

УДК 537.523: 533.924

С.Г.Зверев (асп. каф. ЭиЭ), О.Н.Фейгенсон (асп. каф. ЭиЭ),
 Р.Ю.Зарембо (6 курс, каф. ЭиЭ), С.В.Дресвин, д.т.н., проф.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В СТРУЕ ВЧИ ПЛАЗМЫ

В настоящее время большое количество плазменных процессов связано с нагревом порошковых материалов. Это такие процессы, как напыление покрытий, сфероидизация порошков, испарение веществ и т.п. В современной научно-технической литературе плазменная струя, загруженная большим количеством мелких частиц, получила название запыленной [1].

Предлагаемая методика исследования запыленных плазменных струй базируется на теории теплообмена одиночной частицы с плазмой [2, 3].

Математические расчеты проводились для струй высокочастотных индукционных плазмотронов различной мощности и конструкций. Для подтверждения правильности математической модели были проведены экспериментальные исследования на горизонтальной плазменной установке частотой 5,28 МГц, мощностью 60 кВт.

Взаимодействие между группой частиц и струей плазмы выражается, главным образом, в передаче энергии от плазмы к частицам. Частицы нагреваются и ускоряются в плазменной струе. Струя же, отдавая энергию, охлаждается и затормаживается. Считаем, что экранирования одного слоя частиц другим не происходит, т.к. частицы находятся на некотором расстоянии друг от друга и их пограничные слои не перекрываются. Таким образом, считаем что энергия, затраченная на ускорение и нагревание группы частиц равна произведению количества частиц на энергию, переданную плазмой одной частице. Считаем, что группа частиц появляется в выходном сечении плазмотрона мгновенно, размер и начальные скорости частиц одинаковы, т.е. не рассматриваем задачу ввода частиц в плазму. Принимаем допущение, что частица нагревается равномерно по всему объему, как хорошо теплопроводящее тело, т.е. температура поверхности частицы примерно равна температуре в ее центре. Метод расчета сводится к совместному решению следующих уравнений:

- уравнения нагревания частицы в высокотемпературном потоке:

$$\rho_s \cdot C_{ps} \cdot \frac{dT_s}{dt} = \frac{6 \cdot \alpha}{d_s} \cdot (T_p - T_s) - \frac{6 \cdot \varepsilon}{d_s} \cdot \sigma \cdot T_s^4;$$

- уравнение баланса энергии для плазменной струи с учетом “охлаждающего” влияния группы частиц:

$$\rho_p \cdot C_p \cdot \left[v_z \cdot \frac{\partial T_p}{\partial z} - v_r \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_p \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - U_{rad} - \frac{6 \cdot \alpha}{d_s} \cdot (T_p - T_s) \cdot n;$$

(излучением группы n частиц пренебрегаем).

- уравнение движения частицы в потоке:

$$\rho_s \cdot \frac{dv_s}{dt} = C_d \cdot \frac{3 \cdot \rho_p \cdot (v_p - v_s)^2}{4 \cdot d_s};$$

- уравнение движения плазменной струи с учетом “затормаживающего” влияния группы частиц:

$$\rho_p \cdot \left[v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] = - \frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu_p \cdot \text{grad} v_z) - C_d \cdot \frac{3 \cdot \rho_p \cdot (v_p - v_s)^2}{4 \cdot d_s} \cdot n.$$

Для расчета взаимодействия между группой частиц и плазменной струей необходимо знать поля температур и скоростей струи, а также размер и свойства материала частиц. Температурное и скоростное поля струи плазмы можно определить экспериментально или рассчитать [3]. Рассмотрим для примера загруженную частицами струю ВЧИ плазмотрона мощностью 60 кВт частотой 5,28 МГц. Частицы - SiO₂ (Ø 50 мкм, расход – 6 кг/час).

Для упрощенного оценочного расчета разобьем плазменную струю на несколько продольных участков, на которых температуру и скорость струи будем считать постоянной (средней по участку), как показано на рис. 1.

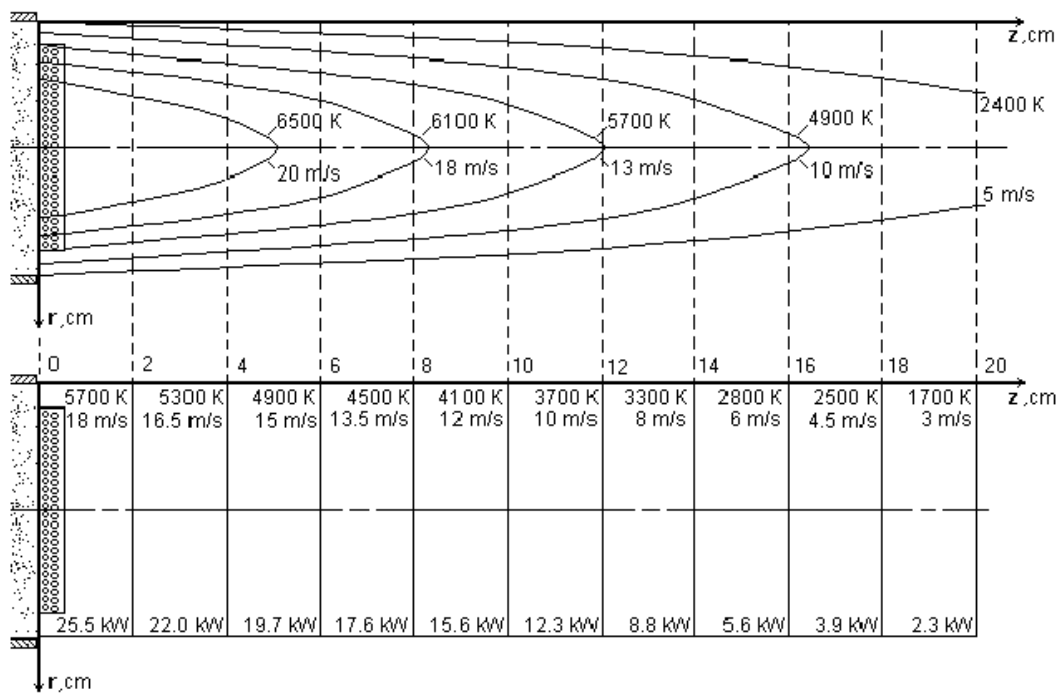


Рис. 1. Пример разделения плазменной струи на участки с одинаковыми T_p и V_p

Методика оценочного расчета состоит в следующем:

- 1) помещаем в плазменную струю группу частиц, как показано на рис. 1;
- 2) рассчитываем ускорение и нагревание одиночной частицы в заданном поле температур и скоростей струи в первый момент времени, определяем Δz - перемещение частицы (группы частиц) в плазме;
- 3) определяем мощность, затраченную струей на нагревание и перемещение группы частиц, и вычитаем ее из начальной мощности плазменной струи; кроме того, учитываем потери энергии плазмы на излучение и теплообмен с окружающей средой с помощью рис. 1;
- 4) корректируем поля температур и скоростей плазменной струи;
- 5) продолжаем расчет с п. 2 до тех пор, пока мощность плазменной струи превышает мощность, необходимую для ускорения и нагревания группы частиц на следующем этапе.

На рис. 2 представлены результаты упрощенного оценочного расчета по приведенной методике.

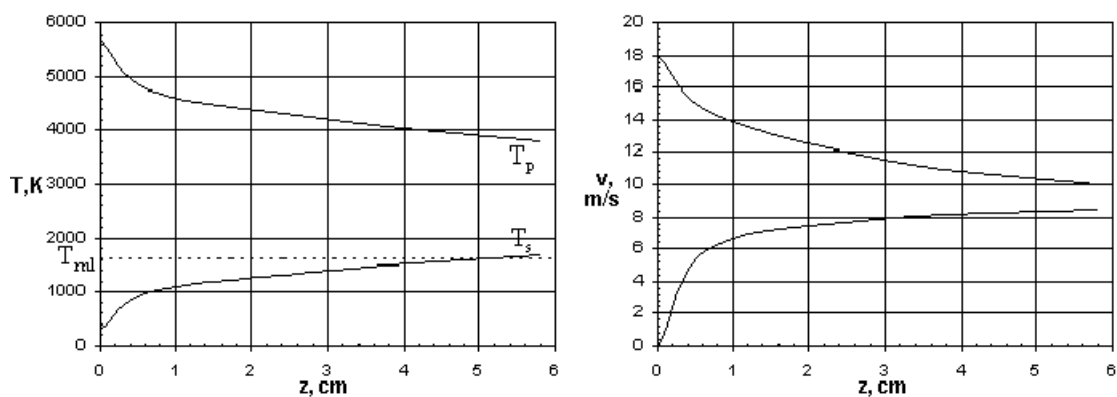


Рис.2. Результаты расчета загруженной частицами SiO_2 струи ВЧИ плазмотрона частотой 5,28 МГц, мощностью 54 кВт (расход порошка – 6 кг/час)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Жуков М.Ф., Солоненко О.П. Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов. Новосибирск. ИТ СО АН СССР. 1990.
2. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении.– Л.: Машиностроение. 1979.
3. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.М. и др. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1992.