

УДК: 537.523:533.924

**А.В.Балашов (асп. каф. ЭиЭ), Д.В.Иванов (асп. каф. ЭиЭ),
Т.А.Максименко (4 курс, каф. ЭиЭ), С.В.Дресвин, д.т.н., проф.**

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВАНИЯ ЧАСТИЦЫ КРЕМНИЯ В АРГОНО-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

В настоящее время все большее значение начинают приобретать новые технологические процессы и установки, основанные на применении плазмы. Хорошо зарекомендовали себя плазменный переплав материалов, сфероидизация и дисперсизация порошков [1]. В электроплазменных процессах можно достичь высоких коэффициентов использования материалов. При плавке и сфероидизации дисперсных материалов коэффициент использования может составлять 90% и более. Сфероидизация и плавка порошков широко распространена в связи с большой потребностью в таких материалах как, например, сферические частицы тугоплавких материалов и сплавов [2]. Поэтому изучение поведения дисперсных материалов в плазменном потоке весьма актуально.

В данной работе рассматривается ВЧИ плазменная установка мощностью 10 кВт и частотой 5 МГц. В качестве плазмообразующего газа используется смесь аргона и водорода, причем добавка водорода составляет 3 %. Добавление водорода к аргону нашло широкое применение как эффективный способ увеличения теплосодержания плазменной струи [3]. В этой установке осуществляется процесс очистки и сфероидизации частичек кремния, которые в дальнейшем используются для изготовления фотоэлементов солнечных батарей.

Целью нашей работы было моделирование взаимодействия между плазменным потоком газа и маленькой частицей порядка 50...100 мкм. Параметры плазмы, такие как распределение температуры, скорости, давления и электромагнитного поля, предварительно рассчитаны методом контрольного объема [4]. Для вычисления параметров плазмы изначально необходимо знать свойства плазменной смеси (Ar+H₂). Физические свойства плазмы в зависимости от температуры — вязкость, теплопроводность, потери на излучение, энтальпия, плотность, теплоемкость — взяты из справочной литературы [5].

При рассмотрении процесса нагревания твердой частицы в плазме необходимо рассматривать в совокупности все фазы нагрева: сначала нагрев до температуры плавления, далее плавление, затем нагрев до температуры кипения с одновременным испарением, кипение. В процессе расчета мы сделали ряд допущений: рассматривается только безградиентный нагрев частицы, давление в плазме берется равным 1 атм., не рассматривается влияние паров кремния на свойства плазмы, пренебрегается влиянием частиц на температуру и скорость плазмы. Таким образом, уравнение нагрева частицы можно записать, с учетом всех фаз нагрева, следующим образом:

$$m_s C_{pS} \frac{dT_s}{dt} = \sum_i Q_i = Q_P - Q_{Изл} - Q_{Плавл} - Q_{Испар} - Q_{Кип} - Q_{Пар}$$

где Q_P – удельная мощность теплового потока от плазмы на нагрев частицы за счет теплопроводности; $Q_{ИЗЛ}$ – удельная мощность потерь за счет излучения; $Q_{Плавл}$, $Q_{Испар}$, $Q_{Кип}$, $Q_{Пар}$ – потери при плавлении, при испарении, потери при кипении, потери на нагрев парового облака до температуры плазмы соответственно.

Для расчета движения и нагревания частицы кремния были выбраны следующие начальные параметры: диаметр частицы 57 и 100 мкм, так как для этих диаметров имеются экспериментальные значения, с которыми мы можем сравнить полученные результаты; начальная скорость частицы 8 м/с; начальная температура 300 К; угол между осью плазмотрона и направлением подачи частицы 0, так как частица подавалась параллельно оси плазмотрона. Ниже представлены результаты расчета.

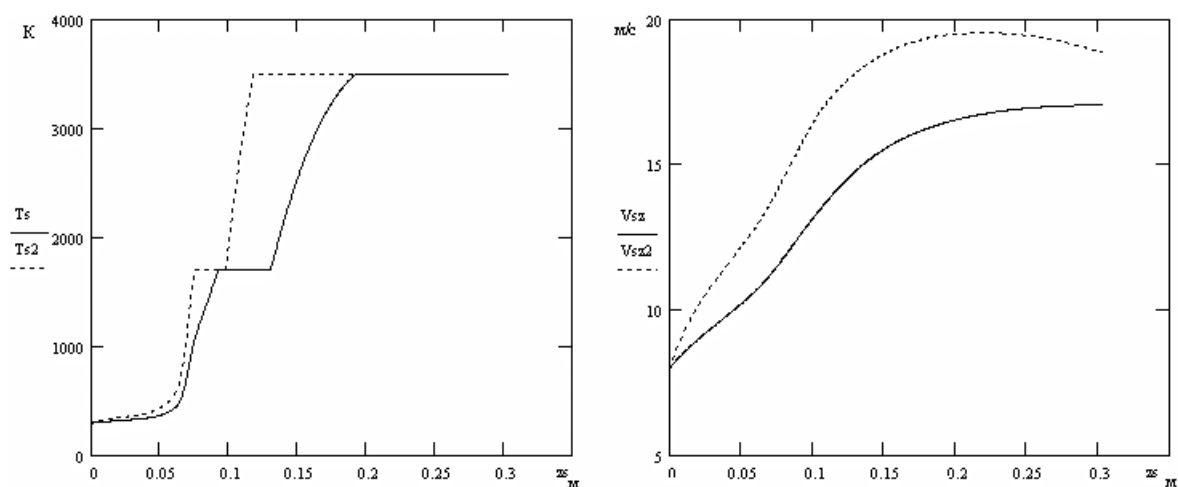


Рис 1. Температура и скорость частицы вдоль траектории движения (T_s , V_s – для диаметра 100 мкм, T_{s2} , V_{s2} – для диаметра 57 мкм)

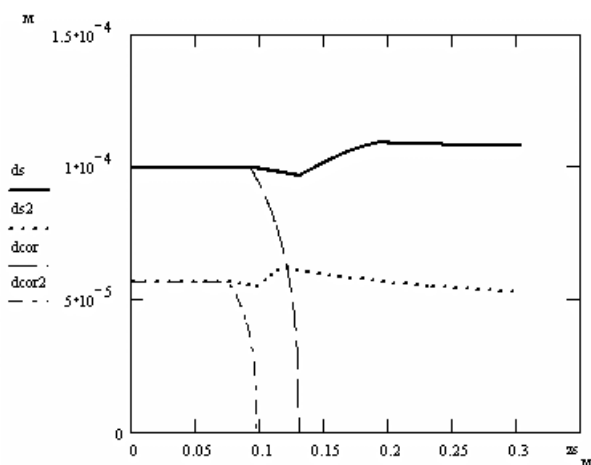


Рис 2. Диаметр частицы вдоль траектории движения (d_s – для диаметра 100 мкм, d_{s2} – для диаметра 57 мкм, d_{cor} , d_{cor2} – диаметр твердого ядра)

На графике температуры частицы мы можем наблюдать все фазы нагрева. На графике скорости видим, что скорость частицы сначала увеличивается, а затем падает, так как в конце струи скорость плазмы становится меньше скорости частицы, и частица тормозится плазмой. Рассматривая график диаметра частицы, видим, что в начале нагрева полный диаметр частицы и диаметр его твердого ядра одинаковые; затем начинается процесс плавления и диаметр твердого ядра уменьшается до нуля, когда процесс плавления закончен. Уменьшение диаметра при плавлении, а затем небольшой его рост связан с изменением плотности частицы при плавлении и дальнейшем нагреве, далее испарение становится преобладающим и диаметр уменьшается. Ниже представлено сравнение экспериментальных данных и данных расчета.

	Диаметр частицы на расстоянии $z = 26.1$ см	Диаметр частицы на расстоянии $z = 30.4$ см
Экспериментальные данные	52 ± 2 мкм	50 ± 2 мкм
Расчетные данные	51.7 мкм	49.94 мкм

В работе принимала участие *Л. Уврель*, студентка Парижского университета П. и М. Кюри. Экспериментальные данные предоставлены проф. *Ж. Амуру*, Парижский университет П. и М. Кюри.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под ред. С.В. Дресвина. – М.: Атомиздат, 1972.
2. Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.
3. Полак Л. С., Словецкий Д. И. // ТВТ. 1974. Т. 12. № 5.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: энергоатомиздат. 1984.
5. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and application. Vol. 1. New York, Plenum press, 1994.