

М.Х. Аунг, С.П.Т. Аунг

Московский физико-технический институт (государственный университет)

1. Введение.

Разработка целого ряда новых пучково-плазменных производственных технологий требует изучения транспортировки электронных пучков (ЭП) через запыленные среды. В рабочих зонах плазмохимических реакторов, оборудования для обработки материалов, установок очистки газов от токсичных загрязнений, плазменных энергоустановок имеются области, в которых ЭП проходит через газ, содержащий распыленные мелкодисперсные частицы [1].

Настоящая работа посвящена компьютерному моделированию сложных плазмотехнических систем, предназначенных для пучково-плазменной обработки порошков различных материалов. Рассматривалась задача расчёта пространственных полей температуры газа и пылевых частиц в различных условиях генерации плазмы, возбуждаемой инъекцией непрерывного концентрированного ЭП в запыленную среду, т.е моделировалась электронно-пучковая плазма (ЭПП) твердого аэрозоля.

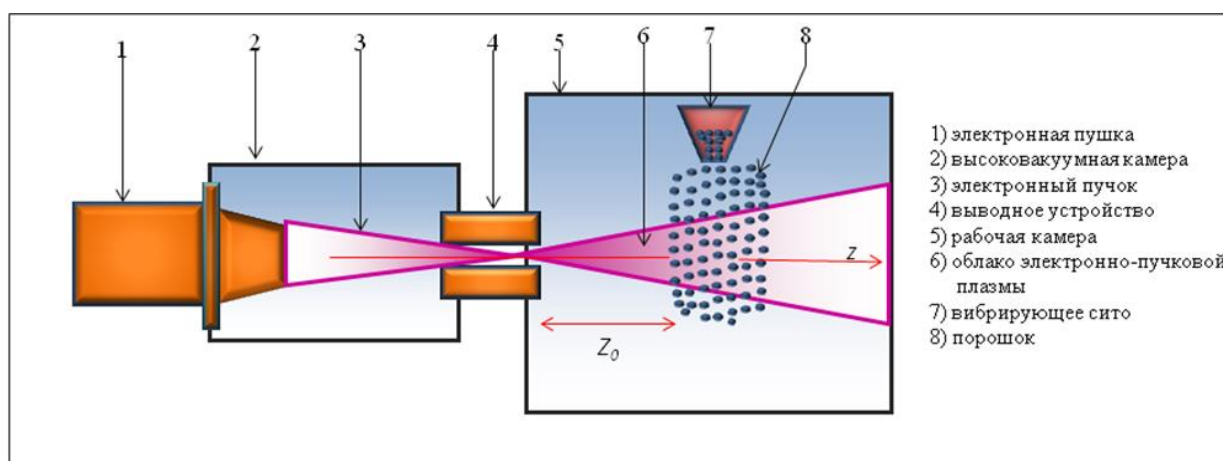


Рис. 1. Схематичное изображение установки для компьютерного моделирования ЭПП

2. Постановка вычислительного эксперимента

Вычислительные эксперименты проводились с целью установить, каким образом параметры, характеризующие ЭП, газовую фазу и конденсированную дисперсную фазу влияют на температурные поля в аэрозольном объеме. При этом использовалась методика компьютерного моделирования, согласно которой самосогласованным образом рассматривались следующие процессы (рис. 1):

- рассеяние быстрых электронов в газе (упругое и неупругое);
- рассеяние быстрых электронов на частицах конденсированной дисперсной фазы (упругое и неупругое);
- поглощение электронов пылевыми частицами;
- поглощение электронного пучка газом;
- нагрев плазмообразующего газа за счёт частичной диссипации энергии первичных электронов при их торможении в газе;
- нагрев твердых частиц аэрозоля бомбардировкой быстрыми электронами пучка и электронами промежуточных энергий, образующихся при генерации ЭПП;
- теплообмен теплопроводностью между пылевыми частицами и окружающей их плазмой;
- диффузия частиц ЭПП в плазменном объеме; диффузия заряженных частиц плазмы считалась амбиполярной;
- Нарботка и гибель частиц плазмы в различных процессах с участием всех компонентов ЭПП.

Распространение ЭП в плотных средах, как в газе, так и в частицах конденсированной дисперсной фазы, численно моделировалось методом Монте-Карло, который определяет постановку задачу в граничных условиях. Область моделирования была снаружи ограничена цилиндром радиуса 12,5 см и длиной 30 см, внутри которого могли располагаться подобласти с существенно большей плотностью среды. При моделировании шаг движения электрона по траектории задавался в несколько раз меньшим, чем размер расчетной сетки. Это способствовало дополнительному повышению точности решения уравнения теплопроводности.

3. Результаты вычислительных экспериментов

Расчеты проводились для различных условий генерации ЭПП; при этом варьировалось давление газа P_g (в диапазоне 0,1-5,0 Торр), сила тока ЭП I_b (1-10 мА), и концентрация твердых частиц аэрозоля n_d . Предполагалось, что $n_d = const$ по всему объему аэрозольного облака. Энергия электронов принималась равной 30 кэВ, что соответствовало условиям физических экспериментов, которые проводились параллельно с вычислительными экспериментами. Область, занятая аэрозолем, представляла собой слой толщиной 15 см, перпендикулярный оси инжекции пучка z (см. рис. 2). Расстояние z_0 от точки инжекции пучка до пылевого слоя принималось равным 15 см, а начальные температуры газа T_g и твердых частиц T_d (сферические частицы порошка Al_2O_3 или углерода с характерным размером $D \sim 50$ мкм) считались одинаковыми и равными $20^\circ C$. В качестве плазмообразующих газов рассматривались воздух и гелий.

Вычислительные эксперименты выявили некоторые важные закономерности.

- 1) При достаточно малой концентрации пылевых частиц ($n_d < 10^3 \text{ см}^{-3}$) продольный профиль температуры газовой фазы $T_g(z)$ имеет максимум, положение которого на оси z зависит от давления газа: чем выше P_g , тем ближе к точке инжекции пучка расположен этот максимум.
- 2) При высоких концентрациях пылевых частиц ($n_d > 10^6 \text{ см}^{-3}$) слой аэрозоля ведет себя, как компактное твердое тело, и для приближенного расчета его температуры можно решать задачу о нагреве плоской пластины, контактирующей с ЭПП. В этом случае профиль $T_d(z)$ определяется теплопроводностью аэрозоля: на поверхности пылевого слоя $T_d \approx T_g$ и может достигать нескольких сотен градусов, а на достаточной глубине аэрозоль может оказаться практически не нагретым.
- 3) При малых и умеренных концентрациях $n_d < 10^5 \text{ см}^{-3}$ вблизи поверхности пылевых частиц $T_d \approx T_g$, а на некотором удалении от отдельно взятой частицы $T_d > T_g$.
- 4) Зависимости температур газа и конденсированной дисперсной фазы от силы тока пучка $T_d(I_b)$ и $T_g(I_b)$ практически линейные, по крайней мере, для малых $n_d < 10^3 \text{ см}^{-3}$. Формально это может привести к тому, что при достаточно больших I_b значения T_d могут достигать нескольких тысяч градусов. Это лишено физического смысла и объясняется тем, что вычислительная модель не учитывает фазовых переходов в материале пылевых частиц.

Следует отметить, что вычислительная модель не учитывает также электрофизические процессы в аэрозоле, облучаемом электронным пучком. В частности, не рассматривается электростатическая зарядка пылевых частиц в ЭПП – явление, которое может нарушить однородность слоя аэрозоля, а при малых давлениях газа ($P_g < 1$ Торр) и достаточно больших токах пучка ($I_b > 5$ мА) способно вызвать интенсивный вынос пылевых частиц из плазменного облака [2].

Литература

1. M.N. Vasiliev, A.H. Mahir, T.M. Vasilieva. Generation and Applications of Electron Beam Plasmas of Aerosols // IUMRS Int. Conf. in Asia IUMRS-ICA 2008, December 9-13, 2008, Nagoya, Japan.
2. Vasiliev M.N., Vorona N., Gavrikov A. The investigation of heating and charging of dust particles under the electron beam action // Dusty Plasmas in Application. 3-rd Int. Conf. on the Physics Dusty and Combustion Plasmas. Proceedings. August 25 - 29, 2010. Odessa, Ukraine. P. 137-138.