

РАСЧЕТ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вычислены аксиальное и радиальное распределения электрического поля, функция распределения электронов по энергиям и макроскопические параметры пылевой плазмы стратифицированного тлеющего разряда низкой плотности в вертикально расположенной цилиндрической разрядной трубке.

Последние годы пылевая плазма привлекает большое внимание исследователей как система, представляющая собой открытую нелинейную диссипативную структуру, в которой возможно образование пылевых упорядоченных структур.

Пылевая плазма представляет собой ионизованный газ, содержащий заряженные пылевые частицы микронных размеров. Пылевая плазма широко распространена в природе. Она составляет кольца планет-гигантов, хвосты комет, межпланетные и межзвездные облака [1].

Пылевая плазма является предметом интенсивного изучения в течение последнего десятилетия. Активное исследование началось в связи с целым рядом практических приложений, таких как электродинамика продуктов сгорания, электрофизика МГД генераторов, а также с использованием технологий плазменного напыления и травления в микроэлектронике и развитием производства тонких пленок и наночастиц.

Пылевая плазма в лабораторных условиях активно исследуется в стратах тлеющего разряда постоянного тока и в приэлектродном слое емкостного и индуктивного высокочастотных разрядов.

Рассматривается положительный столб (ПС) тлеющего разряда в аргоне. Известно, что в разрядах инертных газов низкого давления функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) редко бывает равновесной. Движение электронов при низких плотностях газа определяется набором энергии в электрическом поле и потерей энергии в неупругих столкновениях, так как потери энергии электронов в упругих столкновениях малы. Чтобы определить $f_0(r, z, U)$ ФРЭЭ в оси трубки и аксиальное распределение электрического поля была использована кинетическая модель [2]. Модель основана на одновременном решении кинетического уравнения Больцмана для ФРЭЭ и уравнения дрейфа-диффузии для

распределения ионов, а так же уравнения Пуассона для электрического поля.

Ниже представлены результаты моделирования для давления аргона $p = 0,4$ Тор и среднего электрического поля $E_0 = 2,5$ В/см. Разрядный промежуток равен $L = 10$ см, катодная сторона положительного столба соответствует $z_c = 0$ см.

На рис. 1 представлено распределение изотропной части ФРЭЭ на оси разряда. Логарифм изотропной части ФРЭЭ представлен в виде зависимости от аксиальной координаты z и энергии U . Видно, что с приближением к аноду горб ФРЭЭ периодически смещается в область с большей кинетической энергией. Достигнув энергии, при которой электроны в состоянии возбудить первые уровни (~ 20 эВ), горб ФРЭЭ возникает в области с маленькими энергиями. Далее такая картина периодически повторяется в U и z координатах.

На рис. 2. представлено аксиальное распределение электрического поля на оси разрядной трубки. Видно, что аксиальное поле имеет несинусоидальную структуру с сильно выраженными пиками-стратами. Это поле в стратах обеспечивает условие левитации отрицательно заряженной пылевой частицы в некотором сечении страты, где поле тяжести, действующее на частицу, уравновешивается электростатической силой.

Стратифицированный тлеющий разряд интересен для реализации пылевой плазмы также и с той точки зрения, что в разрядной трубке из-за процессов амбиполярной диффузии возникает радиальное электрическое поле, направленное от оси к стенке трубки. Радиальное поле ускоряет ионы, образующиеся при ионизации в разрядной трубке, и замедляет уход электронов на стенку. Именно это поле препятствует уходу отрицательно заряженных пылевых частиц на стенки трубки, осуществляет их захват в центральной части трубки.

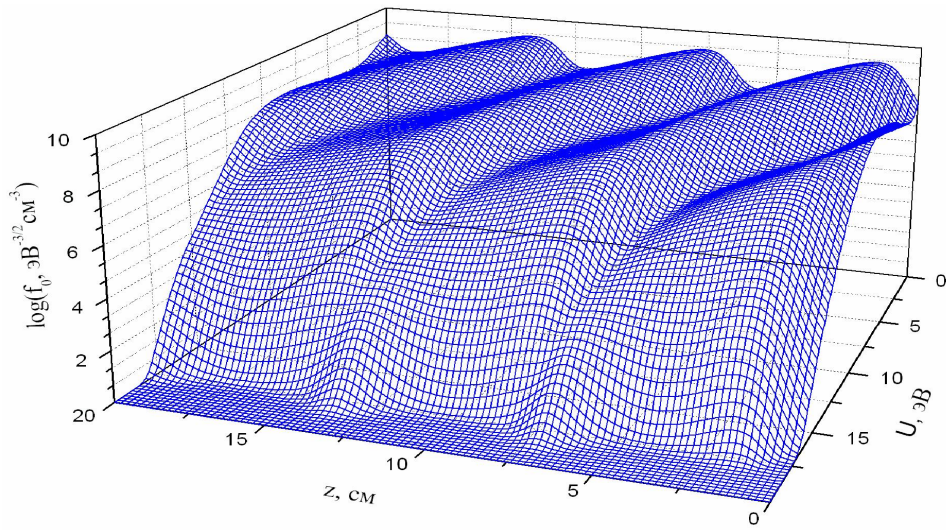


Рис. 1. Пространственное распределение изотропной части ФРЭЭ на оси разряда

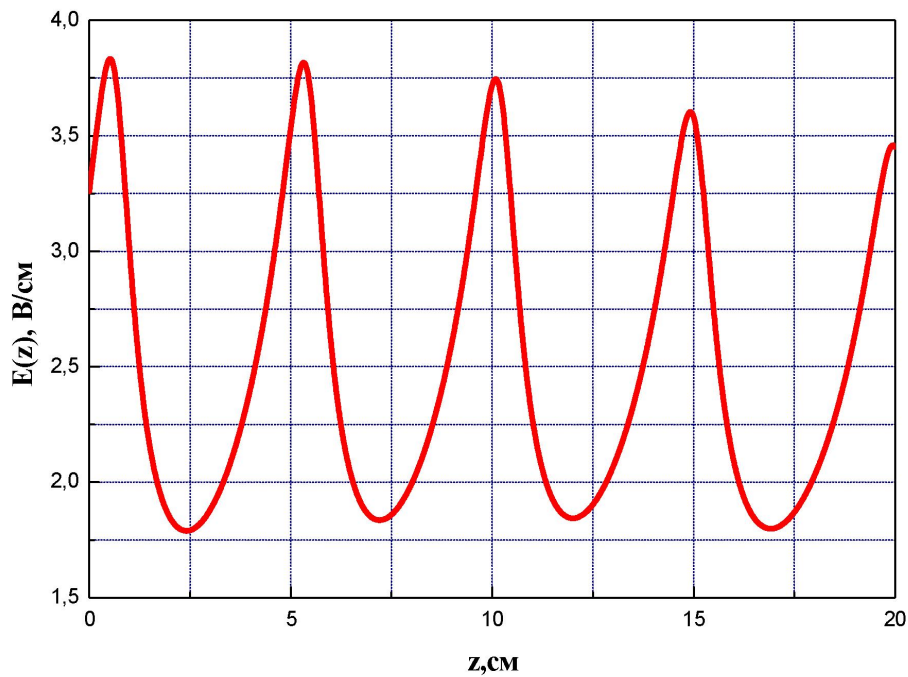


Рис. 2. Аксиальное распределение самосогласованного электрического поля

В настоящее время самосогласованное решение в двумерной области разрядной трубки отсутствует. Поэтому для определения радиального распределения электрического поля использовалось приближение амбиполярной диффузии электронов и ионов на стенку разрядной трубки [3]. В этом случае радиальное электрическое поле и электрический потенциал выражаются через функцию Бесселя и равны:

$$E_r(r, z) = -\frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial r} \approx$$

$$\approx -\frac{k_b T_e}{e_0} \frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial r} \approx \frac{k_b T_e}{e_0} \frac{\alpha_1}{R} \frac{J_1(\alpha_1 r / R)}{J_0(\alpha_1 r / R)}, \quad (1)$$

$$\varphi(r) = \varphi(r, z) - \varphi(r=0, z) \approx \frac{k_b T_e}{e_0} \ln(J_0(\alpha_1 r / R)), \quad (2)$$

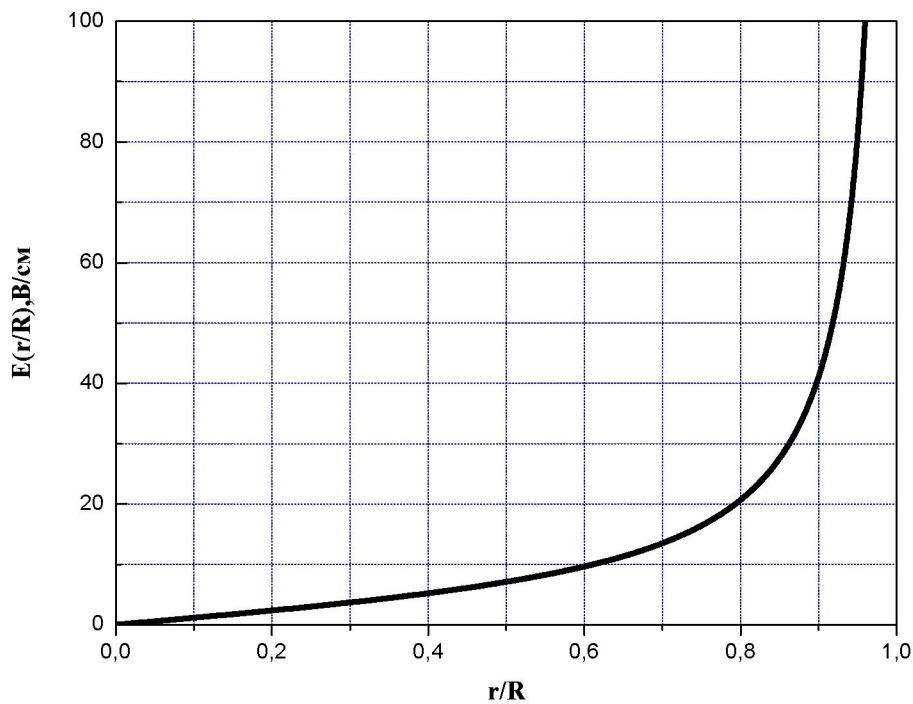


Рис. 3. Распределение радиального электрического поля

где $\alpha_1 = 2,4048$ – первый корень функции Бесселя, $J_0(\alpha_1) = 0$.

На рис. 3 видно, что радиальное электрическое поле меняется сначала линейно с радиусом, а затем резко возрастает при приближении к стенке разрядной трубки.

Макроскопические параметры плазмы, такие как плотность и средняя температура электронов определяются интегралами изотропной части ФРЭЭ:

$$n_e(r, z) = \int_0^\infty f_0(r, z, U) U^{1/2} dU, \quad (3)$$

$$T_e(r, z) = \frac{2}{3} \frac{1}{n_e(r, z)} \int_0^\infty U^{3/2} f_0(r, z, U) dU. \quad (4)$$

На рис. 4 и 5 представлены радиальные и аксиальные зависимости плотности и температуры электронов в разряде постоянного тока. Надо отметить, что в стратифицированном

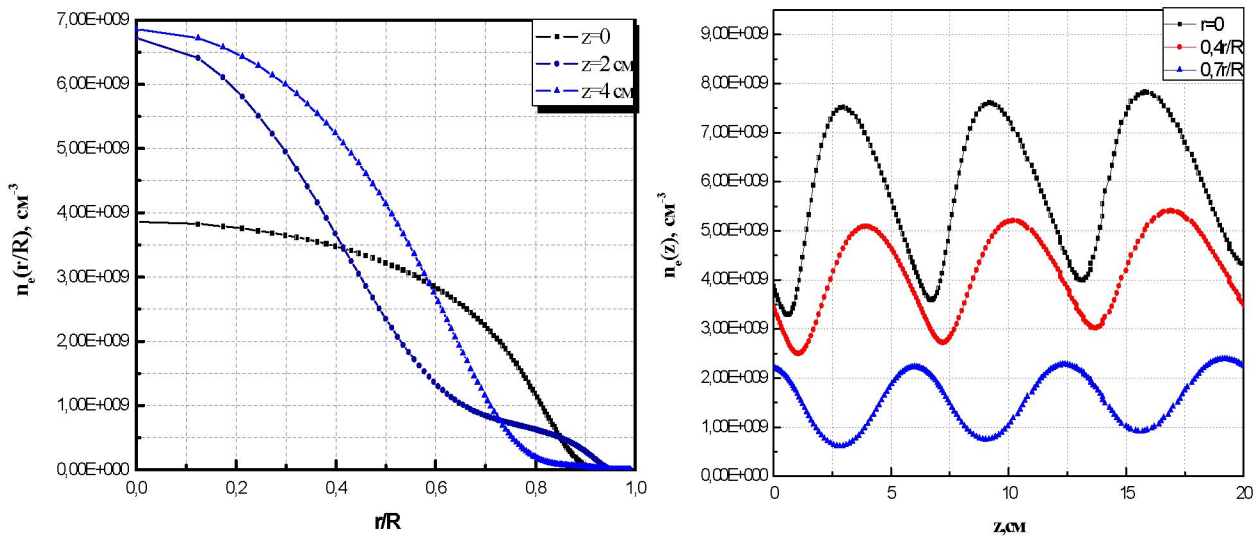


Рис. 4. Радиальные и аксиальные распределения плотности электронов

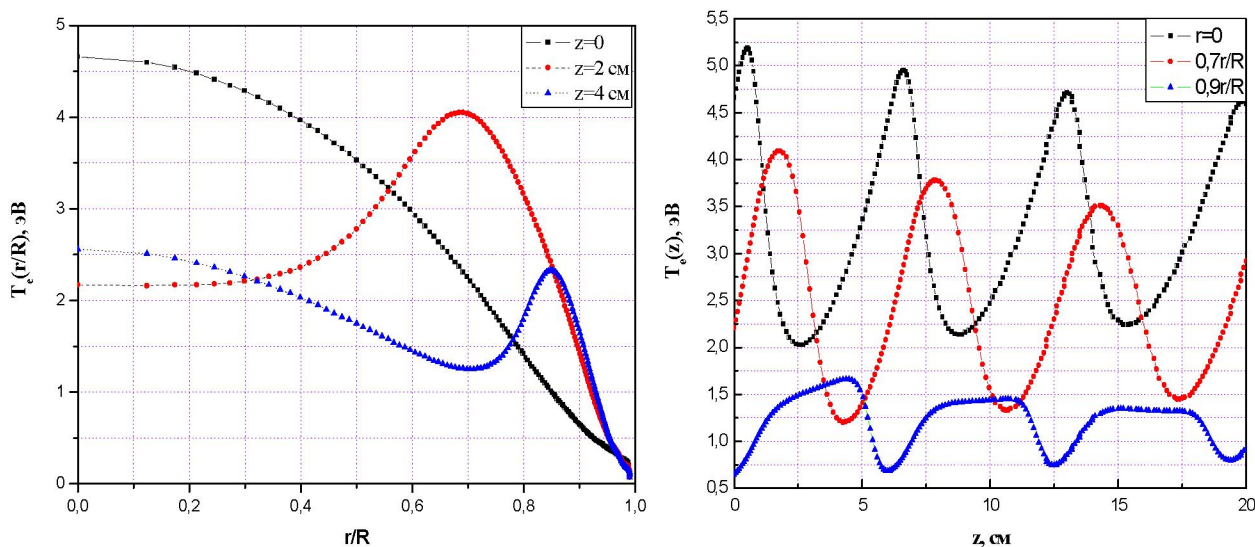


Рис. 5. Радиальные и аксиальные распределения температуры электронов

положительном столбе температура электронов в аргоне при $r = 0$ меняется от 2 до 5,23 эВ, что говорит о сильной нелокальности ФРЭЭ.

Полученные результаты позволяют определить двумерное пространственное распределение плавающего потенциала, заряда пылевых частиц в стратах и двумерное распределение сил, действующих на частицу (электростатической силы и силы ионного увлечения).

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 charge distribution in a stratified glow discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. №40. P. 1-5.

Резюме

Вертикаль орналасқан цилиндрлік разрядты түтікшедегі төмен тығыздықты стратификацияланған солғын разрядтағы электр өрісінің аксиал және радиал таралулары, электрондардың энергиялары бойынша таралу функциясы және тозаңды плазманың макрокопиялық параметрлері есептелінген.

Summary

The axial and radial distributions of electrical field, electron energy distribution function and macroscopic parameters of dusty plasma of stratified glow discharge in vertically located cylindrical tube are calculated.

КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы;

АГУ им. К. Жубанова, г. Актөбе Поступила 20.12.07г.