

Введение В настоящее время существует большое количество технологий, связанных с нагревом порошковых материалов в плазме высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда: напыление тугоплавких покрытий, сфероидизация и дисперсизация порошков, испарение веществ, переработка металлосодержащих отходов, эмиссионный спектральный анализ и др. [1-2]. Математическое моделирование физических процессов при высокотемпературной обработке дисперсных материалов в ВЧИ-плазмотронах с целью получения порошков повышенной дисперсности вплоть до наноразмеров с заданными свойствами представляет практический и теоретический интерес [3-5]. Целью данной работы является моделирование газодинамики разрядной камеры плазматрона и изучение поведения газа, так как Газодинамика ВЧИ-разряда оказывает большое влияние на его электромагнитные параметры, на тепловой режим внутри разрядной камеры плазматрона, что в свою очередь определяет характер движения частиц в плазме. Наиболее распространенная конструкция ВЧ-плазматрона представляет собой цилиндрическую трубу (разрядную камеру) с проницаемыми для высокочастотного электромагнитного поля стенками (как правило, из кварцевого стекла), помещенную в индуктор, соединенный с ВЧ-генератором. С одной стороны разрядная камера закрыта и снабжена газоформирователем, через который подается рабочий газ, истекающий после прохождения зоны разряда в рабочую часть установки. Конструкция газоформирователя позволяет осуществлять надежную стабилизацию высокочастотного разряда, управлять плазменной струей и, в некоторой степени, защищать стенки разрядной камеры от перегрева при их контакте с плазмой, обеспечивая тем самым чистоту потока и высокий ресурс разрядной камеры. В зависимости от конкретного технологического процесса изменяются требования к аэродинамике разрядной камеры. Для решения подобных задач широкое распространение получили методы вычислительной гидродинамики и их практическая реализация с использованием программного комплекса Fluent. В работе представлена математическая модель течения холодного плазмообразующего газа и результаты численного моделирования аэродинамики разрядной камеры плазматрона в среде Fluent. Алгоритм решения задачи в данном программном комплексе следующий: создание геометрии и расчетной сетки в любом препроцессоре, поддерживающем возможность экспорта в Fluent, затем решение задачи и затем интерпретация результатов решения. В настоящей работе исследовалась разрядная камера плазматрона ВЧИ-11/60 [6]. Геометрия задачи и размеры разрядной камеры представлены на рис. 1 и в таблице 1. Рис. 1 - Общий вид и вид сверху разрядной камеры плазматрона

Деталь	Длина, мм	Диаметр, мм
Газоформирователь	110	70
Кварцевая трубка	300	84
Питатель	200	Внешний: 15 Внутренний: 10
Инжекторы	35	8

Основные уравнения движения газа в разрядной камере в двумерной цилиндрической системе координат имеют следующий вид.

Уравнения движения выражают закон сохранения количества движения и описывает процесс движения газа. Решение уравнения движения представляет собой распределение скорости газа в разрядной камере плазмотрона. Математической основой описания вихревых потоков в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона являются уравнения Навье-Стокса: где \vec{v} – вектор скорости; t – время; ρ – плотность; p – давление; μ – коэффициент кинематической вязкости. В цилиндрической системе координат необходимо решить следующую систему уравнений для составляющих газового потока: Системы уравнений моделей течения газа дополняются граничными условиями применительно к геометрии разрядной камеры ВЧИ-плазмотрона. Граничные условия уравнения движения 1) На входе радиальная скорость задается равной нулю, осевая скорость определяется из заданного расхода газа: $v_z = \frac{Q}{S}$, где Q - расход плазмообразующего газа (заданная величина), S - площадь поперечного сечения плазмотрона, ρ - плотность плазмообразующего газа. 2) На оси плазмотрона из условия осевой симметрии имеем: $v_r = 0$; 3) Скорость плазмы на внутренней стенке принимается равной нулю: $v_r = 0$; 4) На выходе плазмотрона скорость газа полностью определяется газодинамическими процессами вверх по течению: Численное решение сформулированной выше математической модели реализовано в пакете Fluent. Результаты расчета Проведен расчет по представленной модели для двух видов плазмообразующего газа: воздуха и аргона. Начальные скорости подачи газов: 1 и 7 м/с. Результаты расчета представлены на рис. 2-4. Рис. 2 - Поля скоростей воздуха и аргона при скорости подачи газа 1 м/с Рис. 3 - Распределения давлений воздуха и аргона при скорости подачи газа 1 м/с Рис. 4 - Поля скоростей воздуха и аргона при скорости подачи газа 7 м/с Как видно из рисунков 2-4, картины течения для воздуха и аргона практически идентичны. То есть можно утверждать, что газодинамика разрядной камеры плазмотрона практически не зависит от выбора плазмообразующего газа. Установлена аэродинамическая картина течения газа в газоразрядной камере ВЧИ-плазмотрона, для которой характерным является существование зоны обратного вихревого течения. Это объясняется тем, что за счет начальной окружной закрутки подаваемого через газоформирователь газа возникает сложная газодинамическая картина течения с рециркуляционной зоной. Кроме того, обращают на себя внимание отрицательные значения давления вблизи оси газоразрядной камеры. Моделирование также показало, что общая картина потоков при изменении скорости подачи газа в изучаемом диапазоне качественно не меняется. Предложенная математическая модель и программный комплекс позволяют расчетным путем определять геометрические и режимные характеристики газоразрядных камер индукционных плазмотронов, предназначенных для высокотемпературной обработки дисперсных материалов с целью получения частиц с заданными свойствами. Разработанная модель хорошо описывает аэродинамику газоразрядной камеры плазмотрона ВЧИ-11-60.

Полученное распределение поля скорости качественно согласуется с картиной течения, описанной в [7]. Полученные результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях и математическом моделировании движения и нагрева мелкодисперсных частиц в плазменной струе и выборе наилучшего режима процесса сфероидизации порошкового материала, а также могут быть полезны достаточно широкому кругу специалистов в области физики и техники низкотемпературной плазмы высокочастотного индукционного разряда, а также различного рода энергетических установок, работа которых основана на использовании принципа ВЧ-индукционного нагрева газа.