

**Borovskoy A.M., Popov S.D., Surov A.V.**

*The Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, Russia*

## **The Simulation of Gas Flow in Cylindrical Channels of High-Voltage Plasma Torches with Rod Electrodes**

The calculated area grid is built and three-dimensional gas flow calculations are executed by GAMBIT and FLUENT software with turbulence model Spalart-Allmares with the purpose simulation of plasma forming gas flow in channels and tapering nozzles of studied high-voltage alternating current plasma torches. Air flow is simulated in the tangential feed areas, in the cylindrical channel, in the mixing chambers of plasma torches and outside (in environment). Consequently for the first time 3D-simulation of cold plasma forming gas flow is accomplished for the investigated high-voltage alternating current plasma torches with rod electrodes.

**Key words:** plasma forming gas flow, alternating current plasma torches, 3D-simulation.

Received July 20, 2012

УДК 533.9

**Гаврыш Г.А., Кравченко А.Ю., Лиситченко Т.Е.**

*Киевский университет имени Тараса Шевченко*

## **Взаимодействие пылевых частиц в замагниченной плазме**

При помощи компьютерного моделирования изучено влияние магнитного поля на зарядку пылевых частиц и силу, действующую на них в плазменном потоке. Был использован трехмерный метод молекулярной динамики как наиболее точный для описания движения плазменных частиц и их взаимодействия с пылевой частицей. Рассмотрены сферические проводящие пылевые частицы, локализованные в невозмущенной низкотемпературной плазме низкого давления при разных значениях скорости плазменного потока и величины магнитного поля, направленного вдоль потока плазмы. Получены пространственные распределения частиц плазмы. Расчеты показали уменьшение заряда пылевых частиц по абсолютной величине и силы, действующей на них в плазменном потоке, при уменьшении скорости потока плазмы и при увеличении магнитного поля вследствие замагниченности электронов в плазме.

**Ключевые слова:** пылевые частицы, плазма, магнитное поле, компьютерное моделирование.

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено вплив магнітного поля на зарядку пилових частинок та силу, яка діє на них у плазмовому потоці. Було використано тривимірний метод молекулярної динаміки як найбільш точний для описання руху плазмових частинок та їх взаємодії з пиловою частинкою. Розглянуто сферичні провідні пилові частинки, локалізовані у незбуреній низькотемпературній плазмі низького тиску при різних значеннях швидкості плазмового потоку та величини магнітного поля, направленою вздовж потоку плазми. Отримано просторове розподілення частинок плазми. Обчислення показали зменшення заряду пилових частинок за абсолютною величиною та сили, що діє на них у плазмовому потоці, при зменшенні швидкості потоку плазми та при збільшенні магнітного поля внаслідок замагніченості електронів у плазмі.

**Ключові слова:** пилові частинки, плазма, магнітне поле, комп'ютерне моделювання.

Зарядка пылевых частиц в плазме является одной из наиболее фундаментальных задач, решение которой необходимо для объяснения ряда явлений в пылевой плазме. Пылевые частицы, помещенные в плазму, приобретают заряд, знак и величина которого существенно влияют на свойства плазмы и на свойства ансамбля пылевых частиц. Заряд пылевых частиц представляет большой интерес для понимания поведения частиц в плазменных технологиях, используемых для нанесения тонких пленок, в процессах выращивания частиц из газовой фазы [1], а также при изучении космической плазмы [2]. Возрос интерес к пылевой плазме в магнитном поле [3]. Важной задачей является определение заряда пылевых частиц в магнитном поле и сил, действующих на них.

Традиционным методом, используемым для определения взаимодействия пылевых частиц с плазмой, является метод ограниченных

орбит. Этот метод не является точным в случае высокого давления, при сильном взаимодействии между частицами и при наличии относительного движения плазмы [1, 2]. Для решения этой задачи могут быть применены различные численные методы. Среди них метод прямого интегрирования уравнений движения частиц плазмы, который является наиболее точным численным экспериментом, приближенным к лабораторному.

В настоящей работе исследуется процесс зарядки и экранирования пылевых частиц, используя компьютерное моделирование. В наших расчетах давление нейтрального газа изменялось от 0,1 до 1,5 Торр, а скорость плазменного потока от 0 до  $2 c_{is}$  ( $c_{is}$  – ионно-звуковая скорость). Для уменьшения времени расчета масса атомов нейтрального газа и ионов выбиралась равной массе атома водорода, но элементарные сечения взаимодействия частиц плазмы с атомами нейтрального газа были взяты для аргона. Плотности ионов и электронов в невозмущенном потоке плазмы на большом расстоянии от пылевых частиц задавались  $n_i = n_e = 4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Электронная и ионная температуры задавались соответственно  $T_e = 1 \text{ эВ}$  и  $T_i = 0,03 \text{ эВ}$ . Магнитное поле было направлено вдоль плазменного

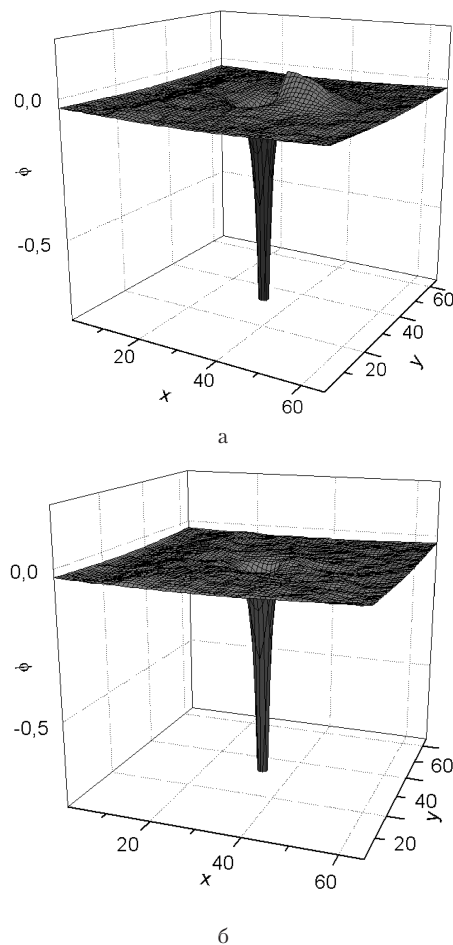


Рис.1. Пространственное распределение электростатического потенциала в плоскости  $x-y$  для случаев  $v_0 = c_{is}$ ,  $B = 0$  (а) и  $v_0 = c_{is}$ ,  $B = 1 \text{ Тл}$  (б).

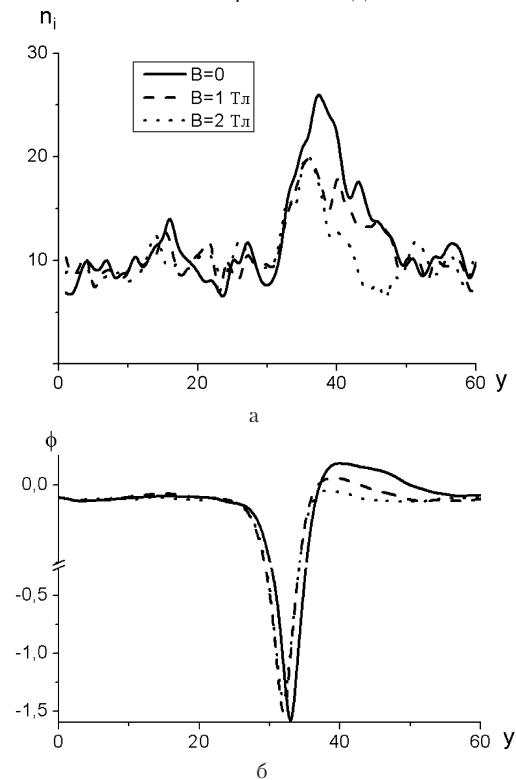


Рис.2. Пространственное распределение концентрации ионов (а) и электростатического потенциала (б) вдоль оси  $y$  для разных значений магнитного поля.

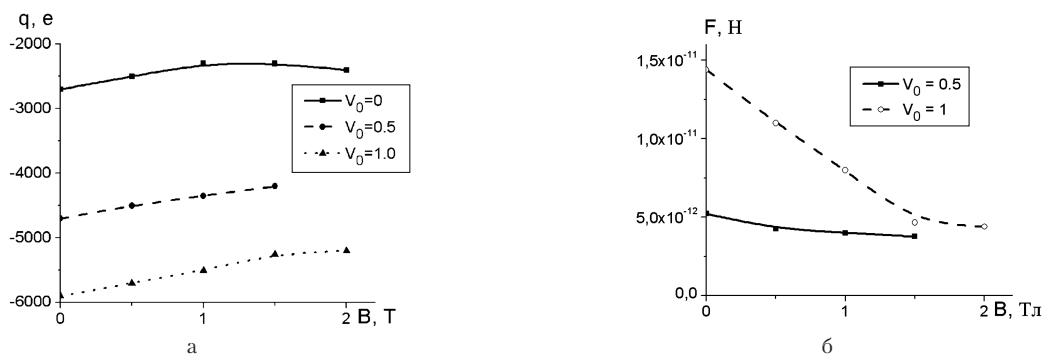


Рис.3. Зависимости заряда пылевой частицы (а) и силы, действующей на нее (б), от магнитного поля для разных скоростей потока плазмы.

потока, а его величина изменялась от 0 до 2 Тл. Область моделирования выбиралась в виде куба со стороной  $L = 4 \cdot 10^{-4}$  м, что намного превышает электронную длину Дебая. Время моделирования было  $T_0 = 10^{-8}$  с, что превосходит время, за которое ион пролетает длину  $L$ .

Был использован трехмерный метод молекулярной динамики по схеме particle-particle-particle-mesh (P<sup>3</sup>M) как наиболее точное описание движения частиц плазмы и взаимодействия с пылевыми частицами. Для того, чтобы рассчитать взаимодействие между пылевыми частицами и частицами плазмы, метод «частиц в ячейке» (PIC) комбинировался с методом молекулярной динамики (MD). В итоговой P<sup>3</sup>M схеме взаимодействие электронов и ионов в плазме рассчитывалось методом PIC, а действие на них со стороны пылевых частиц — методом MD с использованием кулоновского потенциала. Взаимодействие между частицами плазмы и нейтральным газом было рассчитано методом Монте-Карло, который учитывал такие элементарные процессы, как упругие соударения, возбуждение, ионизация, обмен зарядом между ионами и нейтральными атомами. Если электрон или ион пересекал поверхность пылевой частицы, то он рекомбинировал и передавал ей свой заряд.

Вычисления взаимодействия пылевых частиц с плазмой были проведены для различных магнитных полей и скоростей потока плазмы. Были получены пространственные распределения параметров плазмы и временные зависимости заряда пылевых частиц и силы, действующей на них.

На рис.1 показано пространственное распределение электростатического потенциала для случаев  $B = 0$  (а) и  $B = 1$  Тл (б). Давление в плазме было  $p = 0,1$  Торр, радиус частиц  $R_d = 4$  мкм. Можно видеть, что за пылевой частицей в направлении потока формируется область по-

вышенного потенциала. В случае с магнитным полем его величина существенно уменьшается. Формирование максимума потенциала и формирование ионного облака за пылевой частицей происходит вследствие фокусирования ионов. Для случая, показанного на рис.1,б, ионный радиус Лармора в несколько раз больше радиуса пылевых частиц, а электронный радиус Лармора такого же порядка, как радиус пылевых частиц. Это существенно влияет на движение ионов и их фокусировку.

Минимум потенциала возникает в точке, где расположена пылевая частица. Это следствие отрицательного заряда пылевой частицы, который она приобретает при попадании в плазму. В отсутствие потока плазмы и магнитного поля распределение потенциала около пылевой частицы описывается известным потенциалом Юкава [4].

На рис.2,а показано пространственное распределение плотности ионов вдоль оси  $y$ . Видно, что возрастание магнитного поля приводит к уменьшению ионного сгустка за пылевой частицей в направлении потока плазмы.

На рис.2,б показано пространственное распределение электростатического потенциала вдоль направления потока (оси  $y$ ). Видно уменьшение максимума электростатического потенциала за пылевой частицей, который соответствует пику ионной плотности на рис.2,а. Минимум электростатического потенциала слабо зависит от магнитного поля.

На рис.3,а показана зависимость заряда пылевой частицы от магнитного поля. Видно, что ее заряд уменьшается по абсолютной величине с увеличением магнитного поля из-за уменьшения потока электронов на пылевую частицу вследствие замагниченности электронов, приводящий к уменьшению потока перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Наблюдается также увеличение заряда частиц при увеличении скорости потока плазмы.

На рис.3,б показана сила, действующая на пылевую частицу, как функция магнитного поля. Эта сила состоит из электростатической силы и силы за счет передачи количества движения ионов пылинке при столкновении. Видно, что сила уменьшается с увеличением магнитного поля, что объясняется уменьшением фокусировки ионов.

### Выводы

Получено пространственное распределение частиц плазмы вокруг пылевых частиц для разных магнитных полей и скоростей потока плазмы. Наблюдалось образование ионного облака за пылевой частицей из-за фокусировки ионов. Показано, что плотность ионного облака значительно уменьшается с увеличением магнитного поля. Исследована зависимость силы ионного трения от скорости потока плазмы и магнитного поля. Показано, что уменьшение фокусировки ионов с увеличением магнитного поля приводит к уменьшению силы, действующей со стороны плазмы на пылевую частицу. Также наблюда-

лось уменьшение заряда частицы из-за уменьшения потока электронов на поверхность пылинки.

*Данная работа поддержана NASU-RFFR грантом.*

### Список литературы

1. Mao M., Benedikt J., Consoli A., Bogaerts A. New pathways for nanoparticle formation in acetylene dusty plasmas: a modelling investigation and comparison with experiments // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — Vol. 41. — 225201 (14 p).
2. Pavlu J., Safrankova J., Nemecek Z., Richterova I. Dust Charging in Space-related Laboratory Experiments : A Review Focused on Secondary Emission // Contrib. Plasma Phys. — 2009. — Vol. 49. — P. 169–186.
3. D'yachkov L.G., Petrov O.F., Fortov V.E. Dusty Plasma Structures in Magnetic DC Discharges // Ibid. — P. 134–147.
4. Shukla P.K., Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. — Bristol; Philadelphia : IoP Publishing Ltd., 2001. — P. 36–49.

Поступила в редакцию 20.07.12

***Gavrysh G.A., Kravchenko O.Yu., Lisitchenko T.E.***

*Taras Shevchenko National University, Kiev*

## **Dust Particles Interaction in Magnetized Plasma**

The effect of magnetic field on dust particles charging and the force acting on them in plasma flow is investigated by computer simulation. The three-dimensional as particle-particle-particle-mesh (P<sup>3</sup>M) method is applied as the most precision for description of plasma particles motion and interaction with dust particle. The spherical conductive dust particles located in non-disturbed low temperature low pressure plasma at various values of the plasma flow velocity and magnetic field directed along plasma flow are conducted. The spatial distributions of plasma particles are obtained. The calculations display particle charge decrease in absolute value and decrease of the force on dust particle in plasma flow with plasma flow velocity decreasing and with magnetic field value increasing as a result of electrons magnetization in plasma.

**Key words:** dust particles, plasma, magnetic field, computer simulation.

Received July 20, 2012