

Математическая модель электростатического управления газопорошковым потоком

В.Д. Валиахметова

*Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева*

Аннотация: Проведено математическое моделирование полета частиц металлического порошка без учета электростатического воздействия и с его учетом.

Ключевые слова: математическое моделирование, лазерная наплавка, управление газопорошковым потоком, электростатическая линза, фокусировка.

В данной работе представлен результат испытания силового воздействия электрического поля на частицы металлического порошка [1-4].

Основные параметры модели: Радиус частиц порошка – 20 мкм, плотность частиц порошка – 7800 кг/м^3 , диаметр входного отверстия – 10 мм, скорость частиц на входе – 10 м/с, высота расчетной области – 0.4 м, радиус расчетной области – 0.1 м, максимальный размер элемента – 0.3 мм, минимальный размер элемента – 0.0082 мм.

Воздействия на частицы порошка осуществлялось несколькими разными силами, все из них учтены в модели:

1. Электростатическая сила воздействия на заряженные частицы;
2. Взаимодействие между частицами
3. Поляризация частиц в поле и дипольное взаимодействие с полем;
4. Сила тяжести.

Соотношение сил в каждый момент времени и при каждом расчетном эксперименте в конечном итоге определяло эволюцию частиц. Задача решалась в аксиально-симметричном приближении для упрощения и ускорения расчетов [5-6].

1. Для начала было проведено моделирование полета частиц под действием гравитации. В результате происходит небольшое ускорение частиц при движении к подложке, поток несильно расширяется к низу.

2. Далее было добавлено межчастичное взаимодействие заряженных частиц, которое описывается следующим уравнением:

$$\vec{F} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N Z Z_j \frac{\vec{r} - \vec{r}_j}{|\vec{r} - \vec{r}_j|^3} \quad (1)$$

Где e – заряд электрона, ϵ_0 – универсальная электрическая постоянная, π – математическая константа, $\pi \approx 3.14\dots$, Z, Z_j – заряды текущей частицы и очередной частицы в сумме, \vec{r}, \vec{r}_j – радиус-векторы текущей частицы и очередной частицы в сумме соответственно, N – полное число частиц, j – номер очередной частицы в сумме.

Результат моделирования представлен на Рис. . Цветом показана абсолютная скорость частиц. Поток уширяется более, чем вдвое. Даже небольшой начальный потенциал, приложенный к частицам, приводит к значительному ухудшению характеристик потока частиц.

3. На следующем этапе включалась поляризация частиц и воздействие электрического поля на них.

В электрическом поле частицы приобретают электрический дипольный момент:

$$\vec{p} = 4\pi\epsilon_0 \vec{E} R^3 \quad (2)$$

где R – радиус частицы.

Расчетный эксперимент проводился при подаче на электроды напряжения: $+6 \cdot 10^5$ В на верхний и $-6 \cdot 10^5$ В на нижний. При этом на поверхности частиц задавался потенциал 100 В. Рис. иллюстрирует

сравнительные положения частиц в полете с учетом дипольного взаимодействия и без него.

При этом, если ширина потока частиц у подложки была около 0.019 м, то при включении в расчет дипольного взаимодействия ширина потока уменьшается до 0.016 м.

4. Добавлено кулоновское взаимодействия электрического поля и заряженных частиц, которое описывается следующим уравнением:

$$\vec{F} = q_s \vec{E} \quad (3)$$

, где заряд каждой частицы:

$$q_s = 4\pi\epsilon_0 R V_{out} \quad (4)$$

, где V_{out} – потенциал на поверхности частицы.

Перед пуском частиц вокруг электродов, рассчитывалось распределение потенциала электростатического поля, результат представлен на Рис. 3.

При этом считалось, что внешние границы расчетного поля заземлены.

После этого с учетом всех действующих сил пускался поток частиц. Результат расчета их полета представлен на Рис. . Видно, что появился эффект фокусирования частиц. [7-11] Этот эффект при заданных параметрах сильно зависит от начального напряжения на поверхности частиц, а, следовательно, от их заряда. Зависимость положения фокуса частиц от напряжения на их поверхности в момент выпуска показана на Рис. .

Видно, что даже такое небольшое увеличение напряжения сильно смещает положение фокуса. Так, при напряжении 110 В фокус смещается вверх на расстояние около 10 см по сравнению с 100 В (см. Рис. , b). Дальше, при повышении напряжения еще на 10 вольт фокус потока втягивается еще на 5 см внутрь электродов (см. Рис. , c).

Исследование проведено в рамках проекта УМНИК-2017.

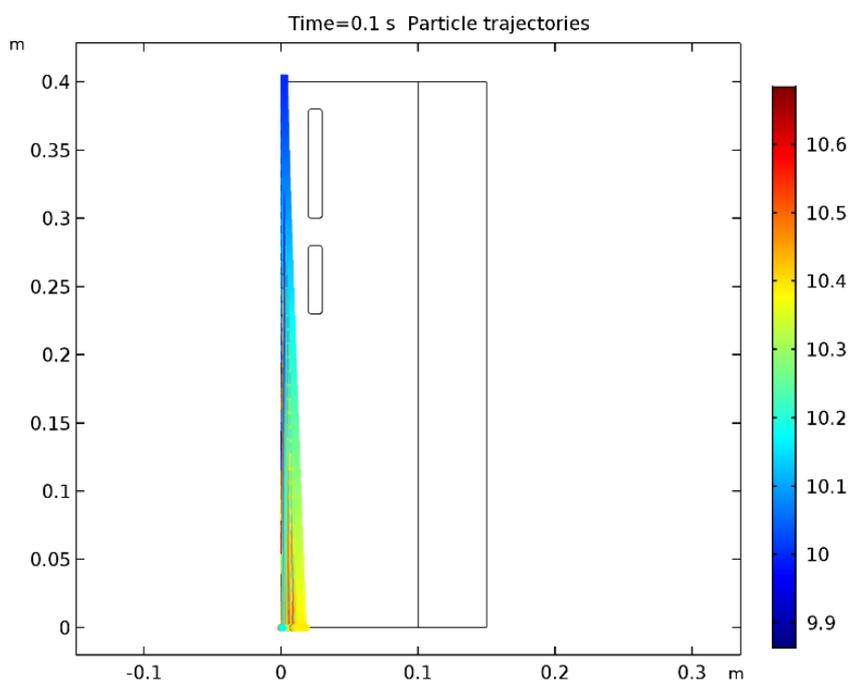


Рис. 1 – Полет частиц под действием гравитации и взаимного отталкивания, начальный потенциал частиц 100 Вольт

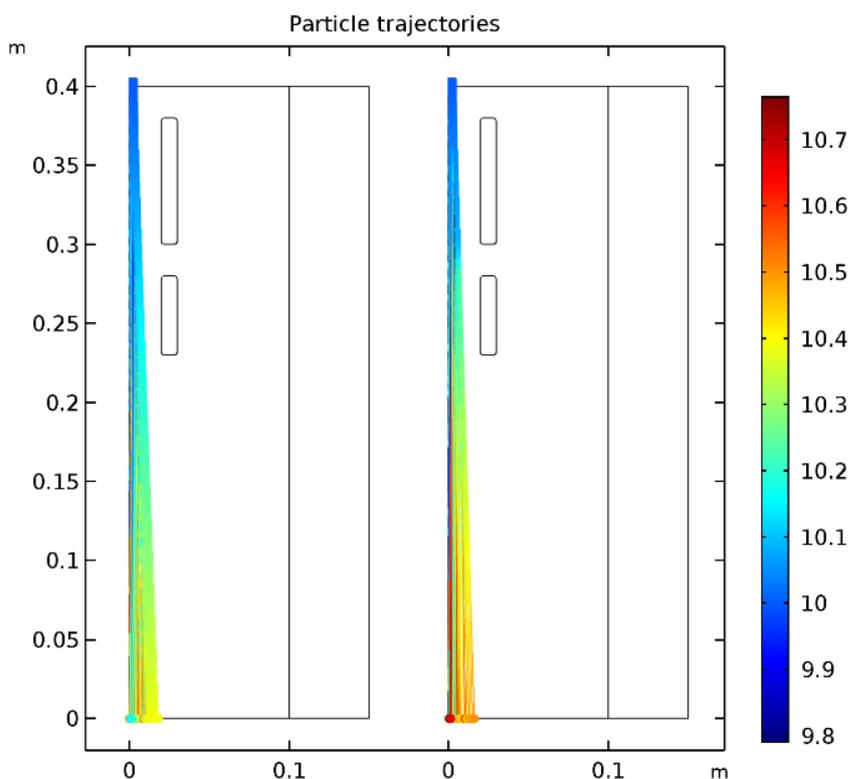


Рис. 2 – Распределение скоростей частиц и их промежуточных положений без учета поляризации (слева) и с учетом ее (справа)

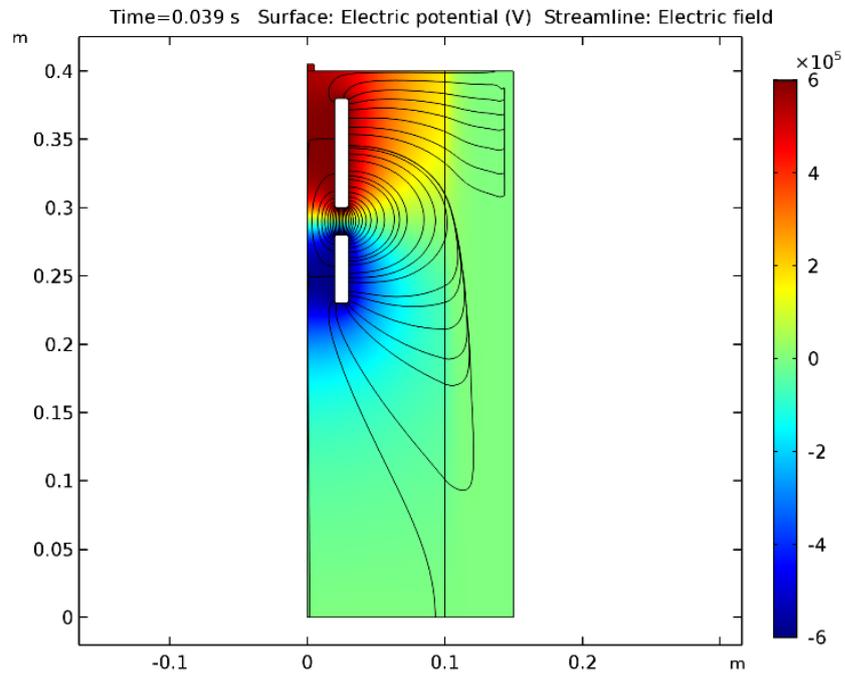


Рис. 3 – Распределение потенциала вокруг электродов и линий напряженности электростатического поля

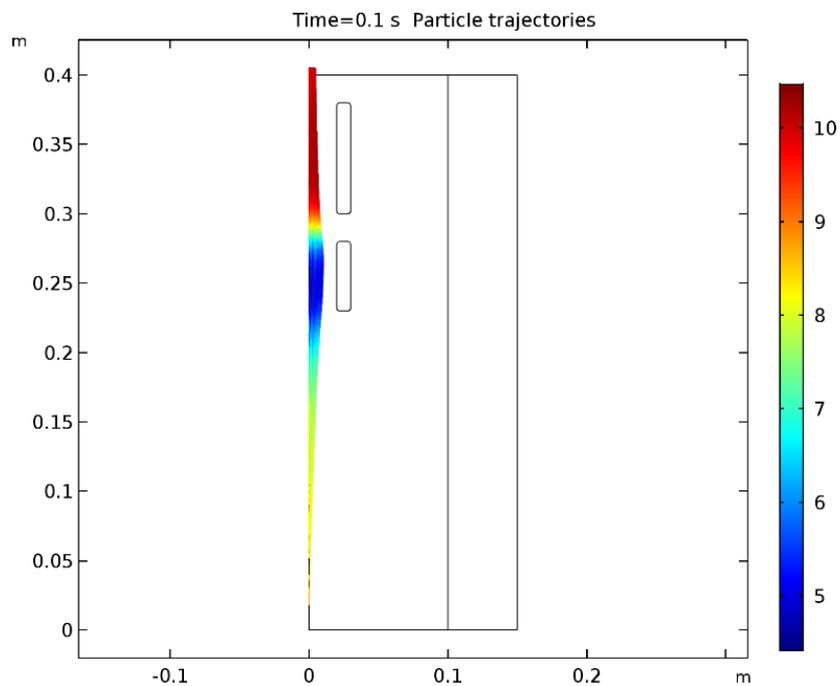


Рис. 4 – траектория полета частиц с учетом всех взаимодействий

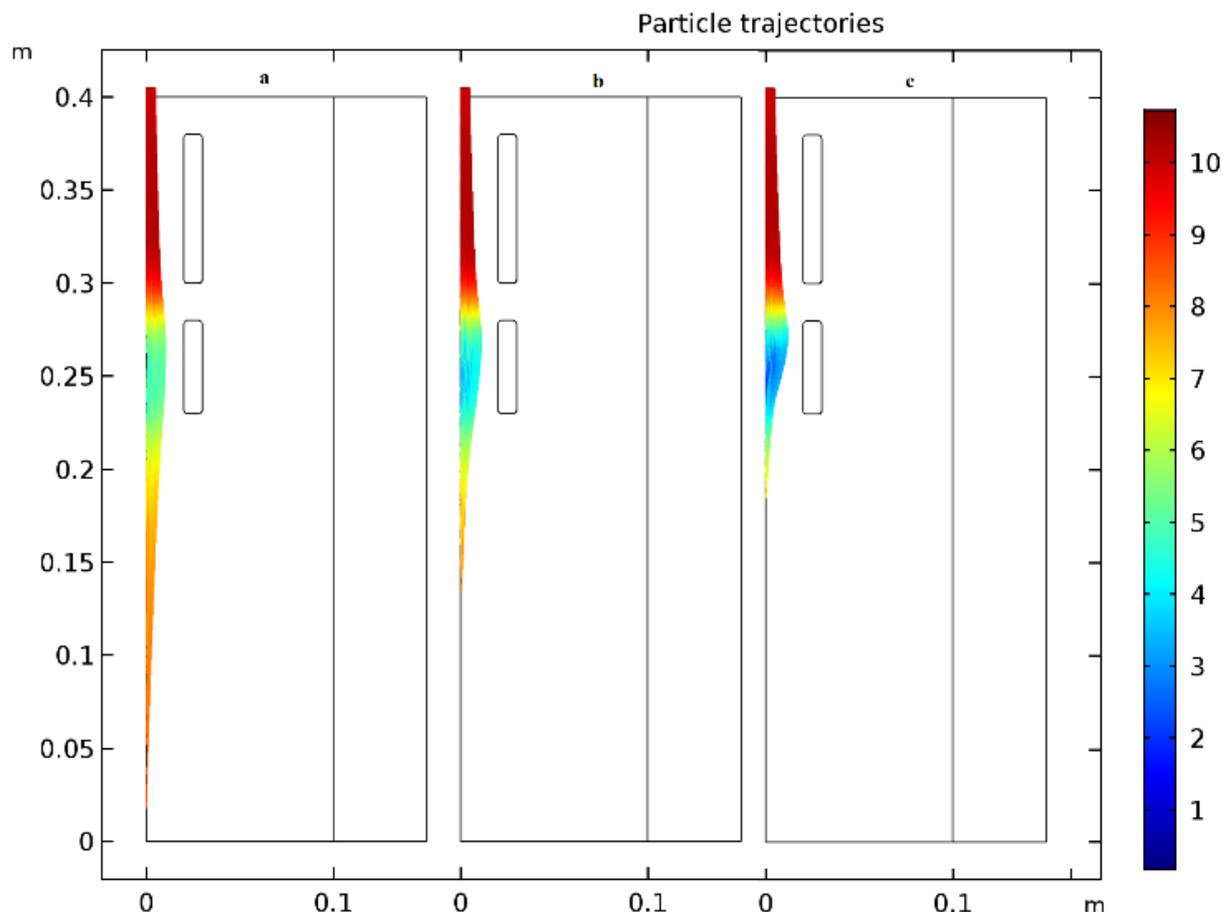


Рис. 5 – Зависимость траекторий частиц от заряда: а) при напряжении на поверхности 100 В; б) при напряжении на поверхности 110 В; в) при напряжении на поверхности 120 В.

Литература

1. Саенко А.В., Малюков С.П., Клунникова Ю.В., Бесполудин В.В., Бондарчук Д.А. Моделирование процесса лазерного отжига пленки TiO₂ для применения в солнечных элементах // Инженерный вестник Дона, 2016, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3517.

2. Благин А.В., Благина Л.В., Нефедова Н.А., Попова И.Г., Политов О.А. Оптические и электрические параметры гетероструктур в физике полупроводниковых материалов: моделирование и эксперимент// Инженерный вестник Дона, 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5354.

3. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Шиганов И.Н. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов; СПбПУ. - Санкт-Петербург: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. - 664 с. ISBN 978-5-7038-2701-7.

4. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – СПб.: Питер, 2016. – 400с.: ил. ISBN 978-5-496-02049-7.

5. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2007. 747 с. ISBN 978-5-7579-1031-4.

6. Паршин С.Г. Металлургия подводной и гипербарической сварки. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. – 402 с.

7. Панченко В.Я. и др. Современные лазерно-информационные технологии: коллективная монография; под ред. В. Я. Панченко и Ф. В. Лебедева; Российская акад. наук, Ин-т проблем лазерных и информ. технологий. - Москва: Интерконтакт Наука, 2015. - 959 с.: ил., портр., табл.; 24 см.; ISBN 978-5-902063-52-0.

8. Abu-Bakr AF, Zubarev A. Effect of interparticle interaction on magnetic hyperthermia: homogeneous spatial distribution of the particles. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2019 Apr 22, pp. 114-122.

9. Weerasinghe V.M, 'Laser cladding of flat plates', Ph.D. thesis, University of London, 1985, pp. 19-32

10. Vasinonta A., Beuth J. and Griffiths M. (Process Maps for Laser Deposition of Thin-walled Structures, SFF symposium 1999, pp.383-391.

11. Rosenthal D., 'The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments', Transactions of ASME, Vol. 68, 1946, pp.849-866.

References

1. Saenko A.V., Maljukov S.P., Klunnikova Ju.V., Bespoludin V.V., Bondarchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3517.
2. Blagin A.V., Blagina L.V., Nefedova N.A., Popova I.G., Politov O.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5354.
3. Grigor'janc A.G., Misjurov A.I., Shiganov I.N. Tehnologicheskie process lazernoj obrabotki: uchebnoe posobie dlja vuzov [Technological processes of laser processing: textbook for universities]; SPbPU. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo MGТУ im. N.Je.Baumana, 2008. 664 p. ISBN 978-5-7038-2701-7.
4. Shishkovskij I.V. Osnovy additivny htehnologij vysokogo razreshenija [Fundamentals of High Resolution Additive Technology]. SPb.: Piter, 2016. 400 p.: il. ISBN 978-5-496-02049-7.
5. Belozеров A.F. Opticheskie metody vizualizacii gazovyh potokov [Optical methods for gas flow visualization]. Kazan': Izd-vo Kazan. gos.tehn. un-ta, 2007. 747 p. ISBN 978-5-7579-1031-4.
6. Parshin S.G. Metallurgija podvodnoji giperbaricheskoj svarki [Metallurgy underwater and hyperbaric welding]. SPb.: Izd-vo Politehn. Un-ta, 2016. 402 p.
7. Panchenko V.Ja. i dr. Sovremennye lazerno-informacionnye tehnologii :kollektivnaja monografija [Modern laser-information technology: a collective monograph]; pod red. V. Ja. Panchenkoi F. V. Lebedeva; Rossijskaja akad. nauk, In-t problem lazernyhi inform. tehnologij. Moskva: Interkontakt Nauka, 2015. 959 p.: il., portr., tabl.; 24 sm.; ISBN 978-5-902063-52-0.
8. Abu-Bakr AF, Zubarev A. Effect of interparticle interaction on magnetic hyperthermia: homogeneous spatial distribution of the particles. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2019 Apr 22, pp. 114-122.



9. Weerasinghe V.M, 'Laser cladding of flat plates', Ph.D. thesis, University of London, 1985, pp. 19-32.
10. Vasinonta A., Beuth J. and Griffiths M. (Process Maps for Laser Deposition of Thin-walled Structures, SFF symposium 1999, pp.383-391.
11. Rosenthal D., 'The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments', Transactions of ASME, Vol. 68, 1946, pp.849-866.