

УДК 533.93

Т.С. Рамазанов, Н.Х. Бастыкова, Е.А. Усенов, С.К. Коданова*, М.К. Досболаев

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

*E-mail: kodanova@mail.ru

Движение пылевых частиц вокруг электрического зонда

Аннотация. В данной работе было изучено поведение пылевых частиц вблизи одиночного электрического зонда в зависимости от давления в разрядной трубке. Численно рассчитаны траектории пылевых частиц вокруг электрического зонда с учетом силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами. Экспериментальные и численные расчеты были сравнены.

Ключевые слова: пылевая плазма, электрический зонд, модель поведения частицы.

Введение

Пылевая плазма – это ионизированный газ, содержащий частицы конденсированного вещества. Присутствие пылевых частиц может существенно влиять на параметры низкотемпературной плазмы. Анализ зондовых измерений в газоразрядной пылевой плазме не будет полным без представления о поведении пылевых частиц в возмущенной области вблизи зонда [1, 2]. В связи с этим представляет интерес модель поведения уединенной пылевой частицы, позволяющая выявить и изучить важные особенности данного явления. Для понимания динамики макрочастиц процессов в пылевой плазме необходим корректный анализ сил, действующих на них. Основные силы, действующие на частицу, делятся на силы, не связанные с наличием у нее электрического заряда (гравитационная сила, сила торможения нейтралами), и на силы, связанные с наличием у частицы электрического заряда (электрическая сила и сила увлечения ионами). В данной работе учитывались электрическая сила, сила ионного увлечения и сила торможения нейтралами. Сила

ионного увлечения – передача импульса от текущих ионов на заряженные макрочастицы, внесенных в плазму, – это является неизбежным и исключительно важным фактором в пылевой плазме. Ионный поток индуцируется из-за электрического поля, которое всегда существует в плазме. Знание силы ионного увлечения в зависимости от параметров плазмы необходимо для понимания явлений, происходящих в лаборатории и космической среде. Сила торможения нейтралами является основным механизмом, ответственным за сопротивление со стороны окружающей среды, когда частица движется в стационарной плазме.

Экспериментальная установка

Для исследования движения пылевых частиц при взаимодействии с Ленгмюровским зондом была использована установка на основе тлеющего разряда. Газоразрядная трубка расположена вертикально, зонд вводился в плазму перпендикулярно положительному столбу. Разряд зажигался в чистом аргоне при давлениях от 0,1 торр до 0,3 торр, и при значениях тока 0,5-

3 мА. Зонд представляет собой вольфрамовый электрод цилиндрической формы, имеющий следующие линейные параметры: диаметр $d \sim 0.1$ мм, $l \sim 2$ мм. Для фиксирования траектории мы использовали лазер с длиной волны 532 нм. Через оптическую систему был получен лазерный нож, который освещал плоскость, перпендикулярную камере. Запись траекторий частиц выполняли с CCD камерой с частотой 25 кадров в секунду. Частицы вводились в плазму после включения зонда в измерительную цепь, из контейнера, расположенного наверху разрядной трубки. Потенциал зонда подается отрицательным относительно плазмы, поэтому возле зонда образуется положительный слой ионов с радиусом несколько миллиметров. Частицы пыли, пролетая через ионный слой, ведут себя по-разному. При качественном анализе можно сказать, что при значениях давления от 0,1 до 0,2 торр. наблюдаются отталкивание и отклонение частиц на малые углы от начальных траекторий.

От 0,2 торр. и больше взаимодействие частиц с зондом более значительно, наблюдаются большие углы отклонения при притяжении частицы зондом. При значении давления около 0,3 торр. в разрядной трубке большинство частиц, проникнув в ионный слой, вращаются вокруг зонда в 1-2 периода и прилипают на зонд.

Теория

Пылевая частица движется под действием электростатической силы, силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами. Сила ионного увлечения рассматривалась в области слоя у поверхности зонда с большим отрицательным потенциалом. Так как движение ее вдоль оси является несущественным, то задача сводится к двумерной в горизонтальной плоскости. Введя полярные координаты r и θ в плоскости траектории и приняв за начало координат центр зонда, уравнения такого движения можно записать в следующей форме:

$$M_d \frac{d^2 r}{dt^2} = -eZ_d(r) \frac{dU(r)}{dr} + \frac{2K_0 p^2}{r^3} - \pi R_d^2 m_n n_n u_d v_{Tn} + \pi n_i m_i u_i v_s (b_c^2 + 2b_{\pi/2}^2 \ln \Lambda) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{p}{r^2} \left(\frac{2K_0}{M_d} \right)^{1/2},$$

где, $U(r)$ – потенциал поля зонда в точке r ; K_0 – начальная кинетическая энергия пылевой частицы, M_d – ее масса, p – прицельный параметр, m_n – масса нейтралов, n_n и v_{Tn} – концентрация и тепловая скорость нейтралов,

$$v_s = \left[8k_B T_i / (\pi m_i) + u^2 \right]^{1/2} \quad b_{\pi/2} = eQ_d / (4\pi \epsilon_0 m_i v_s^2),$$

сечения рассеяния кулоновского взаимодействия между ионом и пылевой частицей, $\Gamma = (1/2) \ln(\lambda_D^2 + b_{\pi/2}^2) / (b_c^2 + b_{\pi/2}^2)$ – сечение поглощения ионов пылевыми частицами, $b_c = R_d (1 - 2q_i \phi_s / m_i v_s^2)^{1/2}$ – кулоновский логарифм, λ_D – длина Дебая.

Используя уравнение Пуассона, в нашем случае распределение электрического поля вблизи зонда имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) = -4\pi e [n_i(r) - n_e(r)]. \quad (2)$$

Концентрации электронов и ионов будут определяться следующими выражениями [3]:

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{eU(r)}{kT_e}\right) \quad (3)$$

$$n_i = n_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{r_n}{r} \left[\frac{E_{0n} + eU(r_n)}{E_{0n} + eU(r)} \right]^{1/2} \right\} \quad \text{при } r > r_n, \quad (4)$$

$$n_i = \frac{n_0}{\pi} \arcsin \frac{r_n}{r} \left[\frac{E_{0n} + eU(r_n)}{E_{0n} + eU(r)} \right]^{1/2} \quad \text{при } r < r_n.$$

Заряд пылевой частицы eZ_d в возмущенной области вблизи зонда определяется токами электронов и ионов на ее поверхность:

$$e \frac{dZ_d}{dr} = I_e + I_i. \quad (5)$$

где I_e и I_i токи электронов и ионов на частицу на расстоянии r от зонда.

В рамках приближения орбитального движения (OML) [3,4,5,6] уравнения для тока электронов имеют вид [7]:

$$I_e = -\pi R_d^2 e n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{eU_d}{kT_e} \right) \quad \text{для } U_d < 0, \quad (6)$$

$$I_e = -\pi R_d^2 e n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{eU_d}{kT_e} \right) \quad \text{для } U_d > 0.$$

Здесь n_e – локальная концентрация электронов (3), R_d – радиус пылевой частицы, U_d – плавающий потенциал пылевой частицы, определяемый относительно потенциала окружающего пространства $U(r)$. Связь между U_d и Z_d для сферической пылевой частицы при условии $R_d \ll D$ дается соотношением $Z_d e \approx U_d R_d$.

Численные и экспериментальные результаты

Численный расчет производился для пылевой частицы радиуса $R_d = 10$ мкм и массой $m_d = 2.1 \cdot 10^{-10}$ г и масса атомов (ионов) аргона

$m_i = 6.63 \cdot 10^{-23}$ г при энергии электронов $5эВ$, и комнатной температуре ионов $\gamma = T_i/T_e = 0.0069$.

В этом случае значение переменной $\gamma_d = K_0/kT_e$ дает нам энергию пылевой частицы в электрон-вольтах, а значение переменной φ – потенциал пространства в вольтах (по модулю). При заданных значениях R_d и kT_e , последнее соотношение, к тому же, определяет дебаевский радиус и плотность плазмы: $D=0.005$ см и $n_0=8 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Так же, для дальнейших вычислений мы полагали $p/R_p=3$ и $R_d/D=0.025$. Здесь $p=150\sim 500$ мкм – прицельный параметр, $R_p=150$ мкм – радиус зонда.

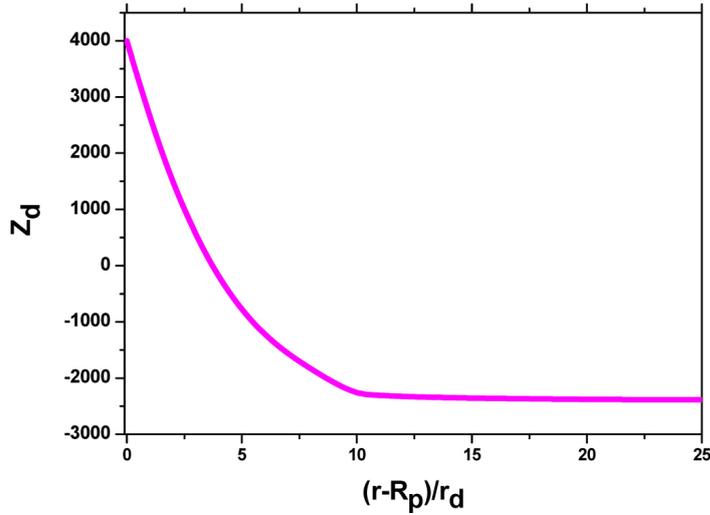
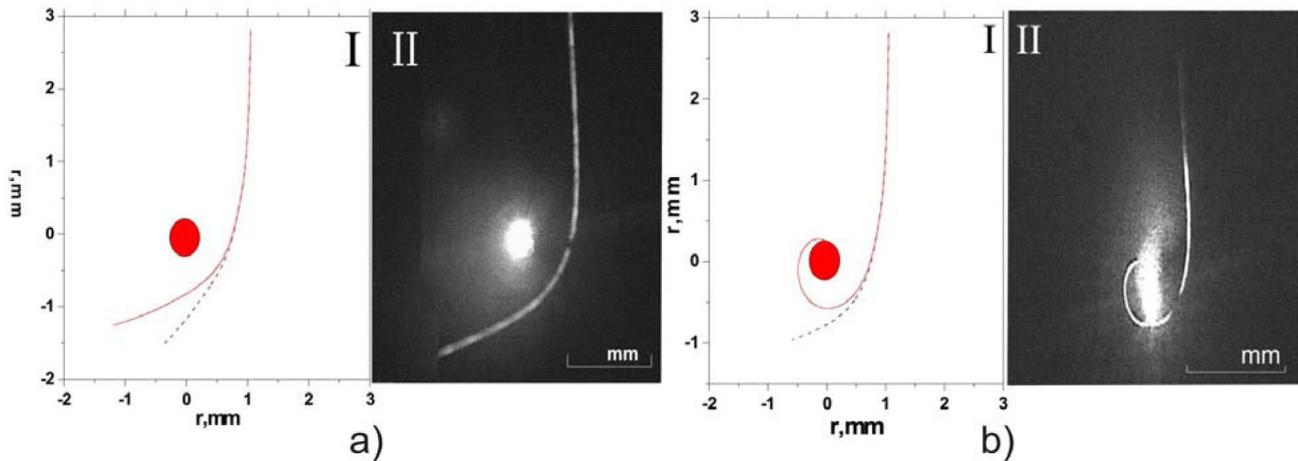


Рисунок 2 – Траектория движения пылевой частицы в возмущенной области вблизи зонда при $\gamma d=12650$ и $\gamma d=15500$

Рисунок 1 показывает, как изменяется заряд пылевой частицы при ее движении в призондовой области. При приближении частицы к так называемой области ионного слоя, где концентрация электронов пренебрежимо мала и ток электронов резко уменьшается, заряд частицы начинает увеличиваться (уменьшаться по модулю). Отметим, что в дальнейшем при достижении частицей определенного расстояния,

назовем его расстоянием “перезарядки”, происходит смена знака заряда с отрицательного на положительный. “Перезарядка” происходит в области, где ток ионов преобладает над током электронов.

Теоретические и экспериментальные результаты показаны на рисунке 2 при различных начальных кинетических энергиях $\gamma d = K_0/kT_e$.



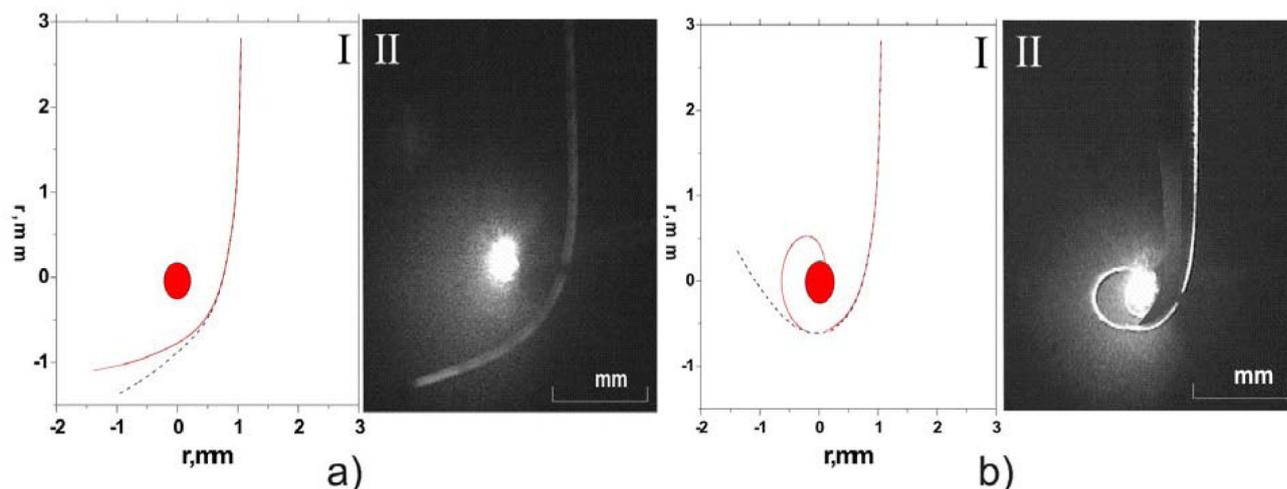
Сравнение теоретических вычислений (I) с экспериментальными траекториями (II). Пунктирная линия – без учета влияния силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами; сплошная линия – с учетом влияния силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами

Рисунок 2 – Траектория движения пылевой частицы в возмущенной области вблизи зонда при $\gamma d=12650$; и $\gamma d=15500$

Сила ионного увлечения рассматривалась в области слоя у поверхности зонда с большим отрицательным потенциалом, когда ионы движутся по радиальным траекториям. Результаты показывают, что сила ионного увлечения уве-

личивает притяжение пылевых частиц к зонду в этой области.

Теоретические и экспериментальные результаты показаны на рисунке 3 при прицельных параметрах $\gamma d = 12620$.



Сравнение теоретических вычислений (I) с экспериментальными траекториями (II). Пунктирная линия – без учета влияния силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами; сплошная линия – с учетом влияния силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами.

Рисунок 3 – Траектория движения пылевой частицы в возмущенной области вблизи зонда

Экспериментальные результаты показали, что с увеличением давления в разрядной трубке, взаимодействие пылевых частиц с зондом усиливается. Наблюдаются большие углы рассеяния и вращение пылевых частиц в ионном слое вокруг зонда, с последующим прилипанием на зонд. Численные расчеты показывают, что с ростом давления сила ионного увлечения влияет сильнее силы торможения нейтралами и увеличивает притяжение пылевых частиц к зонду.

Заключение

В настоящей работе поведение пылевых частиц вблизи цилиндрического зонда в плазме тлеющего разряда исследовалась теоретически и экспериментально. Наблюдалось поведение частиц вокруг зонда в зависимости от давления. Результаты показали, что с увеличением давления в разрядной трубке взаимодействие пылевых частиц с зондом увеличивается. Экспериментальные исследования позволили

определить характер влияния зонда на пылевую структуру и подтвердили возможность определения основных параметров плазмы из зондовых вольтамперных характеристик в условиях тлеющего разряда постоянного тока. Получена система уравнений, позволяющая описать движение пылевой частицы в возмущенной области вблизи зонда с учетом силы ионного увлечения и силы трения. Экспериментальные и численные данные хорошо согласуются друг с другом.

Литература

- 1 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Petrov O.F., Antipov S.N., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N. An investigation of dust particles orbiting a Langmuir Probe // J. Phys. A: Math. Theor.-2009.-Vol. 42. –P.214026.
- 2 Antipov S.N., Samarian A.A., Petrov O.F., Nefedov A.P. Behavior of a dust grain in the double

layer of an electric probe in a gas-discharge plasma // Plasma Phys. Rep. -2001. – Vol. 27. –P. 340-346.

3 Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. -М.: Атомиздат, 1969. –206 с.

4 Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // Усп. физ. наук. -1997. –Т.167. Вып.1. – С. 57-99.

5 Чан А., Тэлбот Л., Турян К. Электрические

зонды в неподвижной и движущейся плазме. –М.: Мир, 1978. – 202 с.

6 Allen J.E. Probe theory – the orbital motion approach // Physica Scripta. -1992. –Vol. 45. –P. 497-503.

7 Nitter T. Levitation of dust in rf and dc glow discharges // Plasma Sources Sci. Technol. -1996. –Vol. 5. –P. 93.

T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova, Y.A. Ussenov, S.K. Kodanova, M.K. Dosbolayev

Ленгмюр зондтың айналасындағы тозанды бөлшектердің қозғалысы

Бұл жұмыста разрядты трубкада әр түрлі қысымдар үшін бірлік электрлік зонд айналасында тозанды бөлшектердің қозғалысы зерттелді. Иондық қозу және нейтралдардың тежеу күштерін ескере отырып, бірлік электрлік зонд айналасында тозанды бөлшектердің қозғалысы сандық есептелді. Эксперименттік және сандық нәтижелер салыстырылды.

Түйін сөздер: тозаң плазмасы, электрлік зонд, бөлшек тәртібінің моделі.

T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova, Y.A. Ussenov, S.K. Kodanova, M.K. Dosbolayev

The motion of dust particles near electric probe

In the present work the dynamics of dust particles near electric probe in gas discharge at different pressures was studied. Trajectories of dust particles near electric probe with taking into account of the ion drag force and neutral friction force were calculated numerically. The comparisons between experimental and calculated results showed the good agreement.

Keywords: dusty plasma, electric probe, model behavior of the particle.