

А. В. Герасимов, О. Б. Игнатов, В. Е. Катнов,
О. Ю. Пронин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПЛАЗМОТРОНА ВЧИ-11/60

Ключевые слова: газодинамика, численная модель, скорость, давление.

Представлена математическая модель движения холодного плазмообразующего газа в газоразрядной камере высокочастотного индукционного плазмотрона. Модель основана на совместном решении системы уравнений движения и неразрывности. Представлены расчеты полей скорости и давления с помощью пакета Fluent. Численное решение задачи проведено для различных плазмообразующих газов и широкого диапазона скоростей и давлений в потоке плазмформирующего газа.

Keywords: gas dynamics, numerical modeling, velocity, pressure.

A mathematical model of the motion of cold plasma-forming gas in the discharge chamber of high-frequency induction plasma torch is introduced. The model is based on the simultaneous solution of motion and continuity equations. We present calculations of velocity and pressure fields using the "Fluent" package. Numerical solution is found for different plasma-forming gases and a wide range of conditions (pressure, velocity) in the flow of the plasma-forming gas.

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 плазмотрона, что в свою очередь определяет характер движения частиц в плазме.

Наиболее распространенная конструкция ВЧИ-плазмотрона 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 газотворителем, через который подается рабочий газ, истекающий после прохождения зоны разряда в рабочую часть установки. Конструкция газотворителя 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 плазмотрона 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 плазмотрона ВЧИ-11/60 [6]. Геометрия задачи и размеры разрядной камеры представлены на рис. 1 и в таблице 1.

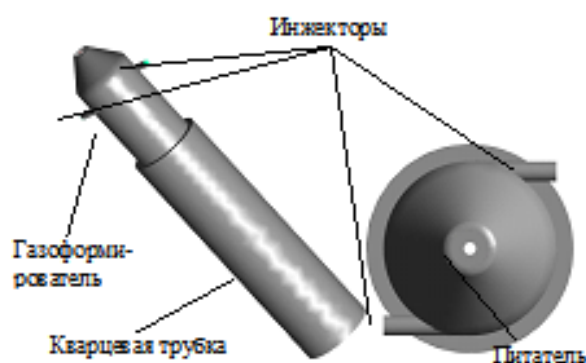


Рис. 1 - Общий вид и вид сверху разрядной камеры плазмотрона

Таблица 1 - Размеры плазмотрона

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

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:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = -\rho^{-1} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{v};$$

$$\text{div } \mathbf{v} = 0.$$

где $\mathbf{v} = \{v_1; v_2; v_3\}$ – вектор скорости; t – время; ρ – плотность; p – давление; ν – коэффициент кинематической вязкости.

В цилиндрической системе координат необходимо решить следующую систему уравнений для составляющих газового потока:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_r}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right), \\ \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_\phi}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_\phi}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \phi} + \nu \left(\nabla^2 v_\phi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_z}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right], \\ \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r v_z)}{\partial z} + \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} &= 0. \end{aligned}$$

Системы уравнений моделей течения газа дополняются граничными условиями применительно к геометрии разрядной камеры ВЧИ-плазмотрона.

Граничные условия уравнения движения

1) На входе радиальная скорость v_r задается равной нулю, осевая скорость v_z определяется из заданного расхода газа:

$$v_r = 0; v_z = \frac{Q}{S \rho}.$$

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:

$$v_r = 0; \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0.$$

3) Скорость плазмы на внутренней стенке принимается равной нулю:

$$v_r = 0; v_z = 0.$$

4) На выходе плазмотрона скорость газа полностью определяется газодинамическими процессами вверх по течению:

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0$$

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.

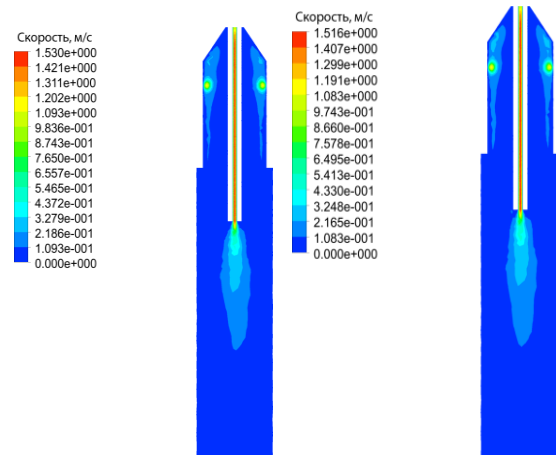


Рис. 2 - Поля скоростей воздуха и аргона при скорости подачи газа 1 м/с

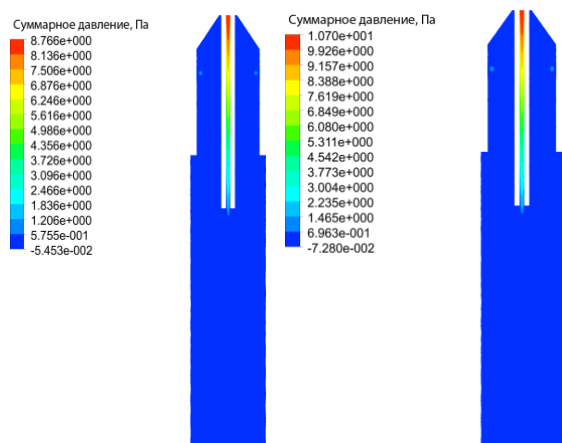


Рис. 3 - Распределения давлений воздуха и аргона при скорости подачи газа 1 м/с

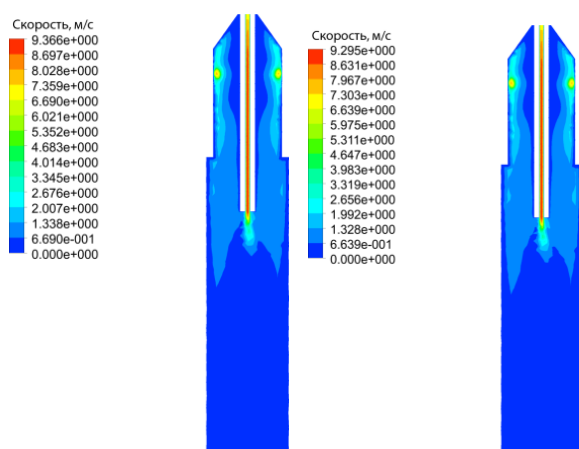


Рис. 4 - Поля скоростей воздуха и аргона при скорости подачи газа 7 м/с

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 нагревания 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 ВЧИ-индукционного нагрева газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по госконтракту 16.552.11.7012.

Литература

1. С.В. Дресвин, С.Г. Зверев Теплообмен в плазме. СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2008. 212 с.
2. О.Т. Данилова Переработка металлосодержащих отходов в плазме высокочастотного индукционного разряда Вестник СамГУ Естественная серия. 2005. №2(36). С. 168-173
3. Е.П. Прокопьев, С.П. Тимошенко, С.А. Дьячков Моделирование и оптимизация процесса синтеза мелкодисперсных порошков оксидов, кремния и диэлектрического стекловидного материала состава SiO_2 - Al_2O_3 - BaO в высокочастотной индукционной воздушной и аргон-кислородной плазме. Теоретические основы химической технологии. 2002. Т.36. №5. С.500-505.
4. С.П. Тимошенко, Е.П. Прокопьев, С.А. Дьячков. Синтез мелкодисперсных порошков в высокочастотной плазме. Физика и химия обработки материалов. 2002. №5. С.26-31.
5. Нигматулин Р.И. Основы механики и гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

6. Гайнуллин Р.Н., Герасимов А.В., Герке А.Р., Зеленко О.В., Кирпичников А.П. Сопряженное моделирование процессов электродинамики и теплообмена в газоразрядной камере высокочастотного индукционного плазмотрона.

7. Рыкалин Н.Н., Сорокин Л.М. Металлургические ВЧ-плазмотроны. Электро- и газодинамика. М.:Наука, 1987. 161 с.

© **А. В. Герасимов** – д-р техн. наук, проф. КНИТУ, gerasimov@kstu.ru; **О. Б. Игнатов** – асп. КНИТУ; **В. Е. Катнов** – канд. хим. наук, доц. КНИТУ, vkatnov@yandex.ru; **О. Ю. Пронин** – магистр КНИТУ.