



**Дудник Юлия Дмитриевна**

**ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЛАЗМОТРОНЫ ДЛЯ РАБОТЫ НА  
ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ  
ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (ИЭЭ РАН)

**Научный руководитель:** **Сафронов Алексей Анатольевич**  
доктор технических наук, член-корреспондент  
РАН

**Официальные оппоненты:** **Гончаров Вадим Дмитриевич**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

**Поняев Сергей Александрович**  
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (АО НИИЭФА),**  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «06» февраля 2026 г., в 15:00 часов на заседании диссертационного совета У.1.3.13.10 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 27, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте [www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-ofcandidate-of-sciences/](http://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-ofcandidate-of-sciences/).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.1.3.13.10

кандидат технических наук



Магазинов Сергей Геннадьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Плазменные технологии нашли широкое применение в различных областях, включая металлургию, машиностроение, энергетику, медицину, экологию и др. Среди перспективных направлений выделяются пиролиз природного газа; получение водорода из углеводородного сырья; переработка бытовых отходов; получение порошкообразных материалов, имеющих уникальные свойства. Мелкодисперсные металлические порошки пользуются большим спросом и применяются в различных высокотехнологичных секторах экономики.

Применение плазмохимических методов для синтеза порошков металлов имеют ряд преимуществ перед традиционными методами – обеспечивает высокую чистоту с минимальным содержанием примесей, позволяет синтезировать ультрадисперсные и мелкодисперсные порошки, снижает энергозатраты, предотвращает нежелательный рост размера зерен, позволяет синтезировать как карбиды (SiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, WC, TiC, VC), так и оксиды (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO), нитриды и сложные композиты. Следовательно, для реализации этих методов необходима разработка устройств, способных генерировать плазму – плазмотронов. Достоинством плазмотронов является обеспечение высокой скорости нагрева плазмообразующего газа и энтальпии потока плазмы, что может быть востребовано в такого рода процессах. Интенсификация химических реакций в газовой среде способна обеспечить уменьшение объема реакционной зоны и габаритов технологического оборудования, одновременно снижая расходы на его изготовление. Выбор газовой среды зависит от особенностей конкретного процесса: окислительные среды применяют для синтеза оксидов металлов, восстановительные – для получения карбидных порошков, в том числе тугоплавких.

Несмотря на распространенность плазмотронов постоянного тока, они имеют существенные ограничения и недостатки, обусловленные высокими эксплуатационными расходами, ввиду наличия сложных систем, например, магнитной стабилизации дуги, и необходимостью создания специальных источников постоянного тока. В то время как плазмотроны переменного тока, способны эффективно

работать, используя стандартное силовое оборудование, а благодаря их конструктивным особенностям различные подходы к проведению технологического процесса могут быть достаточно легко реализованы в рамках одной установки.

Следовательно, особое значение приобретает задача разработки и исследования плазмотронов переменного тока, использующих электродные системы различных типов, способных работать, как на окислительных, так и на восстановительных (углеводородных) газовых средах.

### **Степень разработанности темы исследования**

Различным аспектам решения задач исследования плазмы электрической дуги и разработки плазмотронов посвящены работы Б.Е. Патона, Н.Н. Рыкалина, К.В. Васильева, В.С. Клубникина, Н.А. Соснина, В.Я. Фролова, А.С. Аньшакова, В.С. Чередниченко и др.

Наибольший вклад в развитие электродуговой плазменной техники был внесен М.Ф. Жуковым, под его руководством сформировалась авторитетная научная школа на базе Института магнитогидродинамики Сибирского отделения АН СССР, занимавшаяся изучением свойств плазмы и разработкой теории, сопровождавшейся проведением экспериментов по созданию плазмотронов. Примерно в это же время во ВНИИ Электромаш в Ленинграде под руководством Ф.Г. Рутберга начались исследования и создание плазмотронов переменного тока.

Значительный вклад в моделирование плазменных процессов внесли С.В. Дресвин, О.П. Солоненко и др. Среди иностранных ученых значительный вклад в изучение и разработку генераторов плазмы и технологий на их основе был внесен М. I. Boulos, P. L. Fauchais, E. Pfender и др.

**Объектом исследования** являются однофазные электродуговые плазмотроны переменного тока, предназначенные для использования в электрофизических установках плазмохимического синтеза порошковых материалов.

**Предметом исследования** являются физические процессы в электродуговых камерах плазмотронов.

**Целью диссертационной работы** является разработка, создание и исследование однофазных электродуговых плазмотронов переменного тока в диапазоне

мощности 1–10 кВт для работы на окислительных и углеводородных средах в составе электрофизических установок.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать и создать однофазные электродуговые плазмотроны переменного тока с электродными системами кольцевого и стержневого типов в диапазоне мощности 1–10 кВт, способных работать на окислительных и углеводородных газовых смесях.

2. Провести исследование влияния ключевых параметров на рабочие режимы плазмотронов для выявления оптимальных условий стабильной эксплуатации и установить диапазоны устойчивой работы. Выполнить численные расчеты зависимости напряжения зажигания от величины межэлектродного зазора для обеспечения гарантированного запуска плазмотрона.

3. Провести исследование режимов горения электрической дуги в углеводородных и окислительных газовых средах в электродуговых камерах плазмотронов при атмосферном давлении.

4. Разработать и создать экспериментальные электрофизические установки по плазмохимическому синтезу порошковых материалов на базе разработанных плазмотронов. Выполнить экспериментальные исследования по плазмохимическому синтезу порошковых материалов, провести анализ состава и свойств полученных продуктов.

### **Научная новизна**

Разработан и создан новый тип однофазного электродугового плазмотрона переменного тока двухкорпусного и однокорпусного исполнения со стержневыми электродами, имеющий технологическую возможность использования электродуговой камеры в качестве плазмохимического реактора, способный работать на углеводородных газах (метане  $\text{CH}_4$ ), водороде  $\text{H}_2$ , и их смесях при массовом расходе 0,006–0,11 г/с без использования балластных газов, мощностью до 10 кВт.

Впервые получен диффузно-шнуровой (переходный) режим разряда в камере плазмотрона двухкорпусного исполнения при расходе плазмообразующего газа

– водорода  $H_2$  в диапазоне 0,06–0,08 г/с и смеси метана и водорода  $CH_4:H_2$  в соотношении 1:6, 1:4, 1:10.

Экспериментально реализован плазмохимический метод получения оксидных порошковых материалов из водных растворов их солей. В результате разложения водного раствора нитрата железа (III) с использованием термической электродуговой плазмы получен кристаллический однофазный оксид железа (III)  $\alpha-Fe_2O_3$ , определен его состав и размер частиц, который составил  $(57 \pm 6)$  нм.

Экспериментально реализован плазмохимический метод получения карбидных порошковых материалов на базе плазмотрона однокорпусного исполнения со стержневыми электродами, работающим на углеводородных газах при расходе до 0,1 г/с, в результате получен порошок карбида вольфрама с установленным размером частиц 5–20 мкм.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в разработке численной модели расчета напряжений пробоя, позволяющей определить оптимальное значение межэлектродного расстояния для обеспечения гарантированного инициирования разряда в плазмотроне, что способствует повышению надежности и эффективности работы устройства.

Практическая значимость состоит в разработке и создании однофазных электродуговых плазмотронов переменного тока с кольцевыми и стержневыми электродами мощностью до 10 кВт, работающих в окислительных средах, на углеводородных газах, водороде в широком диапазоне расходов без использования балластных газов. Особенностью конструктивного исполнения двухкорпусного и однокорпусного плазмотронов является технологическая возможность использования электродуговой камеры как плазмохимического реактора. Определение факторов, влияющих на возникновение диффузно-шнурового и диффузного режимов, которые обеспечивает более высокую мощность и КПД устройства создает предпосылки для дальнейшего развития эффективных решений по увеличению производительности и масштабируемости плазменных установок.

Полученные в ходе исследования результаты возможно использовать для получения ультрадисперсных оксидных и карбидных материалов, применяемых в

качестве компонента для производства абразивов, инструментов металлообрабатывающей промышленности, деталей повышенной твердости и прочности, красителей, устройств магнитной записи, катализаторов дегидрирования и производства аммиака и др.

### **Методология и методы исследований**

Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, в качестве инструмента исследований и проверки достоверности полученных теоретических результатов и аналитических соотношений использовалась современная приборная база и оригинальные расчетные алгоритмы. Измерения электрических и расходных параметров производились посредством специального программного обеспечения, используя аппаратно-программный измерительный комплекс. Форма и вид дугового разряда определялись оптическими методами с помощью фотосъемки и скоростной видеосъемки. Исследование физико-химических свойств полученных порошковых материалов производилось методами рентгенофазовой дифрактометрии для проведения анализа фазового и гранулометрического состава продуктов и сканирующей электронной микроскопии для определения элементного состава и морфологии.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработка и создание однофазного электродугового плазмотрона переменного тока с кольцевыми электродами, работающего на окислительных средах (воздухе) с расходом газа 1–3,5 г/с в диапазоне мощности 3–5,5 кВт. Разработка и создание однофазного электродугового плазмотрона переменного тока со стержневыми электродами, работающего на углеводородных газах (метан  $\text{CH}_4$ ), водороде  $\text{H}_2$  и их смесях, регулируемых в пределах 0,006–0,04 г/с в диапазоне мощности 1–3 кВт. Разработка и создание однофазного электродугового плазмотрона переменного тока двухкорпусного исполнения со стержневыми электродами, работающего на углеводородных газах (метан  $\text{CH}_4$ ), водороде  $\text{H}_2$  и их смесях, регулируемых в пределах 0,06–0,11 г/с в диапазоне мощности 6–10 кВт.

2. Результаты исследования оптимальных режимов работы электродуговых плазмотронов переменного тока с электродными системами кольцевого и стержневого типа.

3. Результаты исследования режимов горения электрической дуги в электродуговой камере плазмотрона в газовых смесях метан-водорода  $\text{CH}_4+\text{H}_2$  и водорода  $\text{H}_2$ .

4. Результаты получения методом плазмохимического синтеза порошков однофазного оксида железа (III)  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и порошков карбида вольфрама  $\text{WC}$ .

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов основана на значительном объеме накопленных данных, их воспроизводимости. Решение поставленных задач основано на экспериментальных данных и известных теоретических положениях в области плазменной техники и теплофизики, разработанных научной школой академика Ф.Г. Рутберга. Полученные расчетные данные получены на специализированном программном обеспечении, учитывающем фундаментальные законы термодинамики и газодинамики, а также включающего интегрированную базу данных физико-химических характеристик веществ. Полученные результаты не противоречат теоретическим и практическим положениям, известным из научных публикаций отечественных и зарубежных исследователей в рассматриваемой предметной области.

### **Личный вклад автора**

Представленные в работе конструктивные решения электродуговых плазмотронов переменного тока с электродными системами различного типа, нашедших применение в плазмохимических установках по получению порошковых материалов разработаны автором лично. Автор принимала непосредственное участие в постановке задач исследований, выборе методик расчетов теоретических параметров, разработке плана экспериментальных исследований, сборе полученных материалов. Проводила обработку и анализ полученных результатов экспериментальных исследований. Основные результаты работы получены автором лично.

### **Реализация результатов работы**

Результаты работы, изложенные в диссертации, созданные автором конструкции электродуговых плазмотронов и плазмохимические установки на их основе нашли свое практическое применение в рамках работ по государственному заданию Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Электрофизики и Электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН). Результаты проведенных

исследований послужили основой для проектирования новых моделей электродуговых плазмотронов и плазмохимических установок.

Проект по теме работы «Плазменный метод производства ультрадисперсных порошков на основе плазмотрона переменного тока для промышленных целей» стал победителем конкурса грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2023 году.

### **Апробация работы и научные публикации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 14-й международной конференции «Пленки и покрытия» (2019); всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (2020); XLIX, L Международной звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2022, 2023); XVIII международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (2023); Международной конференции «Физика.СПб» (2024).

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, 7 из которых в рецензируемых журналах из Перечня ВАК по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

**Работа соответствует паспорту научной специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки:** п. 7 Разработка новых технологических процессов и устройств с использованием электроразрядных, пучковых, плазменных, фотоэлектронных и электромагнитных, в том числе лазерных методов и подходов; п. 9 Разработка технологий экологической и электромагнитной совместимости электрофизических установок с биологическими, физическими, химическими и информационными объектами и устройствами.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка использованной литературы, включающего 128 наименований, приложений. Диссертация изложена на 147 страницах, содержит 69 рисунков, 6 таблиц, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, степень разработанности проблемы, указывается цель и ставятся задачи, которые необходимо решить для ее выполнения, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, отмечены апробация результатов и степень их достоверности.

**В первой главе** определены основные критерии классификации электродуговых плазмотронов включающие тип тока, метод стабилизации дуги, материал электродов, тип плазмообразующего газа, режим работы и др. Рассмотрены основные конструктивные особенности электродуговых плазмотронов и схематические решения для электродуговых плазмотронов постоянного и переменного тока с окислительными (воздух), инертными (аргон) и восстановительными (метан, пропан-бутан, водород) газовыми смесями в качестве рабочих сред. Приведены основные области применения электродуговых плазмотронов, спектр их внедрения в плазменные технологии охватывает значительный ряд плазмохимических приложений, включающих в себя переработку отходов, пластмасс и жидких топлив, нанесение покрытий, сфероидизацию, получение углеродных структур и новых порошковых материалов, аддитивные технологии, использование в сельском хозяйстве и медицине и др. В частности, для ряда технологических процессов требуется отсутствие балластных газов в процессе, что создает необходимость создания новых типов устройств, способных стационарно работать в течение продолжительного времени и позволяющие в широком диапазоне регулировать теплосодержание рабочего газа, обеспечить высокую эффективность передачи энергии. В заключении главы сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** приведено описание конструкций разработанных плазмотронов переменного тока, имеющих электродные системы кольцевого и стержневого типа. Плазмотрон с кольцевыми электродами (ПКЭ), работающий на окислительных средах – воздухе, также способен работать на инертном газе – аргоне, разработан в двух основных модификациях П-025 и П-038 (рисунок 1).

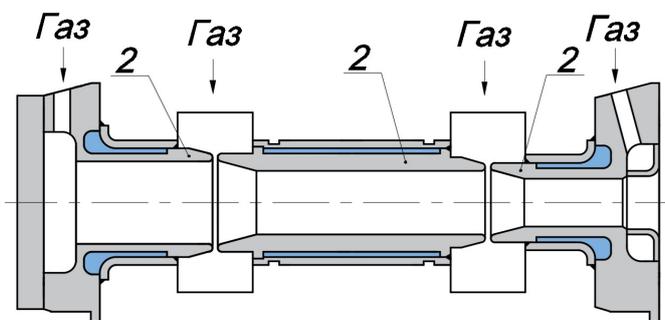


Рисунок 1 – Плазматрон с кольцевыми электродами ПКЭ модификации П-025

Плазматрон ПКЭ модификации П-025 схож с модификацией П-038, состоит из расположенных последовательно трех кольцевых электродов (2), выполненных из меди (марки М1, М2) и выходного сопла. Модификации П-025 и П-038 имеют электроды с радиусом скругления в зоне пробоя величиной 1,5 и 4,5 мм соответственно с варьируемой длиной промежуточного электрода 100–200 мм. Вокруг электродов монтируются обечайки для формирования рубашки охлаждения. Межэлектродные зазоры являются регулируемыми и могут лежать в диапазоне от 0,5 мм до 3 мм.

Работа плазматрона основана на следующем принципе: при подаче высокого напряжения 6 кВ на начальный и конечный электрод возникает электрический пробой двух воздушных промежутков, находящихся в межэлектродных зазорах. Это инициирует образование двух электрических дуг, далее точки привязки дуги начинают перемещаться по торцам электродов, и дуги начинают выдуваться и растягиваться в направлении друг друга, затем они перемыкаются между собой и образуется единая дуга, горящая от начального электрода к соплу, привязка дуги замыкается на его торце. Напряжением холостого хода источника питания определяется минимальная величина зазоров между кольцевыми электродами. Таким образом, необходимо обеспечить величину суммарного зазора достаточную для гарантированного запуска устройства и учитывать, что нагревание электрода способно вызвать его деформацию, следствием которой может стать короткое замыкание, особенно при минимально допустимом начальном зазоре.

Серия плазмотронов со стержневыми электродами однокорпусного (ПСЭ) и двухкорпусного (ПДСЭ) типа, работающих на углеводородных газах (метан), водороде показаны на рисунке 2.

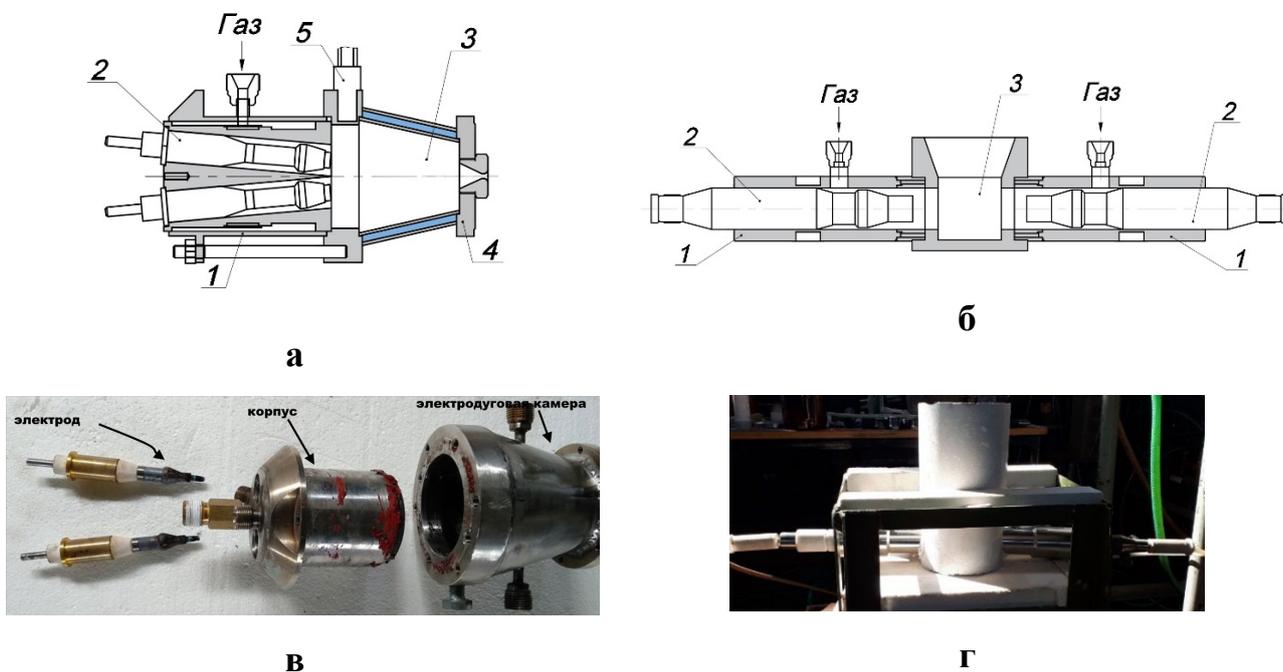


Рисунок 2 – Плазмотрон со стержневыми электродами:  
а, в – однокорпусной (ПСЭ), б, г – двухкорпусной (ПДСЭ)

Плазмотрон ПСЭ состоит из: корпуса (1) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с водяным охлаждением, внутри которого расположены два цилиндрических электродных канала со стержневыми электродами (2), присоединенного шпильками к электродуговой камере (3) со сменным соплом (4). В корпусе имеется канал, предназначенный для подачи прекурсора (5). Принцип работы плазмотрона ПСЭ состоит в подаче высокого напряжения, способствующего возникновению самостоятельного пробоя в зоне между внутренней стенкой канала и областью наибольшего диаметра наконечника электрода, вызывая образование электрической дуги, выдуваемой в сторону наконечника электрода, выходя на его внешнюю границу, где она объединяется с дугой смежного канала.

Плазмотрон ПДСЭ состоит из двух корпусов (1), расположенных на одной оси и изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с водяным охлаждением. В корпусе установлен электрод (2) с рубашкой охлаждения и со сменным наконеч-

ником, на торце которого устанавливается вставка, которая может быть изготовлена из различных материалов (медь, графит, вольфрам) в зависимости от назначения плазмотрона и типа плазмообразующего газа. Корпуса установлены согласно в электродуговую камеру, выполненную из огнеупорного цемента марки ГЦ-40. Конструкция реакционной камеры допускает в том числе выполнение функции плазмохимического реактора при вводе прекурсора.

Необходимо отметить, что возможность изменения смеси рабочих газов в плазмотронах ПСЭ и ПДСЭ реализуется без прерывания рабочего процесса. Благодаря отсутствию балластного газа, этот тип плазмотрона становится перспективным для его применения в плазмохимических установках различного назначения.

Приведено описание стенда экспериментальной установки состоящего из плазмотрона с высоковольтной системой питания, системы подачи плазмообразующего газа, системы охлаждения, вытяжного фильтра и диагностического измерительного комплекса. Описана методика измерения основных параметров и обработки экспериментальных результатов.

**Третья глава** посвящена исследованиям физических процессов, протекающих в электродуговых каналах и камерах плазмотронов с электродными системами кольцевого и стержневого типа. Для определения оптимальных условий стабильной эксплуатации и диапазонов устойчивой работы были получены внешние и динамические характеристики разработанных плазмотронов, установлены зависимости электрических параметров дуги плазмотронов в широком диапазоне расходов при работе на окислительных средах – воздухе, углеводородных газах, метане, водороде, и их смесях, а также инертных газах – аргоне. Динамика горения дуги плазмотрона ПДСЭ была зафиксирована на осциллограммах (рисунок 3), зависимости мощности от расхода газа (смеси газов) для плазмотронов всех типов показаны на рисунке 4.

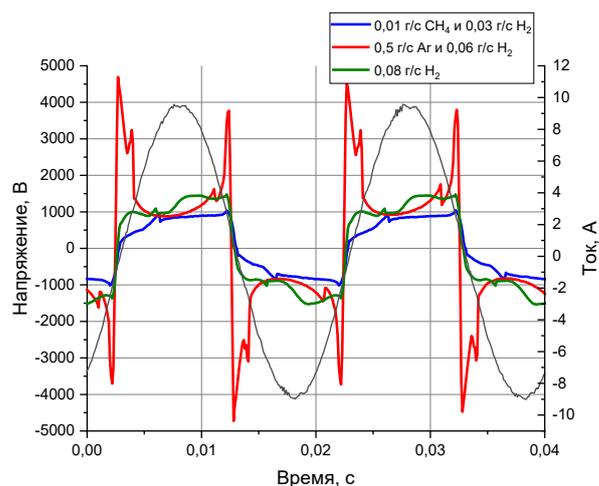


Рисунок 3 – Характерные осциллограммы напряжений и токов для плазмотрона ПДСЭ

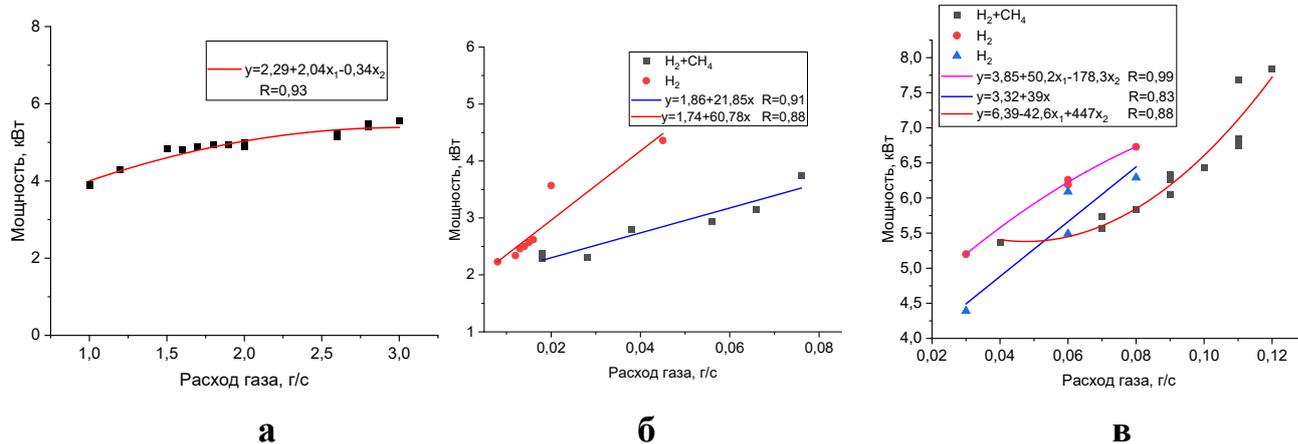


Рисунок 4 – Зависимости мощности от расхода плазмообразующего газа (смеси газов): а – ПКЭ, б – ПСЭ, в – ПДСЭ

Для анализа динамики горения дуги в условиях быстрого изменения параметров была проведена скоростная видеорегистрация синхронно с записью осциллограмм, что позволило зафиксировать эволюцию разряда в рабочей зоне электродуговой камеры плазмотрона ПДСЭ. Экспериментально установлены основные временные и пространственные параметры разряда, включающие форму и размеры дугового канала, интенсивность излучения дуги. Исследование проводилось с применением электродных наконечников из графита и вольфрама при нормальном атмосферном давлении. Диапазон расхода плазмообразующих газов составил: водород до 0,08 г/с, метан до 0,04 г/с, их смесей, а также аргона расходом 0,5 г/с; мощность 4–10 кВт, продолжительность эксперимента составляла не более 30 минут.

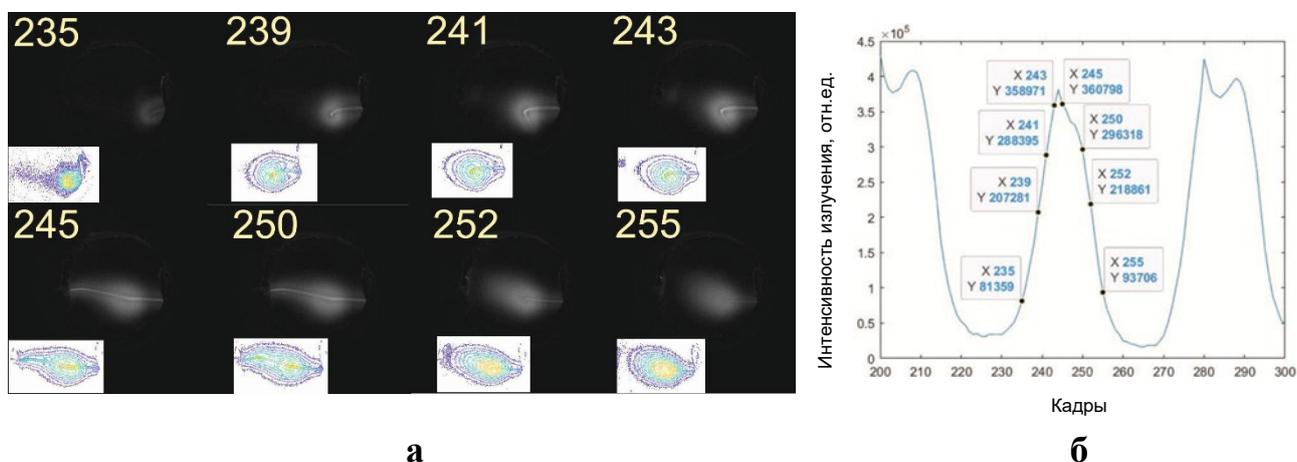


Рисунок 5 – а – режим диффузно-шнурового разряда в зависимости от номера кадра, б – картина распределения интенсивности излучения в зависимости от номера кадра, расход водорода  $H_2$  0,06 г/с, ток 6 А, мощность 6 кВт

В ходе работы было зафиксировано три типа разряда: контрагированный; диффузный с плазменным шлейфом; диффузно-шнуровой (переходный).

На рисунке 5 представлена диаграмма, соответствующая режиму диффузно-шнурового (переходного) разряда при расходе водорода 0,06 г/с. На рисунке 6 представлена видеодиаграмма диффузного режима разряда при расходе смеси метан-водород в соотношении 1:8. Диффузный тип разряда с газопылевыми плазменными облаками наблюдался на экспериментах с разрядами на графитовых электродах при добавлении метана  $\text{CH}_4$  в смесь с водородом  $\text{H}_2$  в соотношениях  $\text{CH}_4:\text{H}_2$  1:8, 1:3.

По снятым видеодиаграммам были определены геометрические размеры дуг, средняя длина электрической дуги и световой диаметр дуги. Для плазмотрона ПДСЭ она составила ~ 50–52 мм. Световой диаметр дуги ~ 1,7 мм для режима контрагированной дуги.

Для стабильной работы плазмотрона важно правильно подобрать величину напряжения зажигания либо оптимальный воздушный зазор между электродами плазмотрона, ориентируясь на номинальное значение напряжения холостого хода используемого источника питания. Плазмотрон ПКЭ проектировался таким образом, чтобы обеспечить возможность изменения расстояния между электродами для обеспечения самостоятельного пробы.

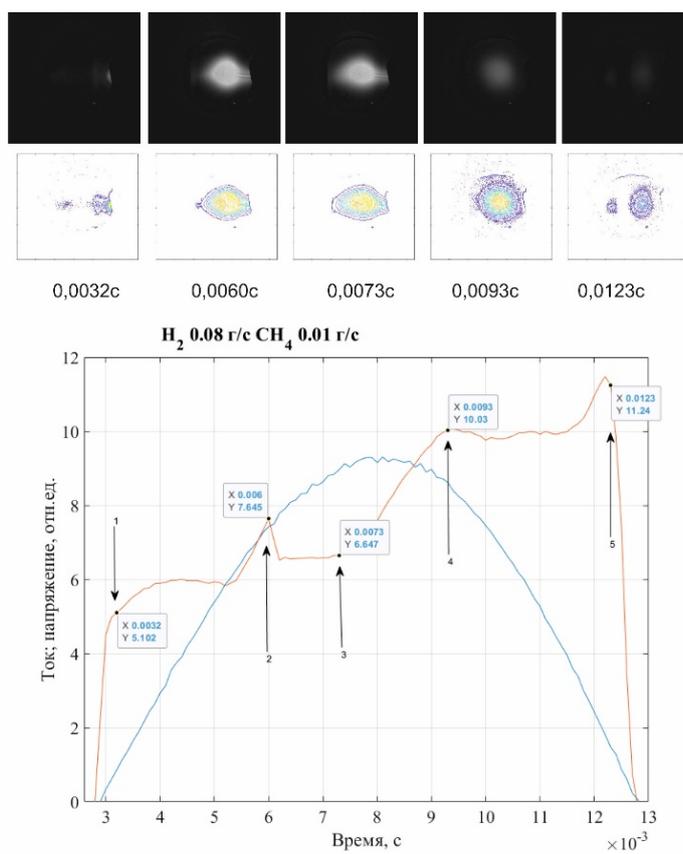


Рисунок 6 – Видеодиаграмма диффузного с плазменным шлейфом разряда, расход смеси метан-водород в соотношении 1:8, числа под кадрами – время кадра в секундах

Проведено численное моделирование процессов инициирования дуги в плазмотроне с кольцевыми электродами ПКЭ двух модификаций.

Конструктивно плазмотрон можно представить в виде схемы замещения электрической цепи (рисунок 7), состоящей из начального, конечного и промежуточного кольцевых электродов, воздушные промежутки (зазоры) между электродами играют роль конденсаторов, последовательно соединенных  $C_1$  и  $C_2$ .

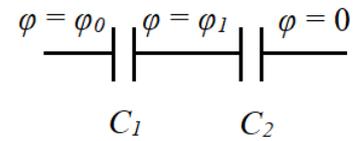


Рисунок 7 – Схема замещения

Конденсатор  $C_1$  обладает большей площадью поверхности пластин, следовательно, большей емкостью, поэтому потенциал  $\varphi_1$  промежуточного электрода смещается в сторону потенциала  $\varphi_0$ :

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \quad (1)$$

Проведен анализ распределения напряженности электрического поля в воздушном канале плазмотрона, падения напряжения на электродах и емкостей межэлектродных зазоров посредством численного моделирования. Показано, что степень неоднородности поля для предложенной схемы размещения электродов близка к единице.

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными позволяет предложить критерий для оценки напряжения инициирования дуги в плазмотроне. Оптимальным оказался критерий, согласно которому величина напряженности электрического поля должна достигать значения 20 кВ/см между электродами. Несмотря на то, что традиционно для воздушных сред используют значения 25 кВ/см и 32 кВ/см, предложенный критерий подтвердил свою достоверность в экспериментах. Определено, что самостоятельный пробой межэлектродного промежутка может быть осуществлен при установленных значениях межэлектродных зазоров до 2 мм, выявлено что при малых межэлектродных промежутках (до 1 мм) распределение электрического поля остается практически равномерным, а присутствие диэлектрика (втулки) незначительно влияет на напряжение пробоя.

Проведена оценка температуры плазмы спектроскопическим методом. Учитывая наличие меди в материале электродов плазмотрона ПКЭ и возможность установки медных наконечников электродов или внесения меди в зону электродуговой камеры при работе, определение температуры возможно провести по отношению интенсивности спектральных линий с длинами волн 510,56 нм, 515,32 нм и 521,32 нм, исходя из предположения нахождения в состоянии локального термодинамического равновесия. Среднемассовое значение температуры для плазмотрона ПСЭ составило  $4662 \pm 930$  К, для плазмотрона ПКЭ  $\sim 6000$  К.

Тепловая эффективность плазмотрона характеризуется термическим КПД:

$$\eta_T = \frac{P - (G \cdot c_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}))}{P} \quad (2)$$

Где  $G$  – массовый расход воды,  $c_p$  – удельная теплоемкость воды,  $t_{\text{вых}}, t_{\text{вх}}$  – температуры на входе и выходе из системы охлаждения.

В таблице 1 представлены полученные характеристики разработанных плазмотронов.

Таблица 1 – Основные характеристики плазмотронов

Параметр	ПКЭ	ПСЭ укор. корпус	ПСЭ удл. корпус	ПДСЭ
Тип газа	Воздух, Ar	Ar, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> , Ar+H <sub>2</sub>	Воздух, Ar	Ar, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> , Ar+H <sub>2</sub>
Расход газа, г/с	1–3,5 Воздух	0,5–1(Ar) 0,006–0,01 (H <sub>2</sub> ) 0,02 (CH <sub>4</sub> )	0,9–3,78 Воздух	0,5–1(Ar) 0,04–0,11 (H <sub>2</sub> ) 0,01–0,04 (CH <sub>4</sub> )
Ток (дейст.), А	4,3	4,3–6,6	6,5–12,9	4,3–6,5
Напряжение (дейст.), В	650–1200	110–630	800–2000	1100–2000
Мощность, кВт	3–5,5	1–3	3–8	6–10
КПД тепловой, %	72–75	80	–	75
Габаритные размеры, мм	(300–400) x 90 (260–360) x 100	240x110	450x76	620x110
Материал наконечника электрода	Медь, нерж. сталь 12X18H10T	Вольфрам, графит	Медь	Графит, вольфрам

**В четвертой главе** показано применение разработанных плазмотронов переменного тока в составе плазмохимических установок по получению порошковых материалов. Установка по плазмохимическому синтезу оксида железа (III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рисунок 7) включает следующие элементы:

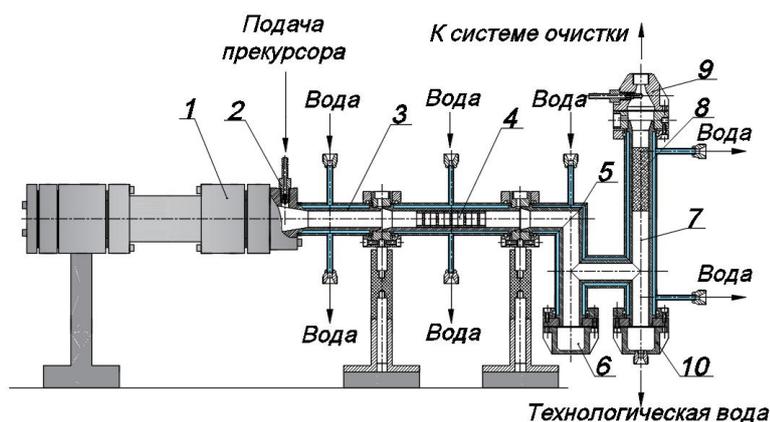


Рисунок 7 – Установка по плазмохимическому синтезу оксида железа (III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

плазмотрон ПКЭ (1), к соплу которого присоединен фланец с отверстием для крепления устройством ввода прекурсора; реакционная камера (3) с рубашкой охлаждения; водоохлаждаемый сепаратор (4); уловитель продукта (5), куда поступает обработанный материал, собираемый в контейнере (6); узлом закалки (7), включающего в себя стружечный наполнитель-насадку (8); выходное сопло (9) и форсунку для подачи воды. Прореагировавшие остатки продукта в твердой фазе постепенно оседают в приемном контейнере (10), откуда впоследствии извлекаются через специально предусмотренный штуцер вывода продукта.

Процесс конденсации диспергированного вещества осуществляется путем взаимодействия с поверхностями реакционной камеры, имеющими принудительное водяное охлаждение. Термическое разложение с образованием оксида железа (III) в общем виде описывается брутто-уравнением:



Для обеспечения необходимых условий проведения экспериментов были обеспечены следующие характеристики экспериментальной установки: мощность плазмотрона 4–4,2 кВт, расход воздуха 1 г/с, расход прекурсора 0,5–1,5 г/с, длительность до 30 минут.

В результате проведения плазмохимического синтеза при указанных условиях был получен мелкодисперсный порошок бурого цвета, который согласно результатам рентгенофазового анализа, представляет собой практически однофазный  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рисунок 8).

На основании уширения линий рентгеновской дифракции был оценен средний размер кристаллитов, который составил  $(57 \pm 6)$  нм. Оценка размера нанокристаллов  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  коррелирует с результатами, полученными методом светодинамического рассеяния (рисунок 9). Согласно этим данным, полученные частицы оксида железа (III) обладают субмикронным размером, продукты плазмохимического синтеза представляют собой как отдельные нанокристаллы  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , так и их агломераты из сравнительно небольшого количества частиц.

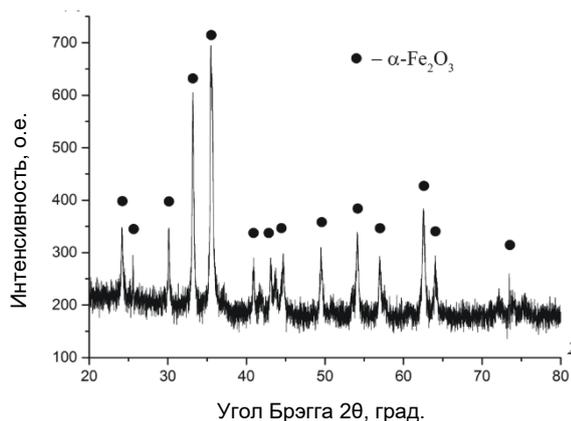


Рисунок 8 – Рентгеновская дифрактограмма продуктов плазмохимического синтеза  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

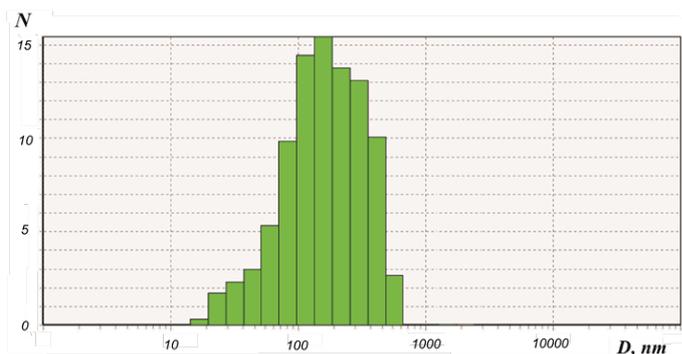


Рисунок 9 – Распределение по размеру частиц  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Установка по плазмохимическому синтезу карбида вольфрама WC (рисунок 10) включает плазмотрон ПСЭ с укороченным корпусом (1), который присоединен к водоохлаждаемой (может быть и не водоохлаждаемой) электродуговой камере (3). В приэлектродной зоне на срезе соплового блока плазмотрона футеровано кольцо из графита (5). Объем камеры составляет  $\sim 11,5 \text{ см}^3$ , она выполнена из нержавеющей стали марки 12Х18Т10Н и представляет собой конструкцию в форме усеченного конуса с возможностью смены сопел (4) разного диаметра от 0,5 мм до 2 мм. К верхней части камеры крепится питатель (6), предназначенный для подачи исходного материала (оксид вольфрама), ко-

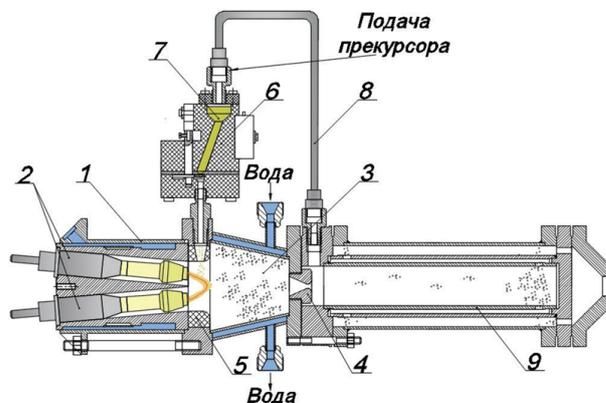


Рисунок 10 – Установка по плазмохимическому синтезу карбида вольфрама

торый транспортируется в камеру отдельными порциями. Электродуговая – реакционная камера соединяется с узлом улавливания готового продукта (9) посредством фланца.

Для получения карбида вольфрама реализуемым в данных условиях, был выбран процесс термического разложения с образованием карбида вольфрама в среде водорода и метана при температуре 850–1000 °С общем виде описывается:



В ходе проведенных исследований был поставлен ряд экспериментов по получению карбидных порошковых материалов, сбор синтезированного порошкообразного продукта производился после его полного осаждения в камере-уловителе. При проведении экспериментов были обеспечены следующие характеристики экспериментальной установки: мощность 2,2–2,8 кВт, расход метана  $1 \cdot 10^{-2}$  г/с, расход водорода  $(6-8) \cdot 10^{-3}$  г/с, расход прекурсора 4–6 г/с, длительность работы до 20 минут.

Проведенный рентгенофазовый анализ (РФА) образцов (рисунок 11), полученных в результате экспериментов №3–№6 в условиях водоохлаждаемой камеры, показал формирование

графитоподобных углеродных структур, различные модификации оксидов вольфрама ( $\text{WO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ), фазы WC в образцах, синтезированных в рамках опытов №4–№6. На Рисунке 12 представлены микрофотографии СЭМ с нанесенными

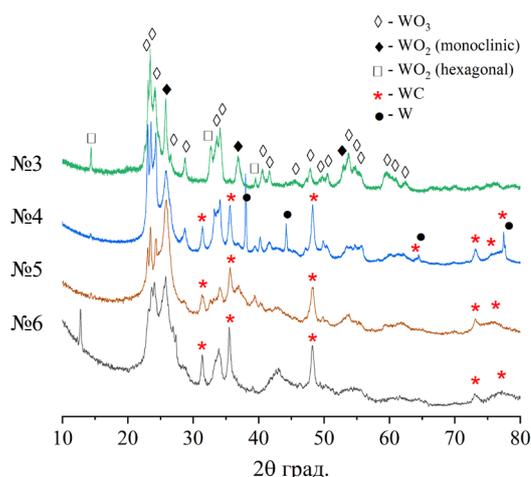


Рисунок 11 – Дифрактограммы образцов, полученных в ходе экспериментов №3–№6

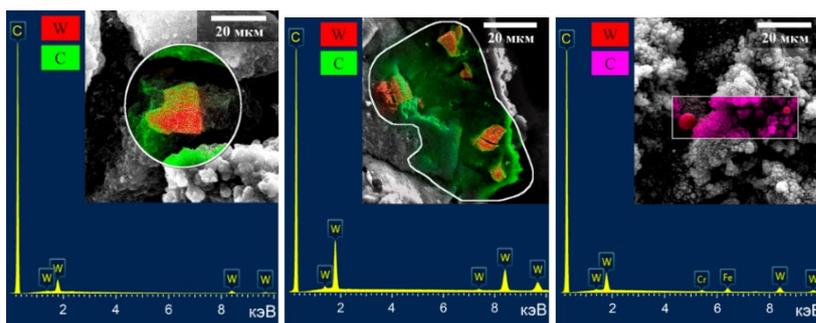


Рисунок 12 – Микрофотографии СЭМ и элементные карты поверхности образца эксперимента №6

поверх них результатами элементного картирования поверхности, а также соответствующие карты спектра элемента. Элементное картирование позволило выявить наличие в образце частиц произвольной формы, спектр которых соответствует карбиду вольфрама WC. На основании полученных снимков СЭМ определено, что размер частиц WC находится в пределах диапазона 5–20 мкм. Обнаружены крупные углеродные образования наряду с незначительным количеством мелкодисперсных округлых частиц. По данным картографирования элементов было выявлено, что сферические включения соответствуют металлическому вольфраму, не обнаруженному ранее методом РФА ввиду его низкой концентрации и широкой рассредоточенности в объеме образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и создан однофазный электродуговой плазмотрон переменного тока с кольцевыми медными электродами ПКЭ, работающий на окислительных средах – воздухе и инертных средах – аргоне, предназначенный для эксплуатации в составе плазмохимической установки по получению порошковых оксидных материалов, в диапазоне расходов воздуха 1–3,5 г/с при мощности 3–5,5 кВт.

2. Разработан и создан однофазный электродуговой плазмотрон переменного тока со стержневыми электродами ПСЭ и с медными или вольфрамовыми наконечниками, работающий на инертных, углеводородных газах, метане, водороде и их смесях, предназначенный для эксплуатации в составе плазмохимической установки по получению карбидных порошковых материалов, в диапазоне расходов аргона 0,5–1 г/с, водорода 0,006–0,01 г/с, метана 0,02 г/с, при мощности 1–3 кВт.

3. Разработан и создан однофазный электродуговой плазмотрон переменного тока двухкорпусного исполнения со стержневыми электродами ПДСЭ, имеющий медные или вольфрамовые наконечники, работающий на инертных, углеводородных газах, водороде, метане и их смесях, регулируемых в диапазоне 0,006–0,5 г/с при мощности 6–10 кВт. Особенностью конструкции плазмотронов ПСЭ и ПДСЭ является возможность использования электродуговой камеры в

качестве плазмохимического реактора за счет ввода прекурсора непосредственно внутрь электродуговой камеры, не прибегая к созданию сложного дополнительного оборудования.

4. Установлены оптимальные рабочие режимы плазмотронов, обеспечивающие их стабильную эксплуатацию в составе плазменных установок. Проведено численное моделирование процессов инициирования дуги в плазмотроне с кольцевыми электродами ПКЭ двух модификаций. Определено, что самостоятельный пробой межэлектродного промежутка может быть осуществлен при установленных значениях межэлектродных зазоров в диапазоне 1-2 мм.

5. Установлено наличие трех типов режимов горения дугового разряда при атмосферном давлении в плазмотроне ПДСЭ при расходе плазмообразующих газов: Ar 0,5 г/с, смеси Ar 0,5 г/с и H<sub>2</sub> 0,08 г/с, H<sub>2</sub> до 0,08 г/с и смеси H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> до 0,11 г/с. Выявлены закономерности связи типов разряда с составом и расходом плазмообразующих газов, получены следующие режимы: контрагированный, диффузный и диффузно-шнуровой (переходный). Диффузно-шнуровой режим разряда был зарегистрирован при расходе плазмообразующего газа – водорода H<sub>2</sub> в диапазоне 0,06–0,08 г/с и на смеси водорода и метана CH<sub>4</sub>:H<sub>2</sub> в соотношении 1:6, 1:4, 1:10, с наличием плазменного облака диаметром 25–30 мм.

6. Разработаны и созданы две экспериментальные электрофизические установки по плазмохимическому синтезу порошковых материалов. Реализован плазмохимический метод получения оксида железа (III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и карбида вольфрама WC. Синтез порошка оксида железа (III) проведен посредством разложения водного раствора нитрата железа (III) Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> в воздушной среде с массовым расходом 1 г/с, получен кристаллический однофазный оксид железа (III) α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с размером частиц от (57 ± 6) нм. Синтез порошка карбида вольфрама WC проводился посредством термического разложения оксида вольфрама WO<sub>3</sub> в среде водорода и метана с массовым расходом 0,018 г/с при продолжительности синтеза более 12 минут. Установлено, что полученный порошок является карбидом вольфрама WC с размером частиц от 5–20 мкм.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Дудник, Ю. Д. Исследование динамики горения дугового разряда в метанводородосодержащей атмосфере в плазмотроне переменного тока / Ю. Д. Дудник, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, М. И. Васильев, О. Б. Васильева // Прикладная физика. – 2025. – № 2. – С. 69–75.
2. Дудник, Ю. Д. Особенности водородного электродугового плазмотрона переменного тока и его применения в экологических приложениях / Ю. Д. Дудник, В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев., О. Б. Васильева // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – № 24. – С. 49–52.
3. Дудник, Ю. Д. Исследование возможности применения плазмотрона переменного тока для получения ультрадисперсного карбида вольфрама / Ю. Д. Дудник, В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева, Д. А. Гаврилова, М. А. Гаврилова // Прикладная физика. – 2023. – № 5. – С. 103–109.
4. Кузнецов, В. Е. Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов / В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // Прикладная физика. – 2022. – № 2. – С. 72–77.
5. Сафронов, А. А. Плазменное получение ультрадисперсных оксидов железа и алюминия / А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // Прикладная физика. – 2021. – № 3. – С. 66-71.
6. Сафронов, А. А. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения / А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, О. Б. Васильева, Ю. Д. Дудник, В. Н. Ширяев // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 2. С. 58-66.
7. Кузнецов, В. Е. Исследование эрозии электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока / В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева, Ю. Д. Дудник // Прикладная физика. 2019. – № 3. – С. 24–30.

### Другие публикации

8. Сафронов, А. А. Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами / А. А. Сафронов, О. Б. Васильева, Ю. Д. Дудник, В. Е. Кузнецов, В. Н. Ширяев // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 6. – С. 926–931.
9. Safronov, A. A. Plasma way for oxide nanoparticles obtaining / A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, Yu. D. Dudnik, V. N. Shiryayev, O. B. Vasilieva / Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – С. 012066.

## **Тезисы докладов всероссийских и международных конференций**

10. Дудник, Ю. Д. Особенности водородного электродугового плазмотрона переменного тока и его применения в экологических приложениях / Ю. Д. Дудник, В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева / В книге: Физика. СПб. Санкт-Петербург, 2024. – С. 274–276.

11. Дудник, Ю. Д. Особенности плазменного процесса получения карбида вольфрама при использовании плазмотрона переменного тока / Ю. Д. Дудник, В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева, Д. А. Гаврилова, М. А. Гаврилова // В книге: L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICRAF-2023. Сборник тезисов докладов, 2023. – С. 180.

12. Сафронов, А. А. Генераторы низкотемпературной плазмы: конструктивные особенности, физические процессы, области применения / А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // В сборнике: Заваляшинские чтения 23. Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 2023. – С. 391–395.

13. Кузнецов, В. Е. Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов / В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // В книге: XLIX Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICRAF-2022. Сборник тезисов докладов, 2022. – С. 136.

14. Сафронов, А. А. Исследование процесса инициирования электрической дуги в плазмотроне при высоком давлении рабочего газа / А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, В. Б. Ковшечников, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // В книге: Физика низкотемпературной плазмы, 2020. – С. 17–18.

15. Сафронов, А. А. Плазменный способ получения оксидных наночастиц / А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева // В сборнике: Пленки и покрытия - 2019. Труды 14-й Международной конференции, 2019. – С. 384–387.

## **Гранты и проекты**

Победитель конкурса грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2023 году, диплом серия ПСП № 23166.

16. Дудник, Ю. Д. Плазменный метод получения ультрадисперсных порошковых материалов на основе плазмотрона переменного тока для промышленного применения / Ю. Д. Дудник // В книге: Двадцать шестая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов. Санкт-Петербург, 2023. – С. 205–206.