

На правах рукописи

Зверев Сергей Геннадьевич

Разработка и исследование высокочастотной плазменной установки
для обработки тугоплавких дисперсных материалов

Специальность 05.09.10 – электротехнология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, профессор

ДРЕСВИН

Сергей Вячеславович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук, профессор

БАШЕНКО

Всеволод Владимирович

кандидат технических наук, доцент

ЛЮБОМИРОВ

Андрей Мстиславович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты имени В.П. Вологодина

Защита состоится « 19 » декабря 2002 г., в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, корп. гл. зд., аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан « 14 » ноября 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние годы все более широкое использование в различных отраслях промышленности получают технологические процессы и установки, основанные на применении низкотемпературной плазмы. Среди плазменных процессов с использованием особенностей высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазмотронов особый интерес представляет технология очистки и сфероидизации мелкодисперсных частиц порошковых материалов. Такие порошки применяются в разных областях техники: при изготовлении фильтров различного назначения, композиционных материалов и материалов для нанесения покрытий, наплавки и сварки, а также в качестве дисперсионных упрочнителей сплавов, наполнителей пластмасс, твердого топлива, смазок и для многих других целей.

Для повышения эффективности обработки дисперсных частиц в ВЧИ-плазме необходимо проведение всестороннего исследования процесса сфероидизации порошкового материала с целью выявления различных факторов, влияющих на технологию.

В настоящее время с ростом мощностей индукционных плазмотронов и увеличением при этом затрат на проведение экспериментов важное значение приобретают теоретические исследования с использованием математических моделей. Такие исследования позволяют выделить основные закономерности и важнейшие параметры процесса, определить рациональные режимы работы плазмотрона и улучшить технологию, повысить эффективность проектирования промышленных установок и качество исследовательских разработок.

Несмотря на многочисленные исследования в этом направлении, в научно-технической литературе не имеется исчерпывающей информации об исследованиях по определению рациональных режимов технологического процесса термообработки дисперсного материала. К тому же в целом отсутствует методика расчета взаимодействия между плазмой и обрабатываемой группой частиц. Все это определяет актуальность выполненной работы.

Цель и содержание поставленных задач. Разработка эффективного технологического процесса обработки мелкодисперсных частиц в струе ВЧИ-плазмотрона на примере очистки и сфероидизации порошков электротехнического периклаза MgO и кварцевого песка SiO_2 . Создание математической модели, адекватно описывающей взаимодействие потока твердых частиц с плазменной

струей, для определения основных параметров при плавлении порошкового сырья в плазме, оценки качества получаемых при этом продуктов, а также для выбора оптимальной технологической конструкции ВЧ-установки по обработке частиц различных дисперсных материалов.

Для достижения указанных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Создать лабораторную установку для проведения экспериментальных исследований процесса термообработки различных порошковых материалов.
2. Провести эксперименты для исследования энергетических характеристик установки, определения скорости полета мелкодисперсных частиц в струе ВЧИ-плазмы, нахождения радиального распределения температуры в плазменной струе.
3. Экспериментально определить максимальную степень загрузки плазмы мелкодисперсными частицами.
4. Определить распределения параметров плазмы (температуры, составляющих скорости, электромагнитных величин) в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона.
5. Провести анализ и сравнение критериальных зависимостей теплообмена плазмы и частицы с многочисленными экспериментальными данными.
6. Провести математическое моделирование процессов движения, нагрева и испарения частиц порошкового материала в плазме. Проанализировать влияние условий ввода частиц.
7. Провести расчетную оценку производительности плазменной струи с учетом массовой загрузки дисперсными частицами.

Объект исследования – процесс плазменной обработки мелкодисперсных частиц тугоплавких материалов.

При проведении исследований применялись методы математического моделирования и экспериментальные методы.

Экспериментальные исследования технологических схем проводились на лабораторных установках в процессе термообработки и сфероидизации частиц тугоплавких материалов: оксида магния и диоксида кремния.

Методологической основой диссертации послужили научные работы С.В. Дресвина, В.С. Клубникина, В.В. Кудинова, А.Л. Моссэ, И.П. Дашкевича, Ю.В. Цветкова, С.А. Панфилова, М.Ф. Жукова, О.П. Солоненко, И.С. Бурова, А.Л. Суриса, С. Патанкара, М. Булоса, П. Фуше, Д. Сполдинга, Е. Пфендера и других исследователей.

На защиту выносятся:

1. Результаты расчета двумерного распределения параметров плазмы в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона.
2. Результаты анализа и сравнения критериальных формул теплообмена сферических тел в плазменных потоках с экспериментальными данными.
3. Результаты математического моделирования процессов движения, нагрева и испарения мелкодисперсных частиц SiO_2 и MgO в плазме.
4. Результаты расчета плазменной струи, загруженной большим количеством мелкодисперсных частиц.
5. Результаты экспериментального исследования ВЧИ-установки для обработки дисперсных материалов: определение скорости полета мелкодисперсных частиц в факеле плазменной струи, измерение температуры плазменной струи, определение максимальной степени загрузки плазмы мелкодисперсными частицами, определение энергетических характеристик.

Научная значимость результатов. Проведено комплексное исследование процессов теплообмена движущихся в плазме частиц. Предложена новая поправка в критериальную зависимость теплообмена сферических тел в плазменных потоках. При расчете нагрева порошкового материала в плазменной струе поправка учитывает смену характера теплопередачи от плазмы к частице. Полученные результаты хорошо согласуются с многочисленными экспериментальными данными. Расчетным путем получены двумерные распределения параметров плазмы в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона. Уточнена и расширена математическая модель движения и нагрева мелкодисперсных частиц в плазменной струе с учетом их испарения. Разработана методика и проведены расчеты плазменной струи с учетом массовой загрузки дисперсным материалом. Экспериментально изучено влияние основных параметров на эффективность и производительность процесса плазменной обработки дисперсного материала. Экспериментально определены технологические характеристики различных схем плазменной обработки дисперсного материала, выявлены их преимущества и недостатки.

Практическая значимость результатов. Результаты проведенных расчетов и экспериментальных исследований позволяют глубже понять и обосновать физико-химические процессы, протекающие при плазменной обработке дисперсных материалов. На основе разработанной математической модели определены

условия для стабильного и эффективного расплавления частиц, обеспечивающие улучшение качества обрабатываемых материалов. Разработанная методика расчетной оценки влияния порошкового материала на параметры плазменной струи может быть использована для различных вариантов ВЧИ-плазмотронов. Созданы экспериментальные лабораторные установки колебательной мощностью 60 кВт с частотами 1,76 и 5,28 МГц с вертикальным и горизонтальным расположением высокочастотных индукционных плазмотронов соответственно для исследования обработки различных порошковых материалов, в том числе и тугоплавких. Разработана высокоэффективная технологическая схема процесса очистки и сфероидизации порошков электротехнического периклаза MgO и кварцевого песка SiO_2 различного фракционного состава, включающая особенности режимов ВЧИ-установки и ввода частиц дисперсного материала в струю плазмы. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при создании и оптимизации промышленных ВЧИ-установок для термообработки и сфероидизации дисперсных частиц различного порошкового материала.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-западного региона» (Санкт-Петербург, 2001); VI и VII Европейская конференция по термическим плазменным процессам и технологиям (Франция, Страсбург, 2001 и 2002); XV Международный симпозиум по плазмохимии (Франция, Орлеан, 2001).

Публикации. По результатам теоретических и экспериментальных исследований опубликованы восемь статей и тезис одного доклада.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Полный объем диссертации – 239 страниц, рисунков – 92, таблиц – 34.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены основные цели, задачи и методы исследования, приводятся общая характеристика работы, научная и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор оборудования высокочастотных плазменных установок для термообработки дисперсного материала.

На основании приведенных характеристик и особенностей показаны преимущества ВЧИ-плазмотронов перед плазмотронами других типов в технологии очистки и сфероидизации порошкового сырья. Рассмотрены основные конструкции и технологические узлы ВЧИ-плазмотронов, выявлены достоинства и недостатки разных схем плазмотронов при их использовании в процессе обработки различных типов порошков.

Рассмотрены ВЧИ плазменные установки, используемые в промышленности для широкого круга задач, а также основные варианты установок с использованием ВЧИ-плазмотронов мощностью от 40 до 160 кВт для обработки (плавления) порошков разных материалов, имеющих диаметр от 1 до 1000 мкм. Приведены особенности, параметры режимов работы и основные характеристики различных вариантов высокочастотных плазменных установок для сфероидизации мелкодисперсных тугоплавких частиц.

Во второй главе приведены описания созданных лабораторных установок мощностью 60 кВт и частотой 1,76 МГц и 5,28 МГц с вертикальным и горизонтальным расположением плазмотронов соответственно.

Приводится краткое описание применения ВЧИ-плазмы в процессах, протекающих при воздействии плазмы на какой-либо материал – нагрев, плавление, испарение материалов, и в различных плазмохимических технологиях. Приведены особенности технологического процесса сфероидизации порошков.

Представлено описание особенностей экспериментальных установок, созданных в лаборатории кафедры электротехники и электротехнологии СПбГПУ для исследований процессов термообработки различного дисперсного сырья. В качестве источника питания для высокочастотной плазменной установки с горизонтальным расположением плазмотрона использован серийный ламповый генератор ВЧИ-60/5.28; для вертикальной высокочастотной плазменной установки – ВЧИ-60/1.76. Приведены параметры и технические характеристики основных рабочих узлов экспериментальных установок (рис. 1).

Описаны конструктивные особенности разных схем установок. Показано, что путем выбора подходящего типа ВЧИ-плазмотрона можно добиться повышения эффективности технологического процесса термообработки и сфероидизации разнообразного дисперсного материала. Это продемонстрировано на примерах обработки дисперсного плавленого кварца SiO_2 на плазменной установке с горизонтальным расположением плазмотрона (ввод материала

осуществляется на срез плазмотрона) и получения сфероидных порошков тугоплавкого электротехнического периклаза MgO в вертикальной ВЧ-установке (ввод порошка – встречно плазменному потоку по типу «плазменный фонтан»).

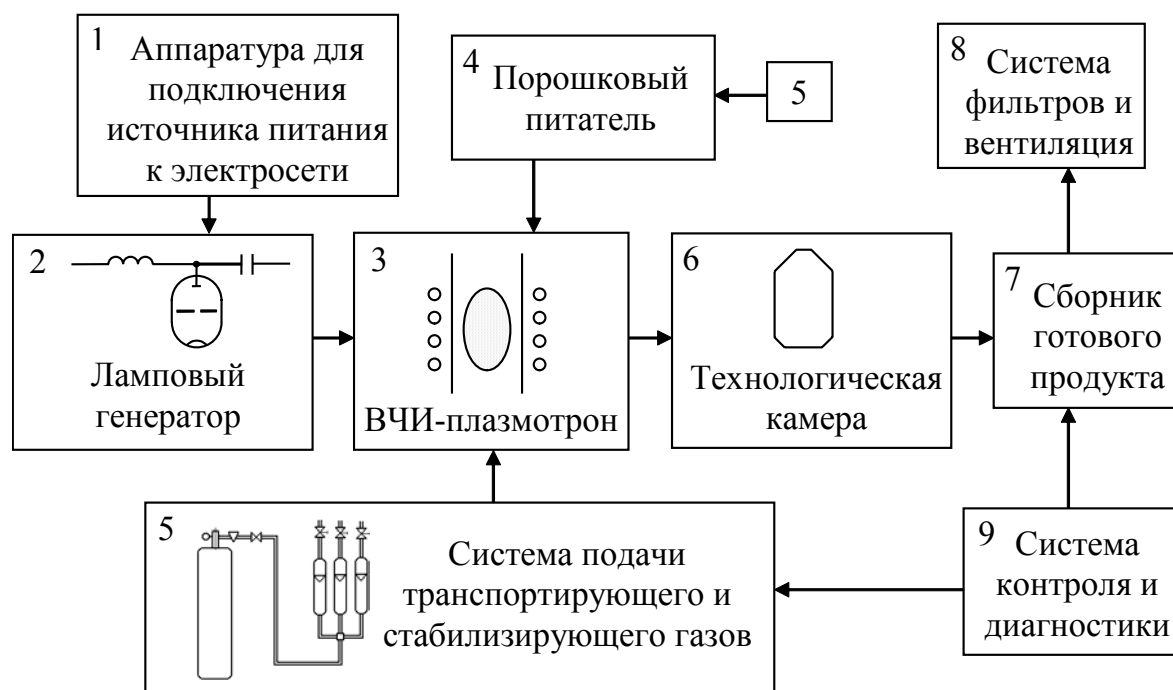


Рис. 1. Блок-схема экспериментальных плазменных установок

Показана эффективность и улучшение качества при обработке различных дисперсных материалов в плазменной струе. Приведены характеристики MgO , используемого в виде порошкового наполнителя в качестве высокотемпературной электроизоляции при изготовлении ТЭНов, до и после плазменной обработки.

Представлено описание улучшенного плазменного метода получения сферических стеклошариков SiO_2 , применяемых в технологиях для точного литья по выплавляемым моделям, в качестве светоотражающих наполнителей красок для нанесения разметки автомобильных дорог и в других областях техники. Приведено экспертное заключение СОЮЗДОРНИИ о лабораторных испытаниях стеклошариков, полученных на созданной экспериментальной установке. В заключении указывается на полное их соответствие нормам европейского стандарта (в том числе и экологическим нормам для маркировочных материалов) и удовлетворение требованиям, которые предъявляются к материалам, используемым в дорожном строительстве (ГОСТ Р 51256-99).

В третьей главе рассмотрена двумерная равновесная модель плазменных процессов в ВЧИ-плазмотроне; описано построение расчетных сеток; приведена методика и алгоритм решения, а также представлены результаты расчета

распределений параметров плазмы в разрядной камере ВЧИ плазмотрона. Расчет выполнен и для аргоновой, и для воздушной плазмы.

В силу цилиндрической формы и осевой симметрии ВЧИ-плазмотрона все уравнения записываются в двумерных цилиндрических координатах. Для описания поведения плазмы и расчета используется система, состоящая из уравнения баланса энергии (1); уравнений движения плазмы для двух составляющих скорости V_r и V_z (2); уравнения неразрывности (3) и уравнения для определения векторного потенциала электромагнитного поля индуктора с плазмой (4), по полученному распределению которого рассчитываются остальные электромагнитные параметры плазмы:

$$\rho \cdot c_p \cdot v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \rho \cdot c_p \cdot v_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma \cdot E^2 - u_{\text{rad}} - \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(-\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \cdot v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} + \rho \cdot v_r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + F_z, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \cdot v_z \cdot \frac{\partial v_r}{\partial z} + \rho \cdot v_r \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(2 \cdot r \cdot \mu \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - 2 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{r^2} + F_r, \\ & \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho \cdot v_r) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \dot{A}_\varphi}{\partial r} \right) - \left(\frac{1}{r^2} + j \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \sigma \right) \cdot \dot{A}_\varphi = 0. \quad (4)$$

Для совместного решения уравнений (1)–(4) используется метод контрольного объема. В результате расчетов определяются следующие распределенные параметры плазмы: температура T ; составляющие скорости V_z и V_r ; функция потока ψ ; напряженность электрического поля E_φ ; составляющие напряженности магнитного поля H_z и H_r ; плотность тока j_φ ; составляющие электромагнитной силы F_z и F_r и удельная выделяемая мощность p .

Некоторые результаты численного моделирования параметров плазмы для горизонтального и вертикального плазмотронов представлены на рис. 2.

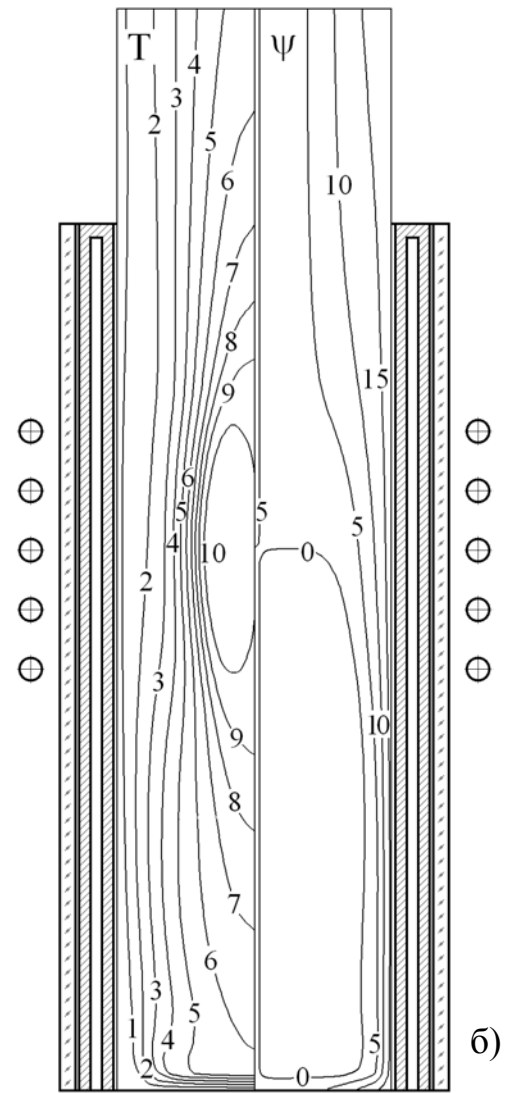
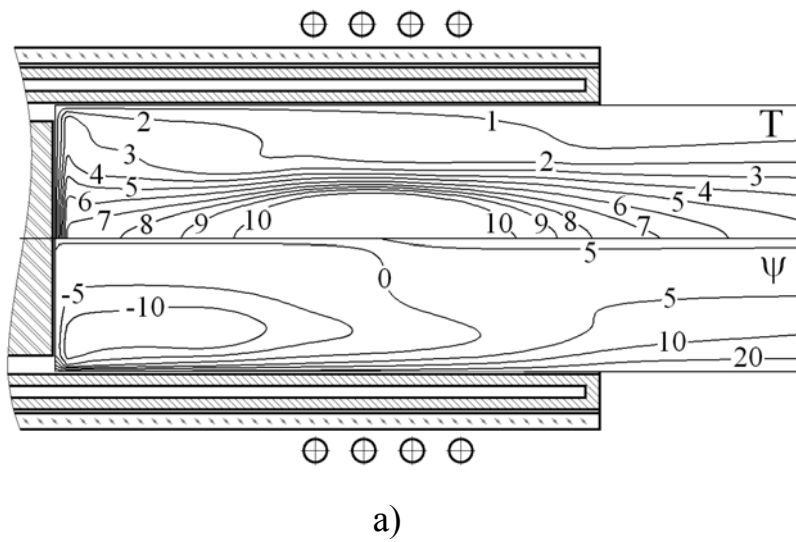


Рис. 2. Распределения температуры T , 10^3 К и функции потока ψ , 10^{-5} кг/с воздушной плазмы для горизонтального (а) и вертикального (б) плазмотронов

Полученные в результате расчета поля температуры и скорости плазменной струи используются при моделировании процессов движения и нагрева мелкодисперсных частиц.

В четвертой главе представлена методика и проведены расчеты движения и нагрева с учетом испарения твердой частицы в потоке плазмы для различных диаметров подаваемых частиц и начальных скоростей их ввода. Разработана математическая модель и приведены результаты расчета плазменной струи, загруженной большим количеством частиц.

Для расчета траектории и скорости движения частицы в плазменной струе используются следующие уравнения:

$$\rho_s \cdot \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \frac{3}{4} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_p}{d_s} \cdot (\vec{v}_p - \vec{v}_s) \cdot |\vec{v}_p - \vec{v}_s| + \rho_s \cdot \vec{g}; \quad C_d = \frac{16,6}{Re^{0,75}} + 0,2; \quad (5)$$

$$z(t) = \int_0^t v_{sz}(t) \cdot dt; \quad r(t) = \int_0^t v_{sr}(t) \cdot dt. \quad (6)$$

Процесс нагрева частицы в плазменной струе (рис. 3) описывается формулой, связывающей скорость нагрева с массой m_s , удельной теплоемкостью c_{ps} и мощностью, передаваемой в частицу:

$$m_s \cdot c_{ps} \cdot \frac{dT_s}{dt} = \sum_i P_i. \quad (7)$$

Учитываются следующие источники и потери мощности для частицы: мощность конвективно-кондуктивной теплопередачи от плазмы P_p ; мощность излучения P_{rad} ; мощность, затрачиваемая на плавление P_{melt} ; мощность, затрачиваемая на испарение P_{vap} ; мощность, затрачиваемая на нагрев парового облака P_{cloud} ; мощность, затрачиваемая на кипение P_{boil} . В рассматриваемой методике также учитываются потери массы частицей при испарении и кипении:

$$\left(\frac{dm_s}{dt} \right)_{vap} = h_m \cdot S_{пов-сти} \cdot p \cdot \ln \left(\frac{p}{p - p_v(T)} \right), \quad (8)$$

$$\left(\frac{dm_s}{dt} \right)_{boil} = - \frac{P_p - P_{rad}}{\Delta H_{boil} + \bar{c}_{p vapor}(T_p) \cdot (T_p - T_{boil})}. \quad (9)$$

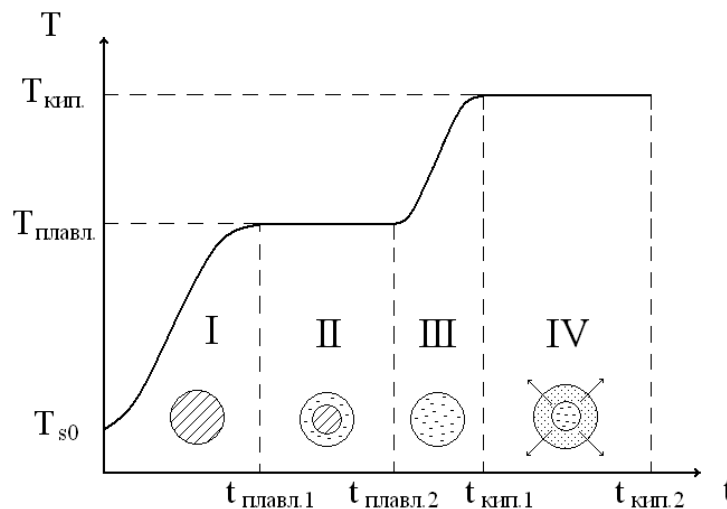


Рис. 3. Стадии нагрева частицы в плазме:

I – нагревание твердой частицы до температуры плавления; II – плавление частицы;
III – нагревание жидкой частицы до температуры кипения; IV – кипение частицы

Разработанная методика позволяет исследовать поведение частицы в плазменной струе – определить траекторию ее движения и нагревание с учетом испарения (рис. 4) и оценить время пребывания частицы в плазме. Все это дает возможность сделать оперативные оценки и выбрать оптимальные условия и режимы для эффективного ведения технологического процесса – сфероидизации порошков различных фракций.

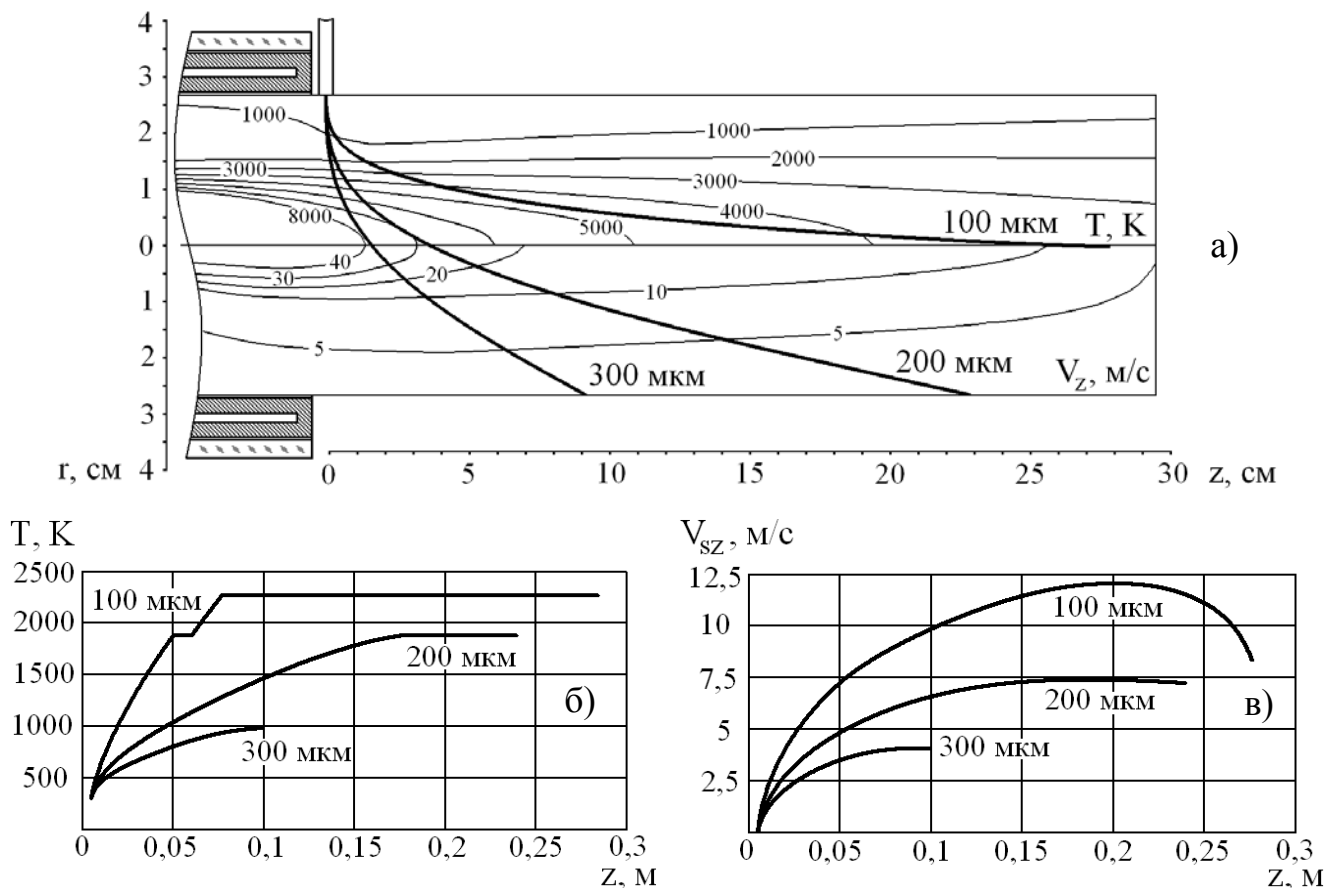


Рис. 4. Результаты расчета в горизонтальной струе траектории (а), температуры (б) и скорости (в) частицы SiO_2 разных диаметров при скорости ввода 3 м/с

Для технологических процессов, связанных с нагревом частиц порошковых материалов, важнейшим параметром является максимальная степень загрузки плазменной струи. Поэтому была разработана математическая модель, адекватно описывающая взаимодействие потока твердых частиц с плазменной струей.

Рассматриваются два процесса: 1) ускорение и нагревание частиц в плазменной струе; 2) торможение и охлаждение плазменной струи частицами.

Для простоты траекторная задача движения частиц поперек плазменной струи не рассматривается. В выходном сечении плазмотрона вводится некоторый условный слой как бы возникающих частиц N_s , из которого они разгоняются и имеют лишь одну составляющую скорости движения V_{sz} . Число частиц в слое связано с весовой загрузкой плазменной струи G_s следующим образом:

$$G_s = N_s \cdot \frac{\pi \cdot d_s^3}{6} \cdot \rho_s. \quad (10)$$

Для учета взаимного влияния числа частиц N_s на поле скоростей и температур плазмы в уравнения для плазменной струи вводятся потери энергии и импульса сил, которые частицы забирают от нее.

УБЭ для плазменной струи, загруженной N_s частицами:

$$\rho_p \cdot c_{pp} \cdot v_{pz} \cdot \frac{\partial T_p}{\partial z} = -\alpha \cdot (T_p - T_s) \cdot S_{\text{пов-сти}} \cdot N_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) - U_{\text{rad}}. \quad (11)$$

Уравнение движения плазменной струи, загруженной N_s частицами:

$$\rho_p \cdot v_{pz} \cdot \frac{\partial v_{pz}}{\partial z} = -\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_p \cdot (\vec{v}_p - \vec{v}_s) \cdot |\vec{v}_p - \vec{v}_s| \cdot \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot N_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right). \quad (12)$$

Приводятся алгоритм и результаты расчета плазменной струи, загруженной большим количеством частиц. С использованием разработанной методики рассчитаны изменения температуры и скорости движения большой группы частиц по длине плазменной струи, исследованы параметры плазмы при различной степени загрузки дисперсным сырьем, определена максимальная загрузка плазменной струи для различных фракций порошкового материала (рис. 5).

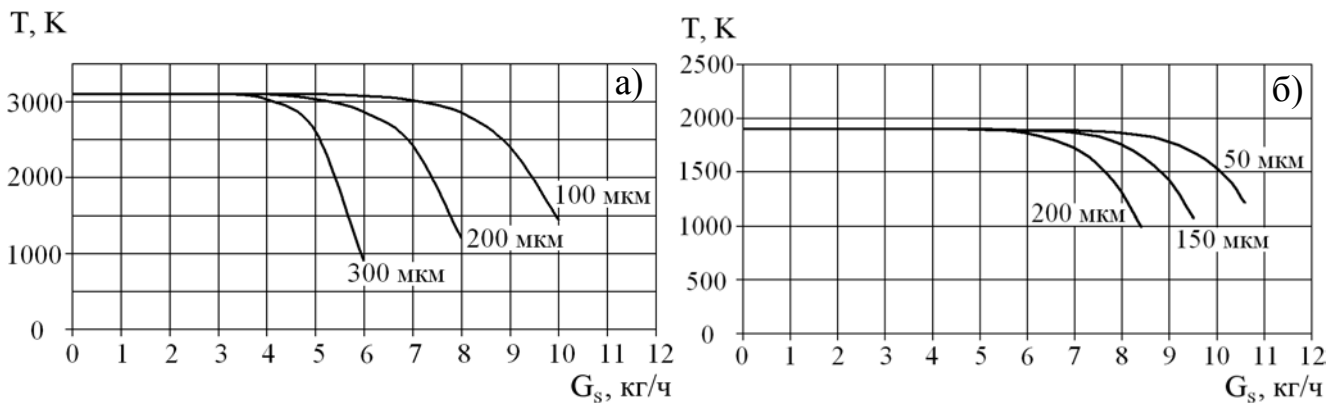


Рис 5. Температура нагрева и предельная весовая загрузка частиц MgO (а) и SiO₂ (б) при обработке в воздушной струе вертикального 1,76 МГц и горизонтального 5,28 МГц плазмотрона соответственно

В пятой главе проведен анализ и сравнение критериальных формул теплообмена сферических тел в плазменных потоках с многочисленными экспериментальными данными.

Собраны и проанализированы наиболее часто используемые формулы для определения кондуктивно-конвективного теплообмена плазмы с частицей. Различия между критериальными зависимостями, приводимыми разными авторами, заключаются в выборе определяющей температуры, при которой определяются физические свойства газа, и применении различных поправок. В большинстве случаев в качестве основы для критериальных зависимостей используется формула Ранца-Маршалла:

$$Nu = \underbrace{2}_{\text{кондукция}} + \underbrace{0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}}_{\text{конвекция}}. \quad (13)$$

где первое слагаемое выражает кондуктивную теплопередачу через пограничный слой, а второе – конвективную теплопередачу от набегающего потока плазмы.

Построены температурные зависимости тепловых потоков для аргонной и воздушной плазмы, вычисленные по различным критериальным формулам и приведенные к одним условиям ($d_s = 6$ мм, $V_p = 25$ м/с, $T_s = 300$ К). При этом получен большой разброс значений тепловых потоков. Так, для аргонной плазмы при температуре 8000 К тепловые потоки различаются от 0,7 до 2 МВт/м², а для воздушной – от 2 до 14 МВт/м². Обоснована необходимость сопоставления расчетных критериальных формул с имеющимися экспериментальными данными разных исследователей для выбора зависимости, наиболее достоверно описывающей теплообмен плазмы с частицей.

Для сравнения экспериментальных данных, полученных при различных условиях, используется D-функция, позволяющая связать параметры самой плазмы с величиной теплового потока к модельной сфере:

$$\underbrace{q \cdot \sqrt{\frac{d_s}{v_p}}}_{\text{экспериментальные данные}} = A \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{\rho_p}{\mu_p}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu_p \cdot c_p}{\lambda_p}} \cdot \lambda_p \cdot (T_p - T_s)}_{\text{D-функция}}. \quad (14)$$

Сравнение экспериментальных данных разных авторов с конвективной частью теплообмена (D-функцией) показывает хорошее совпадение для коэффициента A как для аргона, так и для воздуха в пределах 0,5÷0,6 – для металлических частиц, 0,4÷0,5 – для керамических частиц.

В результате проведенного анализа в качестве коэффициента теплопроводности плазмы рекомендуется брать среднюю величину по пограничному слою (15), а остальные свойства – по температуре набегающего потока (по внешней границе пограничного слоя).

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1}{T_p - T_s} \cdot \int_{T_s}^{T_p} \lambda_p \cdot dT \quad (15)$$

Показано, что для случая чистого конвективного теплообмена от плазмы к частице, когда скорость плазменного потока намного больше скорости частицы – $V_p \gg V_s$ справедливы только формулы типа $Nu = A \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$. В тех же случаях,

когда частица ускоряется и ее скорость становится соизмеримой со скоростью плазменной струи – $V_p \approx V_s$, что характерно для мелких частиц 50–100 мкм, и особенно ультрадисперсных, конвективная часть теплообмена становится равной нулю $A \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \rightarrow 0$, так как происходит вырождение числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_p \cdot |\vec{V}_p - \vec{V}_s| \cdot d_s}{\mu_p} \rightarrow 0, \text{ и при этом основной составляющей теплообмена}$$

является кондуктивный механизм: $Nu=2$. Однако, применение критериальной формулы с учетом и кондуктивной, и конвективной составляющих теплообмена (13) в условиях, когда $V_p \gg V_s$, приводит к завышению значения теплового потока в 2–5 раз и существенным погрешностям в конечных результатах из-за кондуктивного члена $Nu=2$.

Получено, что если $V_p \approx V_s$, то преобладает кондуктивный теплообмен: $Nu=2$, а если $V_p \neq V_s$, то – конвективный теплообмен: $Nu = 0.6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$.

В результате проведенного исследования показано, что влияние кондуктивного ($Nu=2$) и конвективного ($Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n$) теплообменов определяется соотношением скоростей частицы и плазмы, т.е. при расчетах движения и нагрева различных частиц в плазменной струе определяющей при нахождении теплового потока является скорость набегающего потока – относительная скорость плазмы и частицы: $V_p - V_s$. Доказана необходимость введения некоторого поправочного коэффициента, зависящего от относительной скорости плазмы и частицы.

На основании проведенного анализа предложена поправка к кондуктивной части теплообмена ($Nu=2$), представляющая собой отношение скоростей плазмы и частицы (в текущий момент времени расчета).

В итоге, для численных расчетов теплообмена частиц дисперсного материала с плазмой рекомендуется следующая критериальная зависимость:

$$Nu = 2 \cdot \frac{V_s}{V_p} + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}. \quad (16)$$

Предлагаемая формула (16) при расчете нагрева порошкового материала в плазменной струе учитывает смену характера теплопередачи от плазмы к частице. Введение поправки $\frac{V_s}{V_p}$ наглядно объясняет механизм влияния

кондуктивной составляющей теплопередачи на кондуктивно-конвективный теплообмен плазмы с частицей и приводит к достаточно хорошему совпадению с многочисленными экспериментальными данными. Зависимость (16) охватывает два основных случая, когда $V_p \gg V_s$ и $V_p \approx V_s$, и может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \text{при } V_p \gg V_s & Nu = 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \\ \text{при } V_p \approx V_s & Nu = 2 \end{cases} \Leftrightarrow Nu = 2 \cdot \frac{V_s}{V_p} + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$$

В шестой главе содержатся описание методик и результаты экспериментальных исследований на созданных лабораторных установках.

Проведены следующие экспериментальные работы: исследование энергетических характеристик установок; определение скорости полета мелкодисперсных частиц в струе ВЧИ-плазмы; нахождение радиального распределения температуры в плазменной струе; определение максимальной степени загрузки плазменной струи разнообразным дисперсным материалом различных фракций.

Измерение температуры плазменной струи проводилось методом малой монохроматизации по абсолютной интенсивности континуума, скорость частиц в потоке плазмы – по стробоскопической трековой методике, энергетические характеристики установок – калориметрическим способом.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов показало их соответствие с удовлетворительной точностью.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны и созданы экспериментальные лабораторные установки мощностью 60 кВт частотой 1,76 МГц и 5,28 МГц с вертикальным и горизонтальным расположением ВЧИ-плазмотронов соответственно для исследования процессов термообработки и сфероидизации различных дисперсных материалов.
2. Экспериментально изучен процесс плазменной термообработки и сфероидизации тугоплавких дисперсных материалов на ВЧ-установках.
3. Проведены исследования влияния основных факторов на эффективность и производительность процесса плазменной обработки различного дисперсного

материала. Определены технологические характеристики различных схем плазменной обработки дисперсного материала, выявлены их преимущества и недостатки. Установлены оптимальные рабочие режимы оборудования установок.

4. Проведены расчеты двумерного распределения параметров плазмы в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона в приближении локального термодинамического равновесия. Результаты получены для двух различных плазмообразующих газов: аргона и воздуха. Полученные распределения температуры и скорости плазмы использованы в качестве исходных данных при моделировании процессов движения, нагрева и испарения мелкодисперсных частиц в плазме.
5. Проведено комплексное исследование процессов теплообмена движущихся в плазме частиц. Показана необходимость учета смены характера теплопередачи от плазмы к частице при ее движении в плазме. Предложена новая поправка в критериальную зависимость теплообмена сферических тел в плазменных потоках, хорошо согласующаяся с многочисленными экспериментальными данными и учитывающая изменение характера теплообмена между плазмой и частицей при расчете нагрева порошкового материала в плазменной струе.
6. Разработана математическая модель и программа расчета движения и нагрева мелкодисперсных частиц в плазменной струе с учетом испарения.
7. Разработана методика и проведены теоретические расчеты плазменной струи с учетом массовой загрузки дисперсным материалом. Определены предельные весовые расходы материалов при термообработке порошкового сырья.
8. В результате оптимизации математической модели расчета и экспериментальных исследований, проведенных на ВЧ-установках, предложена эффективная технологическая схема процесса термообработки мелкодисперсных частиц различного фракционного состава в струе ВЧИ-плазмотрона на примере очистки и сфероидизации порошков электротехнического периклаза MgO и кварцевого песка SiO_2 .

Данные диссертационной работы могут быть использованы при создании промышленных ВЧИ-установок для термообработки и сфероидизации мелкодисперсных частиц. Созданные установки используются в качестве лабораторных стендов для экспериментального изучения процессов термообработки и сфероидизации различных порошковых материалов.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. S.V. Dresvin, O.N. Feygenson, S.G. Zverev, J. Amouroux, D. Morvan. Investigation of dusted jet of RF plasma torch / Proc. of the 6-th European Conference on Thermal Plasma Processes, Strasburg. – 2000. – P. 373-378.
2. Dresvin S.V., Feygenson O.N., Zverev S.G., Amouroux J. Velocity and temperature evolution of plasma jet with the increasing of SiO₂ particles concentration / Proc. of the 15-th Int. Symposium on Plasma Chemistry, Orlean. – 2001, V.6. – P. 2539-2544.
3. Зверев С.Г., Фейгенсон О.Н., Дресвин С.В. Расчет динамики движения и нагревания мелкодисперсных частиц в струе ВЧИ-плазмы // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч.І: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 91-93.
4. Фейгенсон О.Н., Зверев С.Г., Зарембо Р.Ю., Дресвин С.В. Экспериментальные исследования процесса сфероидизации порошка SiO₂ в ВЧИ-плазме // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч.І: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 93-95.
5. Зверев С.Г., Иванов Д.В., Фейгенсон О.Н., Дресвин С.В. Моделирование процессов тепло и массообмена при движении мелкодисперсных частиц в плазме // Материалы 2-го Политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-запад. региона». – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, С. 21.
6. Иванов Д.В., Фейгенсон О.Н., Зверев С.Г., Артеменко М.В., Дресвин С.В. Расчет параметров плазмы в ВЧИ-плазмотроне для сфероидизации порошков // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.ІІ: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 35-37.
7. Зверев С. Г., Иванов Д.В., Фейгенсон О.Н., Артеменко М.В., Дресвин С.В. Моделирование процессов тепло- и массообмена при движении мелкой одиночной частицы в плазме // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.ІІ: Материалы межвуз. научн. конф. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 37-40.
8. Зверев С.Г., Фейгенсон О.Н., Дресвин С.В. Плазменная установка для производства ультрадисперсных порошков SiO₂ сферической формы // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.ІІ: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 47-49.
9. Фейгенсон О.Н., Зверев С.Г., Дресвин С.В. Улучшение электроизоляционных и компоновочных свойств электротехнического периклаза путем плазменной обработки // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.ІІ: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 49-51.