

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛЫ И СИЛЫ ИОННОГО УВЛЕЧЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПЫЛЕВУЮ ЧАСТИЦУ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ

Р.Ж. Амангалиева

*Актюбинский государственный университет им. К.Жубанова, г.Актобе
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, НИИЭТФ, г.Алматы*

В работе приводятся результаты расчетов параметров пылевой плазмы стратифицированного разряда. Исследованы аксиальное и радиальное распределения электростатической силы, действующей на пылевую частицу. Был получен оценочный результат силы ионного увлечения.

Пылевая плазма – это ионизованный газ, содержащий мелкодисперсные пылевые частицы. Она является предметом изучения в течение многих лет. В связи с перспективами различных технических приложениях, таких, как плазменные технологии, управляемый термоядерный синтез, процессы горения, физика атмосферы и т.д., пылевая плазма является бурно развивающейся областью исследований [1].

Пылевая плазма - система, представляющая собой открытую нелинейную диссипативную структуру, в которой возможно образование пылевых упорядоченных структур. До сих пор остаются неясными механизмы формирования трехмерных плазменно-пылевых структур в стратах разряда постоянного тока, на формирование которых помимо взаимодействия частиц огромное влияние оказывают внешние условия: распределения параметров плазмы в стратах, различные разрядные неустойчивости.

В положительном столбе разряда низкого давления потеря энергии электронов в упругих столкновениях мала, и функция распределения электронов формируется под действием электрического поля и неупругих столкновений, что может приводить к появлению страт. Концентрация электронов, их распределение по энергиям, а также электрическое поле сильно неоднородны по длине страты.

В данной работе рассматриваются параметры пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока в газоразрядной трубке и силы, действующие на пылинку. С помощью самосогласованной кинетической модели [2], в которой решается одновременно уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), уравнение непрерывности для распределения ионов и уравнение Пуассона для электрического поля, были получены аксиальные распределения параметров пылевой плазмы. Радиальные распределения электрического поля и остальных параметров находились в приближении амбиполярной диффузии [3]. Ниже на рис.1 представлены полученные радиальные и аксиальные распределения плотности и температуры электронов при давлении аргона $p = 0,5$ Торр и среднем электрическом поле $E_0 = 2$ В/см в стратифицированном разряде постоянного тока.

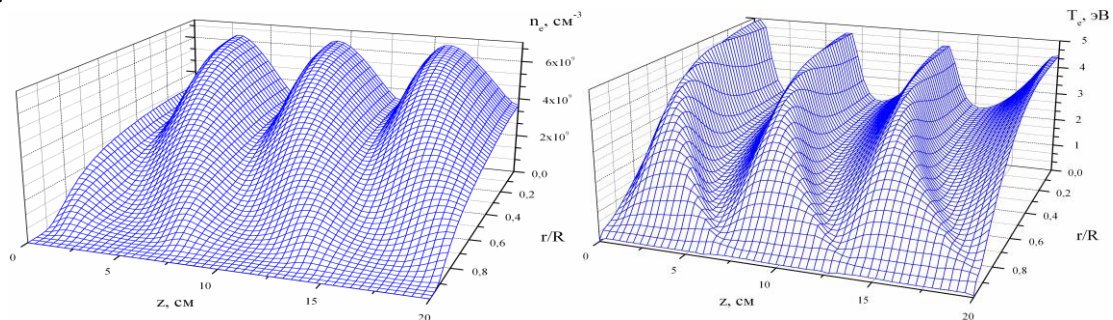


Рис.1. Радиальные и аксиальные распределения плотности и температуры электронов

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). Далее рассмотрим электрическую силу и силу ионного увлечения.

Электростатическая сила. На заряженную проводящую частицу при наличии в плазме электрического поля напряженности E действует сила [1]

$$F_e = Z_d e E \left[1 + (a / \lambda_D)^2 (1 + a / \lambda_D)^{-1} / 3 \right], \quad (1)$$

где Z_d - зарядовое число пылевой частицы (заряд, выраженный в единицах элементарного заряда). Заряд пылевых частиц находится с помощью модели ограниченного орбитального движения электронов (orbit motion limited (OML) theory). Потенциал на поверхности пылевой частицы и ее заряд определяются из условия равенства потоков электронов и ионов на поверхность частицы [4].

Можно ввести эффективную величину поля $E_{eff} = E \left[1 + (a / \lambda_D)^2 (1 + a / \lambda_D)^{-1} / 3 \right]$, так что $F_e = Z_d e E_{eff}$. Для пылевой плазмы характерны условия, при которых $a \ll \lambda_D$, так что электрическая сила дается выражением $F_e = Z_d e E$.

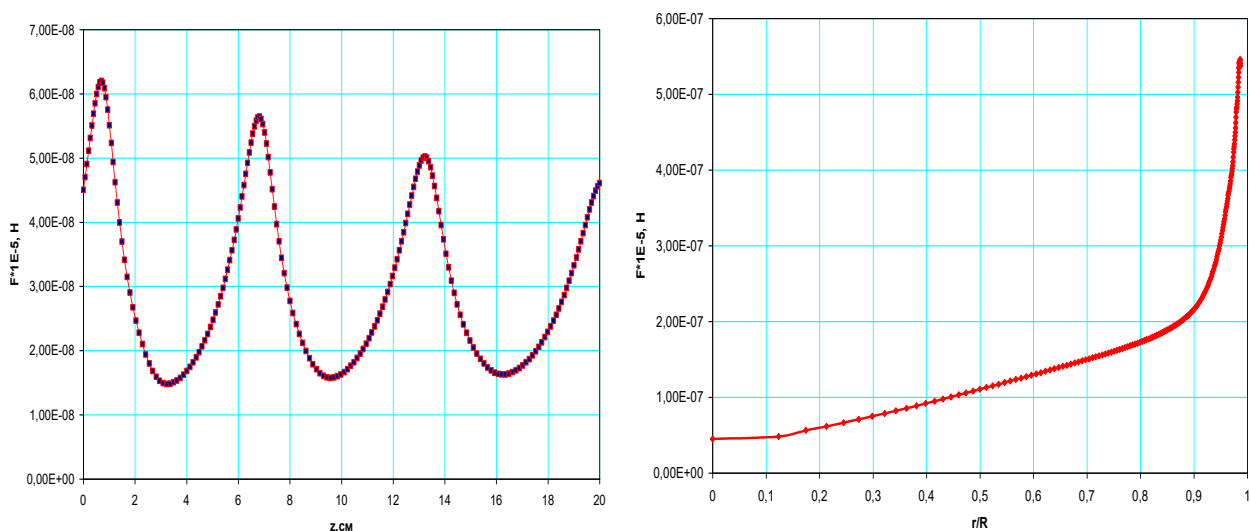


Рис.2. Аксиальное и радиальное распределения электростатической силы, действующей на пылевую частицу

Сила ионного увлечения. При наличии средней относительной скорости между ионами (электронами) и пылевой частицей возникает сила, связанная с передачей импульса от плазменных частиц пылевой. В силу большей массы ионов (по сравнению с массой электронов) эффект, связанный с ними, как правило, преобладает. Относительное движение ионов и пылевых частиц может быть связано как с наличием внешнего электрического поля, так и с (тепловым) движением пылевых частиц относительно покоящегося газа в среднем ионов. Рассматриваемую силу принято называть силой ионного увлечения. Она связана с двумя процессами: передачей импульса при неупругих столкновениях (поглощение ионов пылевой частицей) и передачей импульса в упругих столкновениях (рассеяние ионов в электрическом поле частицы). В общем случае сила ионного увлечения может быть записана в виде [1]:

$$F_I = m_i n_i \int v f_i(v) \sigma_i^{tr}(v) v dv, \quad (2)$$

где m_i -масса ионов, n_i -концентрация ионов, $f_i(v)$ - функция распределения ионов по скоростям, а $\sigma_i^{tr}(v)$ - транспортное сечение (сечение передачи импульса) для столкновений ионов с пылевой частицей. В качестве функции распределения ионов по скоростям в слабоанизотропной плазме в большинстве случаев следует использовать сдвинутое максвелловское распределение. Тогда силу ионного увлечения можно записать в следующем виде:

$$F_i = 2m_i n_i \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi m_i}} \frac{1}{V_i^2} \int_0^\infty dv v^2 \sigma^{tr}(v) \exp\left[-\frac{m_i(v^2+V_i^2)}{2kT_i}\right] \left[\frac{m_i V_i v}{kT_i} \operatorname{ch}\left(\frac{m_i V_i v}{kT_i}\right) - \operatorname{sh}\left(\frac{m_i V_i v}{kT_i}\right) \right], \quad (3)$$

где V_i -дрейфовая скорость ионов. В теоретических работах зависимость сечения от скорости удобно выразить через безразмерный параметр рассеяния

$$\beta = \frac{Z_d e^2}{m_i v^2 \lambda_d}. \quad (4)$$

Стандартная теория кулоновских столкновений заряженных частиц в плазме, использующая кулоновский потенциал взаимодействия и обрезание на прицельных параметрах больших длины экранирования, дает следующее выражение для транспортного сечения [1]:

$$\frac{\sigma_i^{tr}}{\lambda_d^2} = C_1 \beta^2 \ln\left(1 + \frac{C_2}{\beta^2}\right), \quad (5)$$

где $C_1 \approx 3,748$, $C_2 \approx 15,33$. На рис.3. представлено аксиальное распределение силы ионного увлечения при давлении аргона $p = 0,5$ Торр и среднем электрическом поле $E_0 = 2$ В/см в газоразрядной трубке.

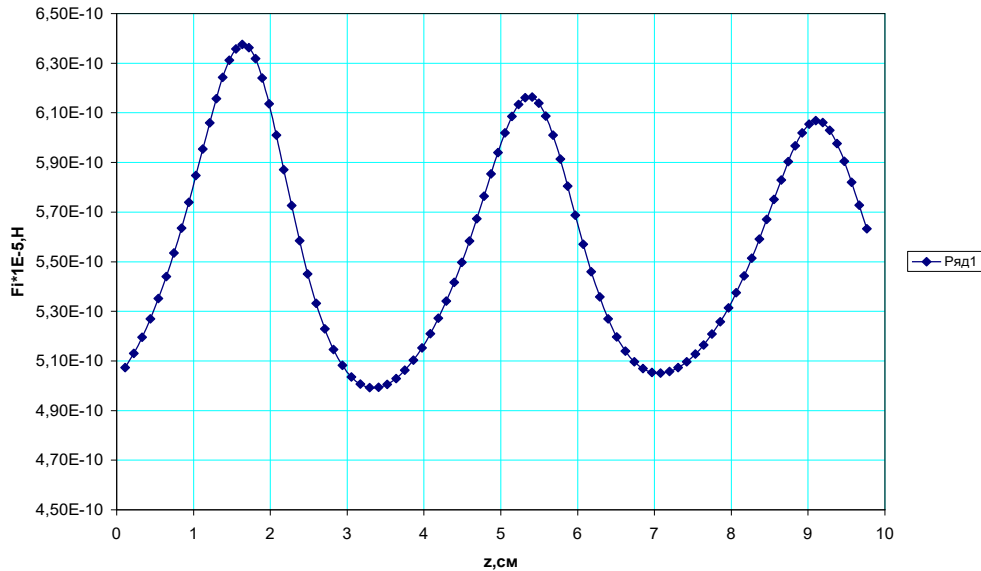


Рис.3. Сила ионного увлечения

Ионное увлечение существенно влияет (или даже определяет) на расположение и конфигурацию пылевых структур в лабораторных плазменных установках, ответственно за вращение пылевых структур (кластеров) в присутствии магнитного поля, влияет на

дисперсию низкочастотных волн в пылевой плазме, инициирует образование войда (от англ. “void”- полость) – пространства, свободного от пылевых частиц в центральной области ВЧ разряда в экспериментах в условиях микрогравитации, определяет коэффициенты диффузии и трения невзаимодействующих броуновских частиц в сильно-ионизованной пылевой плазме. Все это указывает на то, что оценки величины этой силы и ее зависимости от параметров пылевой плазмы достаточно важны.

Литература

1. Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФН. 2004. - Т. 174, - № 5. –С. 495-542.
2. Сухинин Г.И., Федосеев А.В. Самосогласованная кинетическая модель эффекта стратификации разрядов низкого давления в инертных газах // Теплофизика высоких температур. 2006. – Т. 44, - № 2. –С. 165-173.
3. Sukhinin G.I., Fedoseev A.V., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Amangaliyeva R.Zh. Dust particle charging in DC glow discharge plasma // XXVIII ICPIG, Prague. 2007. –P. 2215-2218.
4. Рамазанов Т.С., Джумагулова К.Н., Амангалиева Р.Ж., Сухинин Г.И., Федосеев А.В. Радиальные и аксиальные распределения параметров пылевой плазмы в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока // Вестник КазНУ, Серия физическая. 2007. - №1(23). –С. 33-38.

ГАЗРАЗРЯДТЫ ТОЗАНДЫ ПЛАЗМАДАҒЫ ТОЗАҢ БӨЛШЕККЕ ӘСЕР ЕТЕТІН ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИОНДЫҚ ТАРТҚЫШ КҮШТЕРДІ АНЫҚТАУ

Р.Ж. Аманғалиева

Стратифицированном разрядтағы тозанды плазма параметрлерінің сандық нәтижелері келтірілген. Тозаң бөлшекке әсер ететін электростатикалық күштің аксиал және радиал таралулары анықталды. Иондық тартқыш күштің жуықтама нәтижесі алынды.

DETERMINATION OF ELECTRIC AND ION DRAG FORCES ACTING ON A DUST PARTICLE IN GAS DISCHARGE DUSTY PLASMA

R.Zh. Amangaliyeva

In present work the calculated results of dusty plasma parameters in stratified discharge are presented. The axial and radial distributions of electric force acting on a dust particle are investigated. The estimated result of ion drag force was received.