

01;04

## **Моделирование плазменного процесса получения нанопорошковых материалов с помощью комбинированного плазмотрона**

© В.Я. Фролов, Д.В. Иванов, М.А. Шибяев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: eie@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 20 февраля 2014 г.

Произведен анализ процессов, происходящих при получении нанопорошков с использованием комбинированного плазмотрона. Приводятся результаты математического моделирования плазменных процессов. Представлены результаты расчетов движения и нагрева мелкодисперсного порошка в плазменной струе на выходе комбинированного плазмотрона. На основании анализа полученных результатов моделирования даются рекомендации по выбору режима работы плазмотрона.

Интерес к различным плазменным технологиям, в том числе к технологиям получения наноматериалов, в настоящее время достаточно велик [1–3]. Существующие способы получения нанопорошков можно разделить на две группы: механические и физико-химические. Одним из известных физико-химических методов является получение нанопорошка путем его осаждения из паровой фазы. Перспективной разновидностью этого метода является плазмохимический синтез наночастиц [4], позволяющий достичь высокой производительности и гибко регулировать параметры конечного продукта.

Для получения термической плазмы в промышленности используют в основном 2 вида электрических разрядов: дуговой постоянного тока и высокочастотный с индуктивно связанной плазмой (ВЧИ). При использовании комбинированного плазмотрона для создания и поддержания горения объемной плазмы ВЧИ-разряда используется дуговой плазмотрон постоянного тока, в результате чего удается поддерживать горение в различных плазмообразующих средах, в том числе в средах с повышенной энтальпией.

Ранее в работах [5] и [6] были описаны результаты моделирования дуговой и ВЧИ-частей комбинированного плазмотрона, работающих по отдельности. В данной работе рассмотрен процесс генерирования плазмы в комбинированном плазмотроне (совместно в его дуговой и ВЧИ-части), а также процесс подачи мелкодисперсного порошка в плазменную струю и его нагревание (описание процессов охлаждения и конденсации — см., например, в работе [7]), установлены режимы получения наноматериалов повышенной производительности. Применяемая методика расчета параметров плазмы подробно описана в работе [8].

Расчеты параметров плазмы в комбинированном плазмотроне производились в двумерной постановке в среде ANSYS Fluent. Для расчета электромагнитных процессов были написаны соответствующие функции на языке C (UDF — user defined functions).

Моделирование работы комбинированного плазмотрона проводилось при следующих параметрах режима его работы: мощность дуги постоянного тока 10–20 kW, расход газа (аргон) через дуговую часть 0.5–1.5 g/s, частота тока индуктора 5.28 MHz, мощность ВЧИ-плазмы 20–30 kW, расход газа (аргон) через ВЧИ-плазму 1–3 g/s.

Анализ результатов моделирования плазменных процессов в комбинированном плазмотроне показал, что наиболее благоприятные условия для испарения мелкодисперсного порошка в плазменной струе (низкая скорость плазмы при высокой ее температуре) создаются в следующем режиме работы: мощность дуговой части — 10 kW, мощность ВЧИ-части — 25 kW, частота тока индуктора 5.28 MHz, расход аргона через дуговую плазму 0.5 g/s, через ВЧИ-разряд 2.5 g/s. Полученные в этом режиме результаты, а именно радиальные распределения температуры и скорости плазмы на выходе плазмотрона, используются в качестве исходных данных при моделировании второго этапа процесса — подачи частиц мелкодисперсного порошка в плазменную струю, их нагревания и испарения.

Движение частицы массой  $m_s$  в потоке плазмы подчиняется второму закону Ньютона [9,10]:

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i. \quad (1)$$

На движение частиц диаметром меньше  $30 \mu\text{m}$  оказывают наибольшее влияние следующие силы:  $\mathbf{F}_D$  — сила газодинамического напора плазмы,  $\mathbf{F}_{TH}$  — сила термофореза,  $\mathbf{F}_B$  — броуновская сила. Детальное описание модели движения частицы в плазме можно найти в работе [10].

Безградиентное нагревание частицы массой  $m_s$  удельной теплоемкостью  $c_{ps}$  в плазме описывается известной формулой [11]:

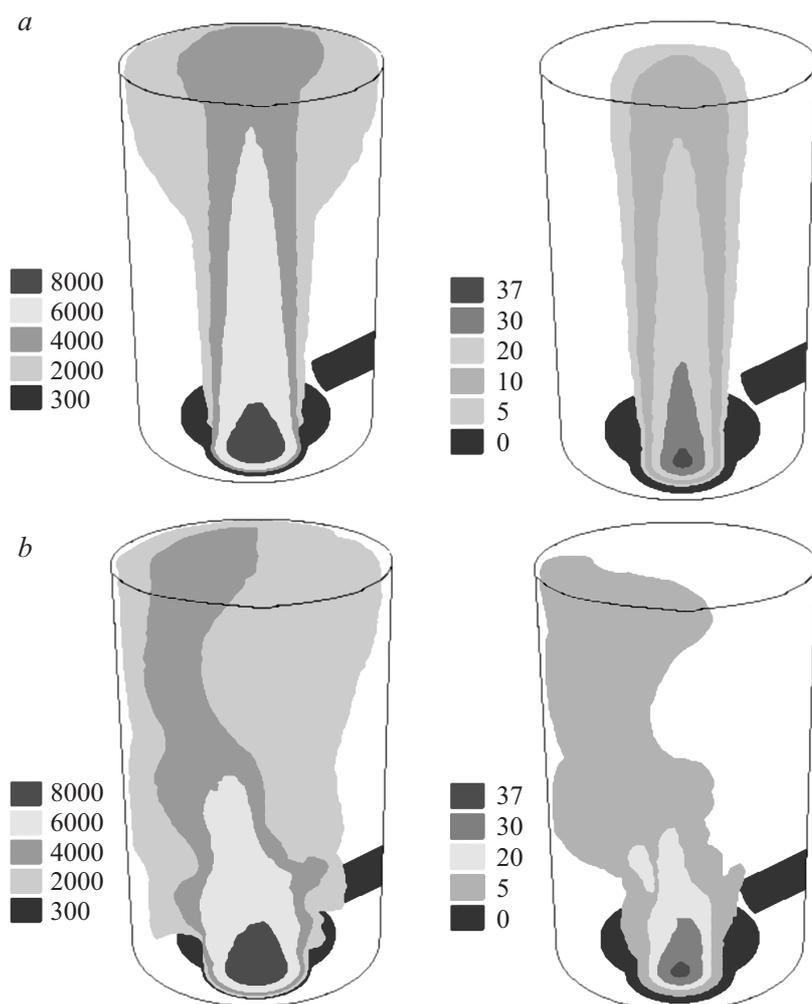
$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = \sum_i P_i. \quad (2)$$

На разных стадиях нагрева источниками и потерями мощности для частицы являются:  $P_p$  — мощность конвективно-кондуктивной теплопередачи от плазмы к частице;  $P_{rad}$  — мощность излучения частицы;  $P_{melt}$  — мощность, затрачиваемая на плавление частицы;  $P_{vap}$  — мощность, затрачиваемая на испарение (мощность, уносимая испарившейся массой);  $P_{cloud}$  — мощность, затрачиваемая на нагрев парового облака в пограничном слое частицы;  $P_{boil}$  — мощность, затрачиваемая на кипение. Детальное описание модели нагревания частицы в плазме можно найти в работе [10].

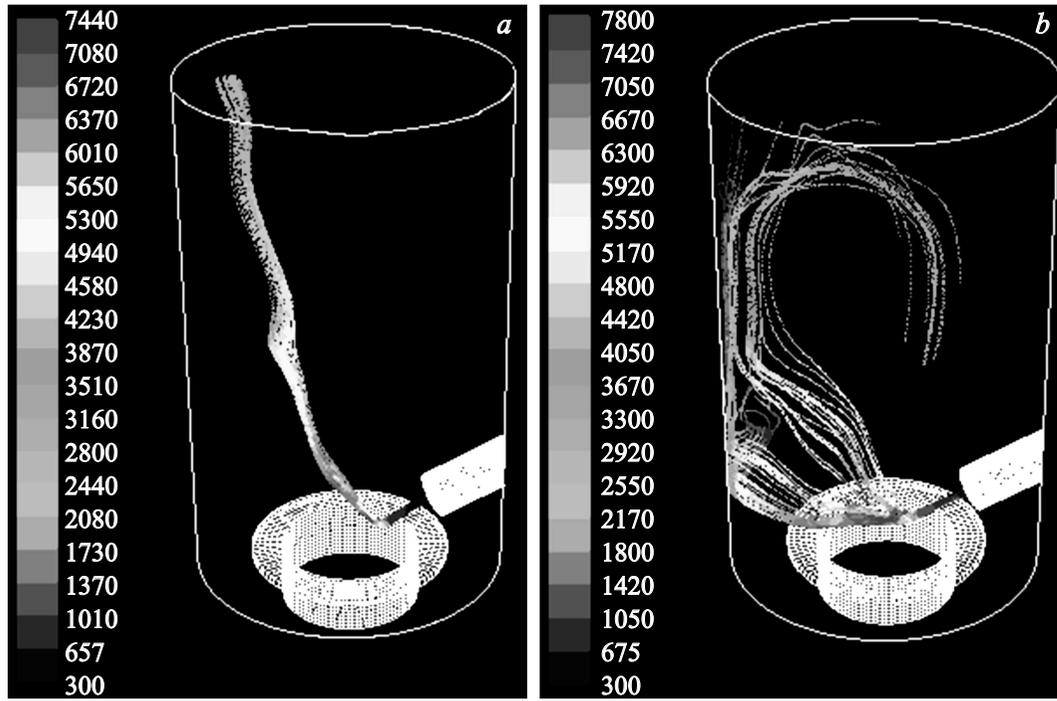
При моделировании плазменной струи, загруженной мелкодисперсным порошком, в модели поведения плазмы учитываются потери импульса и мощности, которые, согласно уравнениям (1) и (2), плазма передает частицам [10]. В данной работе расчеты параметров плазменной струи, загруженной мелкодисперсным порошком, проводились в среде ANSYS Fluent в трехмерной постановке, плавление и испарение частиц не учитывалось. Моделировалась подача частиц порошка диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) диаметром  $15 \mu\text{m}$ .

Была проведена серия расчетов с одинаковой скоростью подачи порошка ( $10 \text{ m/s}$ ) в плазменную струю и различным его расходом 2, 3, 4 и  $5 \text{ kg/h}$ . Также производились расчеты при одинаковом расходе диоксида титана ( $4 \text{ kg/h}$ ) и различной скорости его подачи 5, 8, 10, 12 и  $15 \text{ m/s}$ .

Температура и осевая скорость плазмы в случае без подачи порошка и с его подачей (расход порошка  $4 \text{ kg/h}$ , скорость подачи  $10 \text{ m/s}$ )



**Рис. 1.** Температура (слева, К) и осевая скорость (справа, m/s) плазмы в плазменном реакторе (диаметр реактора 130 mm, его высота 220 mm) при различных режимах работы: *a* — без подачи порошка, *b* — с подачей порошка: расход порошка 4 kg/h, начальная скорость подачи 10 m/s.



**Рис. 2.** Траектории движения и температура частиц ( $T_s, K$ ) диоксида титана (начальная скорость 10 м/с) в плазменном реакторе (диаметр реактора 130 мм, его высота 220 мм) при различных расходах порошка: *a* — 4, *b* — 5 kg/h.

показаны на рис. 1. Видно, что без подачи порошка плазменная струя обладает осевой симметрией, которая существенно нарушается при подаче порошка через шихтопровод.

Вначале была проведена серия расчетов с различным расходом порошка (рис. 2). Проведенные расчеты показали, что нагрев частиц зависит от их расхода: чем больше расход, тем меньше частицы нагреваются. В то же время при малых расходах порошка частицы отбрасываются в периферийные (холодные) области плазмы. На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что порошок будет эффективно испаряться при его расходе 3–4 kg/h (в этих режимах большая часть порошка движется в центральной зоне плазменной струи).

Затем были рассчитаны варианты, при которых расход диоксида титана был постоянным (4 kg/h), а скорость его подачи варьировалась: 5, 8, 12, 15 m/s. Было замечено, что при малых скоростях подачи порошок диоксида титана как бы отскакивает от плазменной струи, при этом не нагреваясь, а при больших значениях, наоборот, пролетает струю насквозь, нагреваясь незначительно, а затем быстро охлаждаясь вблизи стенки реактора. Наилучшие условия для испарения исходного порошка создаются при скорости подачи 10 m/s.

Таким образом, в работе получена адекватная модель плазменной струи, создаваемой комбинированным плазмотроном (при совместной работе его дуговой и ВЧИ-частей). Модель позволяет варьировать мощность плазмотрона, расход плазмообразующего газа, расход порошка, его начальную скорость и др.

На следующих этапах работы необходимо включить в разрабатываемую модель все детали процесса испарения частиц, изменение теплофизических свойств плазменной струи из-за присутствия паров материала порошка, процесс конденсации пара в виде наночастиц.

## Список литературы

- [1] Воронин П.В., Кривченко В.А., Иткис Д.М., Семенов Д.А., Рахимов А.Т. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 45–52.
- [2] Быстров Ю.А., Ветров Н.З., Лисенков А.А. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 20. С. 50–56.
- [3] Сивков А.А., Никитин Д.С., Пак А.Я., Рахматуллин И.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 2. С. 15–20.

- 
- [4] *Frolov V.Ya., Ivanov D.V.* // VII International Conference PPPT-7 (Plasma Physics and Plasma Technology): Proc. of the Conference. Minsk: Kovcheg LTD, 2012. V. 2. P. 527–530.
- [5] *Фролов В.Я., Лопота А.В., Петров Г.К., Иванов Д.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4(110). С. 319–323.
- [6] *Фролов В.Я., Лопота А.В., Иванов Д.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 1(117). С. 146–151.
- [7] *Gonzales N., El Morsli M., Proulx P.* // J. Thermal Spray Technology. 2008. V. 17. N 4. P. 533–550.
- [8] *Дресвин С.В., Иванов Д.В., Фролов В.Я.* // Индукционный нагрев. 2012. № 4(22). С. 25–34.
- [9] *Pfender E., Lee Y.C.* // Plasma Chem. Plasma Process. 1985. V. 5. N 3. P. 211–237.
- [10] *Фролов В.Я., Лопота А.В., Зверев С.Г., Иванов Д.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4(110). С. 308–319.
- [11] *Lee Y.C., Chyou Y.P., Pfender E.* // Plasma Chem. Plasma Process. 1985. V. 5. N 4. P. 391–414.