

Существует большое количество современных плазменных технологий, связанных с нагреванием дисперсных материалов в потоках низкотемпературной плазмы: плазменное напыление защитных покрытий, испарение материалов, сфероидизация порошков тугоплавких материалов, различные плазмохимические процессы, получение ультрадисперсных порошков. При обработке различных порошковых материалов и получении сферических порошков необходимо, чтобы частицы материала в плазме нагревались и расплавлялись, не достигая при этом процесса испарения, при этом надо правильно подобрать расход порошка и транспортирующего газа, а также место ввода частиц в плазменную струю [1]. Таким образом, успешное выполнение такой технологической задачи определяется взаимодействием плазмы и частицы. Рассмотрим основные физические процессы, происходящие при взаимодействии плазмы и мелких частиц. В высокочастотном индукционном (ВЧИ) плазмотроне происходят процессы трех типов: электромагнитные процессы, тепловые процессы и движение плазмы. Они тесно связаны между собой и описываются следующими уравнениями соответственно: электромагнитные уравнения, уравнение баланса энергии и уравнения движения плазмы с учетом уравнения неразрывности. Обработка дисперсного материала в плазменной высокочастотной индукционной установке включает следующие стадии: 1. Нагревание дисперсного материала до температуры $T_{пл}$ (при этом происходит охлаждение плазменного потока); 2. Плавление дисперсного материала при $T = T_{пл}$; 3. Нагревание дисперсного материала до температуры испарения $T_{исп}$; 4. Кипение частицы; 5. Нагревание и диссоциацию (ионизацию) паров дисперсного материала; 6. Охлаждение паров материала до температуры конденсации $T_{конд}$; 7. Конденсацию паров материала с образованием тумана (мельчайших жидких капель); 8. Охлаждение капель материала до температуры затвердевания T_z ; 9. Затвердевание капель при $T = T_z$; 10. Осаждение мелких твердых частиц на стенках камеры и подложках кремния и их охлаждение. В рассматриваемой работе расчета скорости и нагревания частицы используются стадии 1 – 4, определяющие обработку дисперсных материалов в плазменных струях высокочастотных индукционных плазмотронов. Формулы для расчета скорости движения частиц и температуры, несмотря на их некоторую приближенность, дают возможность в ряде случаев сделать оперативные оценки с целью выбора оптимальных условий ведения технологического процесса. Рассмотрим процесс нагревания дисперсного материала в высокочастотной индукционной плазменной установке [2]. Примем основные допущения: 1) частица нагревается равномерно как хорошо теплопроводящее тело - температура поверхности частицы равна температуре в ее центре безградиентный нагрев; 2) температура кипения учитывается при давлении в плазме 1 атм; 3) пренебрегается изменением свойств плазмы в пограничном слое вокруг частицы, происходящее вследствие испарения

частицы; 4) теплофизические свойства считаются постоянными для частицы в твердом состоянии, и зависящими от температуры для частицы в жидком состоянии; 5) форма частиц – сферическая. Модель расчета скорости движения и температуры частиц используется при анализе характера нагрева частиц в зависимости от различных теплофизических характеристик материала при заданных константах: (1) В соответствии с условием уравнение движения частиц в плазме можно упростить: (2) Здесь – линейная скорость потока плазменной смеси, – линейная скорость частицы в плазменной смеси, – коэффициент лобового сопротивления частицы, – плотность плазмы, – диаметр частицы. Исходя из постановки задачи, все величины, кроме u и T , являются постоянными. Коэффициент лобового сопротивления частицы можно аппроксимировать многими полуэмпирическими способами. Наиболее часто аппроксимируют в следующем виде: (3) Однако при более высоких скоростях плазмы рекомендуется коэффициент лобового сопротивления частицы аппроксимировать другими способами, в частности, в работе Пфендера и Ли [3] предлагается следующая зависимость: $C_D = \frac{24}{Re}$, (4) где число Рейнольдса вычисляется по следующей формуле: (5) Данная аппроксимация справедлива для определенного диапазона чисел Рейнольдса, а в общем случае $A=f(Re)$. Таким образом, разбивая решение уравнения на участки, можно использовать выражение для вычисления u . В результате, уравнение (2) можно записать так: $m \frac{du}{dt} = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{du}{dt} = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{du}{dt}$. (6) Решением этого уравнения при начальном условии будет следующее выражение: (7) Возможен также учет сил тяжести: $F_g = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_p - \rho_g) g$. (8) Решением данного уравнения является: (9) Формула (9) может быть использована для расчета движения частиц в плазменном реакторе. Расчет температуры частиц дисперсного материала удобно проводить на основе упрощенного уравнения теплового баланса. (10) При малых лучистых потерях, уравнение примет вид: $\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{m C_p}$, (11) где постоянный коэффициент $K = \frac{\pi d^2}{6} \rho_p C_p$ – Решением этого уравнения относительно T для начального условия T_0 : (12) Коэффициент теплоотдачи является сложной функцией. Он зависит от формы поверхности частицы, ее размеров, температуры, а также свойств плазмы – скорости потока плазмы, температуры, теплопроводности, теплоемкости, плотности, вязкости и других величин. Связь между коэффициентом теплоотдачи и указанными параметрами определяется критериальными зависимостями Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса. (13) Наиболее характерная зависимость: (14) В настоящее время предложено множество значений коэффициентов A и B и показателей степени критериев Рейнольдса и Прандтля, но для расчета в большинстве случаев [4] используется формула Ранца-Маршалла [5]: (15) Где первое слагаемое характеризует процесс переноса тепла кондуктивной теплопроводностью через пограничный слой, а второе – выражает конвективную теплопередачу от потока плазмы. Выражения (1) – (15) – очень упрощенная математическая модель процесса обработки дисперсного порошка, с учетом различных процессов нагревания материала до

температуры плавления и последующего испарения. Полученные формулы для определения температуры дисперсного материала позволяют выяснить качественную сторону процесса нагрева и с достаточной для практики расчетов точностью оценить динамику процесса теплообмена. При расчете температуры и скорости частицы плазменная струя разбивается на участки, в каждом из которых задана экспериментальная температура плазмы. Однако такой подход существенно усложняет реализацию программного продукта без использования дополнительных библиотек, решающих проблему аппроксимации экспериментальных данных. При расчете по представленной методике были интегрированы функции библиотеки ALGLIB [6] для обеспечения условия непрерывности аппроксимирующей функции различных заданных параметров плазмы, а так же оптимизации полученных результатов. ALGLIB - это кросс-платформенная библиотека численного анализа, поддерживающая несколько языков программирования (C++, C#, Pascal, VBA) и несколько операционных систем (Windows, Linux, Solaris). Точность полиномиальной аппроксимации уменьшается при увеличении степени аппроксимирующих полиномов. От этого недостатка можно избавиться, используя для аппроксимации отрезки полиномов невысокой степени, применяемые для представления части узловых точек. Самым известным методом такой аппроксимации является сплайн-аппроксимация на основе применения отрезков кубических полиномов [7]. При этом аппарат сплайн-аппроксимации позволяет получить полиномы, которые дают в узловых точках непрерывность не только представляемой ими функции, но и ее первых и даже вторых производных. Благодаря указанным свойствам сплайнов они хорошо описывают функции, представленные как небольшим числом узловых точек (благодаря плавности сплайн-кривых), так и функции, представляемые очень большим числом узловых точек (поскольку порядок полиномов от этого числа уже не зависит). Недостатком сплайн-аппроксимации является отсутствие общего выражения для всей кривой, т.е. фактически приходится использовать набор сплайн-функций для различных интервалов между узловыми точками. При разработке программного обеспечения для расчета скорости и температуры частиц в плазме использовалась сплайн-интерполяция, при которой интервал интерполяции разбивается на небольшие отрезки, на каждом из которых функция задается полиномом третьей степени. Кубический сплайн соответствует значениям функции в узлах и значениями производных на границе отрезка интерполяции. Наглядно результат обработки исходных данных библиотекой ALGLIB функцией кубической сплайн-интерполяции на примере зависимости теплопроводности плазмы от температуры представлен на рис.1 (исходные данные) и рис.2 (после обработки). Интеграция библиотеки ALGLIB позволяет максимально корректно провести расчет температуры и скорости частиц в ВЧИ-плазмотроне по известным формулам на основе ранее полученных экспериментальных данных. Для

построения графиков разработано множество внешних библиотек и компонентов. В большинстве своем это закрытые и/или платные продукты, но среди свободных существует ряд компонентов, не уступающие платным по функциональности. В данной работе использовалась одна из таких библиотек - ZedGraph [8], позволяющая строить графики любой сложности. Рис. 1 - Зависимость теплопроводности плазмы от температуры плазмы по экспериментальным данным Рис. 2 - Зависимость теплопроводности плазмы от температуры плазмы после интерполирования кубическим сплайном ALGLIB и ZedGraph являются кроссплатформенными плагинами, однако для совместимости со средой Microsoft Visual Studio [9] используется их интерпретация в качестве компонентов платформы Microsoft .NET Framework [10]. Используя рассмотренную выше методику, было разработано программное обеспечение, использующее методы обработки экспериментальных данных для расчета температуры и скорости движения частиц разных диаметров. Результаты работы программы представляют собой зависимости температуры (рис. 3) и скорости (рис. 4) частиц различных диаметров от z-координаты. Результаты численных расчетов показали, что изменение дисперсности подаваемого материала существенно сказывается на его скорости и температуре в плазменной струе. Для мелких частиц, когда скорость частицы становится равной скорости плазмы, конвективная часть теплообмена стремится к нулю, так как коэффициент Рейнольдса стремится к нулю, а значит, процесс теплообмена носит кондуктивный характер. Рис. 3 - Изменение нагрева частиц SiO₂ Рис. 4 - Изменение скорости движения частиц SiO₂ С точки зрения полученных графиков температуры, стоит отметить, что джоулево тепло, выделяющееся в скин-слое, отводится во внешнюю область разряда плазмотрона всеми возможными механизмами теплообмена, включая как его конвективную, так и кондуктивную составляющие, в то время как во внутреннюю (по отношению к скин-слою) область разряда - в основном лишь механизмом кондуктивного переноса тепла. Согласно многочисленным экспериментальным и расчетным данным [11] [12] [13], распределения температуры имеют максимум в центральной зоне разряда, несколько смещенный к оси индуктора. Исходя из этого, частицы обрабатываемого в плазме порошка нагреваются и ускоряются в большей степени в зонах плазменной струи с максимальной температурой, что это необходимо учитывать; с другой стороны при сфероидизации мелких тугоплавких частиц очень важно нагреть материал до температуры плавления и полностью расплавить его, не доводя до кипения (перегрева), так как при перегреве в частице образуются полые области - пузырьки, что приводит к ухудшению физико-химических свойств материала. В связи с этим задача состоит в том, чтобы правильно организовать движение частиц в границах факела плазменной струи, поэтому для получения оптимальных режимов сфероидизации различных фракций

порошка необходимо провести расчеты процессов нагрева и движения частиц в потоке плазмы для разных вариантов их диаметра и начальных скоростей подачи. Рассмотренная методика моделирования движения и нагрева мелкодисперсных частиц в плазменной струе позволяет определить оптимальный режим термообработки порошкового материала: максимальный тепловой поток на нагрев частицы, время нахождения частицы в плазменной струе, точку плавления и испарения частицы, размер плазменной струи для обработки частицы. Однако присутствие большого количества частиц в плазменном потоке резко изменяют свойства плазмы, и данная модель движения и нагрева частиц в заданном поле плазмы не позволяет определить реальные параметры системы «плазма — дисперсное сырье». В этом случае нужно поставить задачу моделирования взаимодействия большой группы частиц с плазменной струей