи полосок высоковольтного электрода (рис.33), при этом по длине разрядного промежутка напряженность поля снижается более чем на порядок величины. На рис.34 представлена структура коаксиальной электродной системы, реализующей условия для возбуждения поверхностного барьерного и диффузного разрядов.

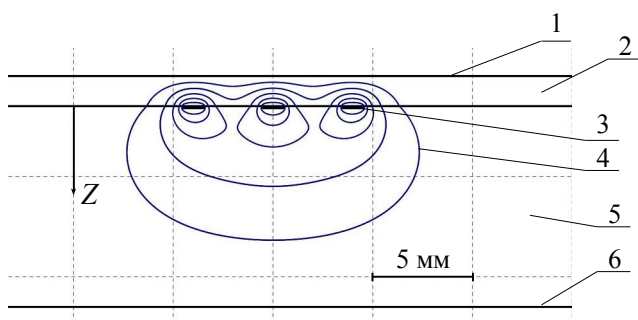


Рис.33. Распределение электростатических полей в комбинированной электродной системе: 1, 6 – заземлённый электрод, 2 – диэлектрическая пластина, 3 – высоковольтный электрод (три фольговые полосы, $U=30$ кВ), 4 – экипотенциальные линии, 5 – газовый промежуток.

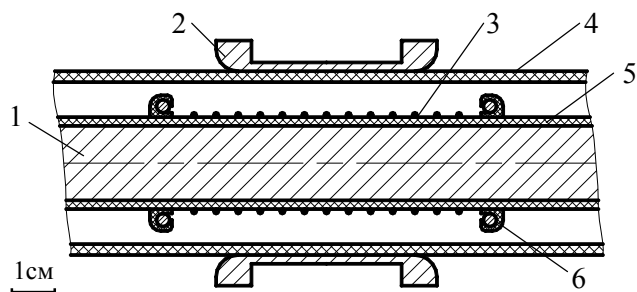


Рис.34. Коаксиальная конфигурация электродной системы: 1,2 – заземленный электрод; 3 – проволочный высоковольтный электрод; 4,5 – кварцевые трубки; 6 – кольцевые экраны высоковольтного электрода

Исследования диффузных разрядов и динамики наработки активных продуктов плазмохимических реакций в системе электродов с плазменным катодом при атмосферных условиях проведены с использованием генераторов ГНИ-120/200 и ГНИ-60/1000 в диапазоне амплитуд импульсов напряжения от 20 до 50 кВ при максимальной частоте следования импульсов 1 кГц.

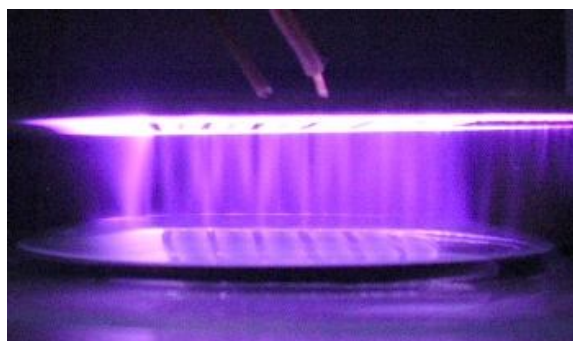


Рис.35. Фотография диффузного разряда при частоте следования импульсов 500 Гц ($d_{мэп}=10$ мм)

Были определены диапазоны частот и длин межэлектродных промежутков, в которых создаются условия горения разряда в объемной фазе (рис.35), усло-

вия перехода разряда к канальной структуре. При повышении частоты следования импульсов (свыше 50-100 Гц) наблюдаются изменения в условиях горения разряда, его структуре, меняются энергетические параметры разряда (рис.36).

Исследования интенсивности плазмохимических процессов, происходящих под воздействием импульсного диффузного разряда, проведены путем измерений концентраций газовых компонент в газоразрядной камере при различных условиях работы установки. На рис.37 представлены результаты измерений концентрации озона, нарабатываемого в коаксиальной конфигурации разрядного узла при различных скоростях продувки воздуха (атмосферные условия).

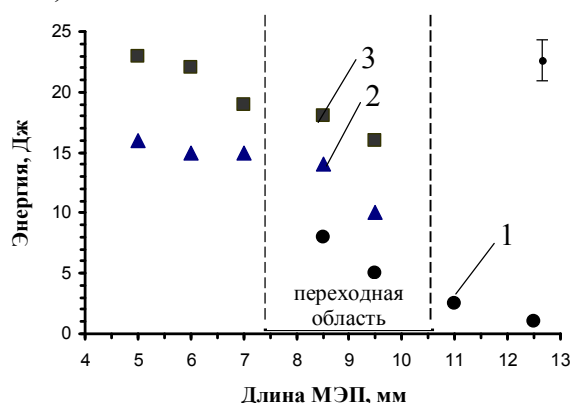


Рис.36. Диаграммы режимов горения разряда: 1 — энергия, вкладываемая в разряд в объемной фазе; 2 — энергия на начальной фазе разряда с токовыми каналами; 3 — полная энергия

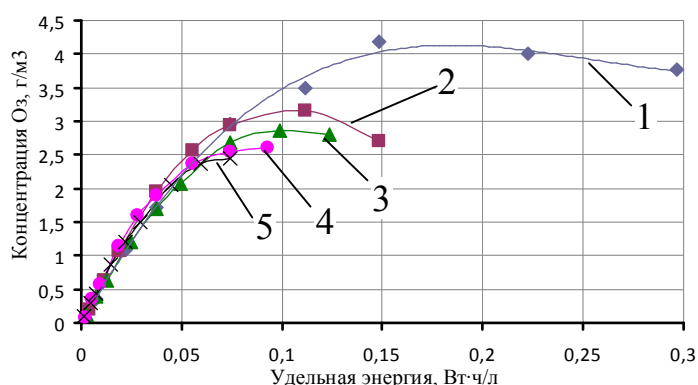


Рис.37. Зависимость концентрации O_3 в коаксиальном разрядном узле от удельной энергии разряда при различной скорости продувки воздуха: 1 - 1л/мин; 2 - 2л/мин; 3 - 3л/мин; 4 - 4л/мин; 5 - 5л/мин.

Наиболее перспективной для технологических применений выглядит структура разряда с диффузными токовыми каналами. В этом режиме на фоне возрастающего энерговложения в разряд увеличивается эффективность наработки продуктов плазмохимических реакций. Каналы разряда при этом сохраняют диффузную структуру и обладают свойствами низкотемпературного плазменного образования, что снижает эрозию электродной системы и увеличивает ресурс работы установки.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

1. Детальный анализ динамики потоков и ускорения микрочастиц на основе физических моделей электротермического ускорителя показал, что ускорение микрочастиц порошковых материалов до высоких скоростей при сохранении контроля режима их нагрева может быть проведено в области ударно-сжатого газа (ОУСГ) импульсного газоплазменного потока. Определены параметры ОУСГ, обеспечивающие заданный температурный режим ускорения, при кото-

ром скорость микрочастиц на момент их полного проплавления достигает 75–95% по отношению к скорости потока.

2. Предложены новые способы формирования ОУСГ в электротермическом ускорителе, основанные на использовании мультиразрядных схем разрядных узлов и профилированной геометрии стволов. Определены условия формирования ОУСГ с параметрами, позволяющими ускорять микрочастицы с размерами 5-50 мкм и плотностью их материала до $16 \cdot 10^3$ кг/м³ до скоростей 1,5-2 км/с.

3. Проведено исследование процессов ускорения сгустка микрочастиц, локализованного в начальный момент времени в области с конечными размерами вдоль ствола и обладающего неоднородным гранулометрическим составом порошкового материала. Показано, что в процессе ускорения происходит расслоение сгустка, для рассмотренных условий зафиксирован двукратный разброс скоростей микрочастиц. При массе сгустка более 30 мг наблюдаются снижение скорости и деформации фронта ударной волны.

4. Проведены моделирование и экспериментальное исследование абляционных процессов диэлектрических втулок разрядного узла под действием радиационных потоков плазмы импульсного разряда. Для исследованных режимов плотность тепловых потоков достигает 10^7 - 10^8 Вт/см², интегральная масса аблирующего материала изоляторов составляет около 1 мг/имп. Для уменьшения абляционного износа предложено использовать эффект теплового барьера, возникающего при инъекции в область разряда дополнительной порции микрочастиц.

5. Дан анализ газодинамических процессов в пространстве за срезом ствола электротермического ускорителя. Выявлены эффекты, оказывающие определяющее влияние на скорость, температуру микрочастиц и, как результат, качество формируемых покрытий. Установлено, что соответствующий выбор дистанции нанесения позволяет избежать потерь скорости микрочастиц и сохранить их температурное состояние.

6. Созданы экспериментальные образцы электротермических ускорителей, позволяющие проводить целенаправленные исследования процессов формирования потоков и ускорения микрочастиц порошковых материалов. Разработаны методики и проведены эксперименты по визуализации структуры, исследованию характеристик газоплазменных потоков, динамики сгустка микрочастиц. Экспериментально подтверждена возможность перестройки режимов работы ускорителя для реализации различных условий нанесения покрытий.

7. Проведены исследования ресурсных характеристик и теплового режима разрядного узла электротермического ускорителя. Предложены конструктивные и

схемотехнические решения для оптимизации параметров установки с целью адаптации к промышленным условиям эксплуатации. Наилучшими ресурсными характеристиками обладает двухразрядная схема ускорителя с внешним коммутатором, показавшая стабильную работу до $6 \cdot 10^3$ импульсов

8. Проведен анализ режимов генерации газовых диффузных разрядов для эффективной наработки активных продуктов плазмохимических реакций. Определены параметры систем импульсного электропитания для зажигания диффузных разрядов с объемной структурой в атмосферных условиях. Оптимальная длительность импульсов напряжения составляет 30-50 нс, предельная напряженность поля в межэлектродном промежутке – 40-45 кВ/см.

9. Созданы экспериментальные установки для исследований процессов генерации импульсно-периодических диффузных разрядов в электродных системах различных конфигураций при длине межэлектродных промежутков до 15 см в диапазоне давлений 10–760 Торр. Системы импульсного электропитания построены на основе генераторов наносекундных импульсов, обеспечивающих формирование импульсов напряжения с амплитудой до 120 кВ и частотой повторения до 1 кГц.

10. Проведены исследования импульсно-периодических диффузных разрядов в двухэлектродных системах с резко неоднородным распределением электрических полей. Экспериментально показано, что разряд обладает макро- и микроструктурой, определены факторы, способствующие улучшению однородности разряда. Стабильные условия генерации диффузных разрядов атмосферного давления в промежутках длиной 2-6 см обеспечиваются при амплитудах импульсов напряжения более 100 кВ и длительности фронтов менее 10 нс.

11. Проведены исследования диффузных разрядов в воздухе атмосферного давления при использовании электродных систем с плазменным катодом, формируемым с помощью диэлектрического барьерного разряда. Определены условия горения диффузного разряда в объемной фазе в промежутках длиной 0,5-4 см при амплитудах импульсов напряжения 20-50 кВ и частоте следования до 1 кГц. Показана высокая эффективность наработки активных продуктов плазмохимических реакций в режиме объемного горения диффузных разрядов.

Основные публикации по теме диссертации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

1. Maslennikov S.P., Chebotarev A.V., Shcolnikov E.Ya. et al. Flow dynamics and microparticles acceleration in the electrothermal launcher. IEEE Transactions on Magnetics, v.35, №1, Jan. 1999, pp.240-244.

2. Масленников С.П., Гузеев М.Ю., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Ускорение микрочастиц в электротермическом ускорителе с мультиразрядной схемой разрядного узла. ПТЭ, №6, 2000г., с.130-135.
3. Maslennikov S.P., Guzeev M.Y., Shcolnikov E.Ya. et al. Acceleration of Micro-particles in Electrothermal Launcher with Multigap Scheme of Discharge Unit. IEEE Transactions on Magnetism, January 2001, vol.37, №1, 2001, pp.188-193.
4. Maslennikov S.P., Netchaev N.N., Shcolnikov E.Ya. et al. Electrothermal Technology of Coating. IEEE Transactions on Magnetism, vol.39, №1, January 2003, pp.314-318.
5. Масленников С.П., Лай Г.Ю., Петров Д.В., Школьников Э.Я. Экспериментальные исследования по возбуждению импульсно-периодических диффузных газовых разрядов. Инженерная физика, №3, 2004, с.20-23.
6. Масленников С.П., Лай Г.Ю., Школьников Э.Я. Экспериментальный комплекс для исследования возбуждения импульсно-периодического диффузного разряда с целью стерилизации медицинского инструментария. ПТЭ, №4, 2004, с.109-113.
7. Масленников С.П., Суханова Л.А, Школьников Э.Я. Исследование электроэрозионных процессов в разрядном узле электротермической установки по нанесению покрытий. Инженерная физика, №1, 2005, с.20-24.
8. Масленников С.П., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Динамика газоплазменных потоков, ускорения и нагрева микрочастиц в импульсном электротермическом ускорителе. Инженерная физика, №2, 2007, с.26-31.
9. Масленников С.П., Морозов А.В., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Исследования импульсных диффузных разрядов атмосферного давления в электродных системах с резконеоднородным распределением электрических полей. Инженерная физика, №3, 2009, с.14-18.
10. Масленников С.П., Чеботарёв А.В., Школьников Э.Я. Тепловое изучение плазмы в разрядном промежутке импульсного электротермического ускорителя. Инженерная физика, №3, 2009, с.19-22.
11. Масленников С.П., Крастелев Е.Г., Школьников Э.Я. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов для возбуждения диффузных газовых разрядов при атмосферном давлении. ПТЭ, №5, 2009, с.98-101.

Авторские свидетельства и патенты.

12. Масленников С.П., Школьников Э.Я. Патент РФ «Устройство для электроимпульсного нанесения покрытий» №2216411, зарег. 20.11.2003г., Бюл. №32.

Статьи в журналах и сборниках.

13. Maslennikov S.P., Shcolnikov E.Ya. et al. "Electrothermal acceleration of microparticles". Proceedings of 6 European Symposium on electromagnetic launch technology. Hague, 1997, pp. 261-268.
14. Maslennikov S.P., Shcolnikov E.Ya. et al. "High velocity flow generation and microparticles acceleration by means of high current pulse discharge." Proceedings of 11th IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimore, Maryland, 1997, p.1162-1167.
15. Maslennikov S.P., Shcolnikov E.Ya. et al. Flow Dynamics in Pulse Electrothermal Launcher with Multigap Scheme of Discharge Unit. Proceedings of 12-th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, California USA. June 1999, pp.688-691.
16. Масленников С.П., Школьников Э.Я. и др. Установки для нанесения покрытий на основе импульсного электротермического ускорителя. Научная сессия МИФИ-2001. Сб. научных трудов в 14 томах. Т.9, М: МИФИ, 2001, с.30-31.
17. Гузеев М.Ю., Масленников С.П., Школьников Э.Я. Динамика импульсных газоплазменных потоков и высокоскоростное ускорение микрочастиц в электротермическом ускорителе. Материалы международной конференции «Экстремальное состояние вещества: детонация, ударные волны». 2001г. г.Саров, с.160-161.
18. Гаркуша О.В., Масленников С.П., Новожилов А.Е., Школьников Э.Я. Исследование импульсно-периодического диффузного разряда для целей стерилизации медицинского инструментария. Научная сессия МИФИ-2002. Сб. научных трудов в 14т., т.8, М: МИФИ, 2002г., с.25-26.
19. Масленников С.П., Суханова Л.А., Школьников Э.Я. Электроэрозионные процессы в электротермической установке по нанесению покрытий из порошковых материалов. Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов в 14т., т.8, М: МИФИ, 2003г., с.54-55.
20. Лай Г., Масленников С.П., Школьников Э.Я. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения для исследования диффузных разрядов. Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов в 14т., т.8, М.: МИФИ, 2003г., с.62-63.
21. Maslennikov S.P., Shcolnikov E.Ya. et al. Stimulation of pulsed-periodical diffuse discharge to be used for medical instrumentation sterilisation. Proceedings of 14-th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas Texas USA. June 2003, pp.1120-1123.

22. Масленников С.П., Суханова Л.А., Школьников Э.Я. Абляционные процессы в разрядном узле электротермического ускорителя. Научная сессия МИФИ-2004. Сб. научных трудов в 14т., т.8, М.: МИФИ, 2004г, с.18-19
23. Масленников С.П., Суханова Л.А., Школьников Э.Я. Ресурсные испытания экспериментальных макетов установки по нанесению покрытий из порошковых материалов. Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научных трудов в 15т., т.8, М.: МИФИ, 2005г., с.53-54
24. Масленников С.П., Суханова Л.А., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Изобарическая модель импульсных потоков в электротермическом ускорителе с рабочим газом – аргоном. Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научных трудов в 15т., т.8, М.: МИФИ, 2005г., с.51-52
25. Chebotarev A.V., Maslennikov S.P., Shcolnikov E.Ya. et al. Atmospheric pulsed diffuse discharge in highly non-uniform fields to be used for sterilization and decontamination. Proceedings of 15-th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas Texas USA. June 2005, pp.1421-1424.
26. Shcolnikov E.Ya., Maslennikov S.P., Sukhanova L.A., Shatilov D.Yu. Research directed for development of coating electrothermal technology. Proceedings of 15-th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas Texas USA. June 2005, pp.226-229.
27. Масленников С.П., Суханова Л.А., Шатилов Д.Ю., Школьников Э.Я. Оптимизация геометрических параметров разрядного промежутка электротермического ускорителя микрочастиц. Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов в 16т., т.8, М.: МИФИ, 2006г., с.53-54.
28. Масленников С.П., Петров Д.В., Школьников Э.Я. Разработка газоразрядной технологии для стерилизации и обеззараживания загрязненной среды. Материалы межд. конференции «Профилактика, диагностика и лечение инфекционных болезней, общих для людей и животных». Ульяновск 2006г., с.469-471.
29. Shcolnikov E.Ya., Maslennikov S.P., Netchaev N.N. Development of works on electrothermal technology of coating. Proceedings of 1-st EAPPC, China, 2006 pp.121-126
30. Масленников С.П., Шатилов Д.Ю., Школьников Э.Я. Динамика нагрева элементов конструкции импульсного электротермического ускорителя микрочастиц. Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов в 17т., т.8, М.: МИФИ, 2007г., с.166-167.
31. Демин А.В., Масленников С.П., Цымбал А.А. и др. Влияние микрочастиц теплового барьера на износ стенок разрядного узла электротермического ус-

корителя. Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов в 15т., т.5, М.: МИФИ, 2008г., с.128-129.

32. Крастелев Е.Г., Масленников С.П., Морозов А.В. и др. Исследования импульсных диффузных разрядов атмосферного давления. Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов в 15т., т.5, М.: МИФИ, 2008г., с.130-132.