

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ В СРАВНЕНИИ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

*(Представлена академиком НАН РК Ф. Б. Баумбетовым)*

Получены радиальные функции распределения частиц пылевой плазмы в DC и RF разрядах. На основе метода ланжевеновой динамики выполнены расчеты радиальных функций распределения при параметрах, соответствующих экспериментам. Сравнения теоретических и экспериментальных результатов выполнены.

**Введение.** Как известно, пылевая плазма – это ионизованный газ, содержащий в себе заряженные пылевые частицы микронных размеров. Обычно пылевые частицы заряжаются отрицательно потоком электронов на поверхность частиц при их (пылинок) попадании в объем плазмы. Эти заряженные пылевые частицы под действием различных сил, в том числе межчастичного взаимодействия, образуют плазменно-пылевую структуру, состояние которой может меняться от газофазного до кристаллического [1]. Исследование структурных свойств такой плазмы является одной из важных и интересных задач в физике пылевой плазмы.

### Эксперимент

Для проведения исследований структурных свойств пылевой плазмы были задействованы экспериментальные установки на основе тлеющего разряда постоянного тока и объемного высокочастотного разряда [2, 3].

Эксперименты проводились в следующих условиях разрядов: (для DC разряда) давление рабочего газа (аргона) 0.08~0.2 Торр; ток разря-

да - 0.5~1.5 мА. (для RF разряда) частота разряда (ВЧ-генератора) 13.56 МГц; мощность разряда 0~10 Вт; давление рабочего газа (аргона) 0.05~2 Торр; В экспериментах использовались полидисперсные частицы  $Al_2O_3$  с диаметром 3~6 мкм;

В данной работе наблюдение структуры в обоих установках производилось только в горизонтальном сечении (рис. 1), так как в этом случае, во первых, упорядоченность структуры больше чем в вертикальном сечении и, во вторых, обеспечивается одинаковость размеров частиц отсекаемого горизонтального слоя за счет их сепарации по размерам в системе. То есть автоматически добивается монодисперсность частиц. Выделение горизонтального среза пылевой структуры осуществляется с помощью лазерного ножа.

Были найдены такие параметры пылевой плазмы как параметр связи, экранировки и трения. Параметр связи  $\Gamma$  определялся по высоте первого максимума корреляционной функции [4, 5]. Температура, среднее расстояние между частицами получены из результатов обработки видеозаписей. Эти параметры использовались при компьютерном моделировании системы.

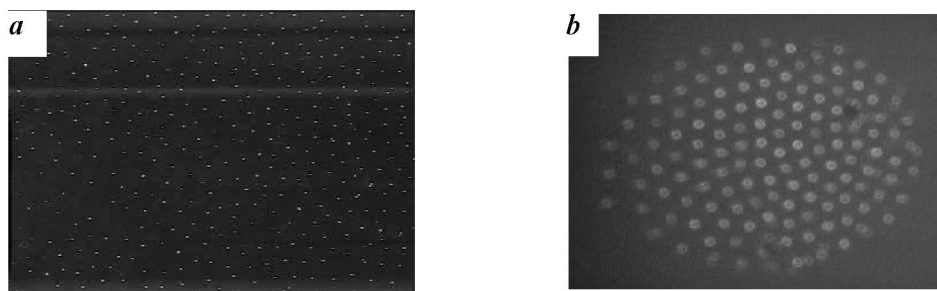


Рис. 1. Фотоизображение плазменно-пылевых структур: а – в RF-разряде, б – в DC-разряде

$$\Gamma = (Z_d e)^2 / (a k_B T_d),$$

$$\kappa = a / r_D, \quad (1)$$

$$\theta = \frac{P[Pa] \cdot C}{a_p \rho \omega_d},$$

где  $a = \left( \frac{3}{4\pi n_d} \right)^{1/3}$  – среднее расстояние между

пылинками,  $r_D = \left( \frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2} \right)^{1/2}$  – радиус Дебая,

$\omega_d = \left( \frac{4\pi n_d (Z_d e)^2}{m_d} \right)^{1/2}$  – плазменная частота пы-

левой компоненты,  $C = 8,6$  для аргоновой плазмы.

Для вычисления радиальной функции распределения была использована специальная программа, обрабатывающая данные видеок кадров (координаты частиц). На рис. 2–5 приведены экспериментально полученные радиальные

функции распределения, а также расчеты компьютерного моделирования по методу Ланжевеновой динамики [6].

Как видно из рис. 2 высота первого пика обеих радиальных функций не превышает значения 2,7, что говорит о том, что в данном случае имеет место жидкостное состояние. А в рис. 3 высота первого пика превышает критическое значение, однако расчеты остаются меньше 2,7. Таким образом, с учетом погрешностей, можно сказать, что система во втором эксперименте находится в практически кристаллическом состоянии. Фотография на рис. 1b была сделана как раз во время выполнения эксперимента соответствующий графику на рис.3 и демонстрирует высокую степень упорядоченности в структуре.

Из сравнения парно-корреляционных функций распределения пылевых частиц в RF-разряде (рис. 3), видно, что при более высоких давлениях рабочего газа и малых мощностях разряда пылевые структуры являются более упорядоченными, чем при низких давлениях и больших мощностях. То есть с увеличением мощности

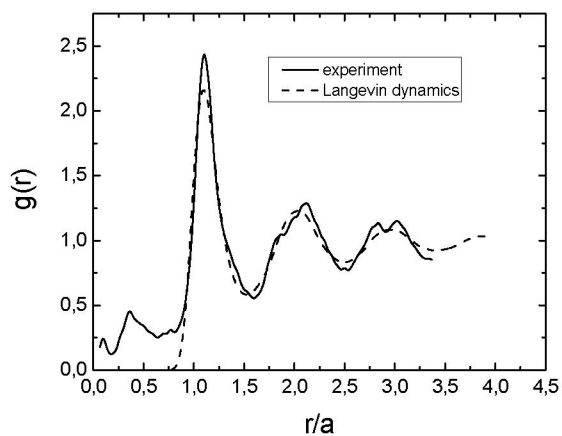


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные радиальные функции распределения плазменно-пылевых частиц в DC-разряде

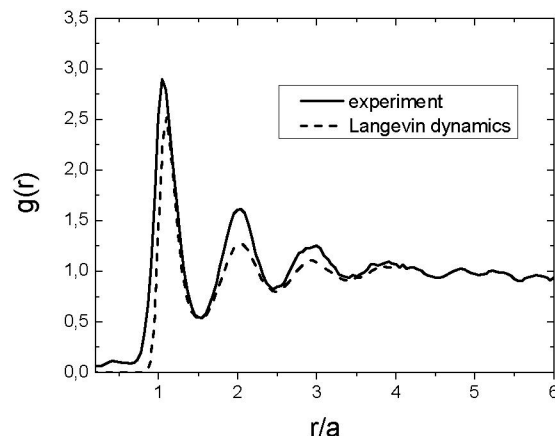


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные радиальные функции распределения плазменно-пылевых частиц в DC-разряде

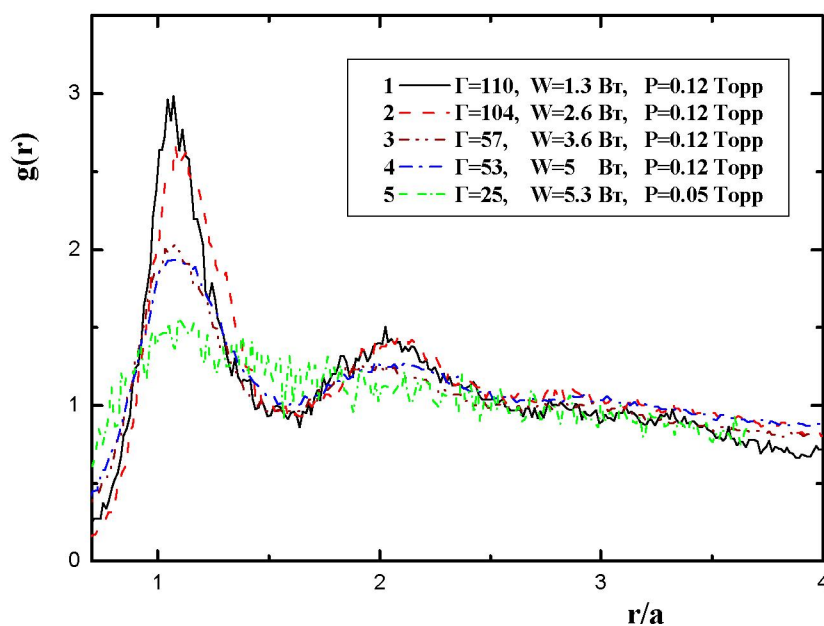


Рис. 4. Парные корреляционные функции распределения плазменно-пылевых частиц в RF-разряде

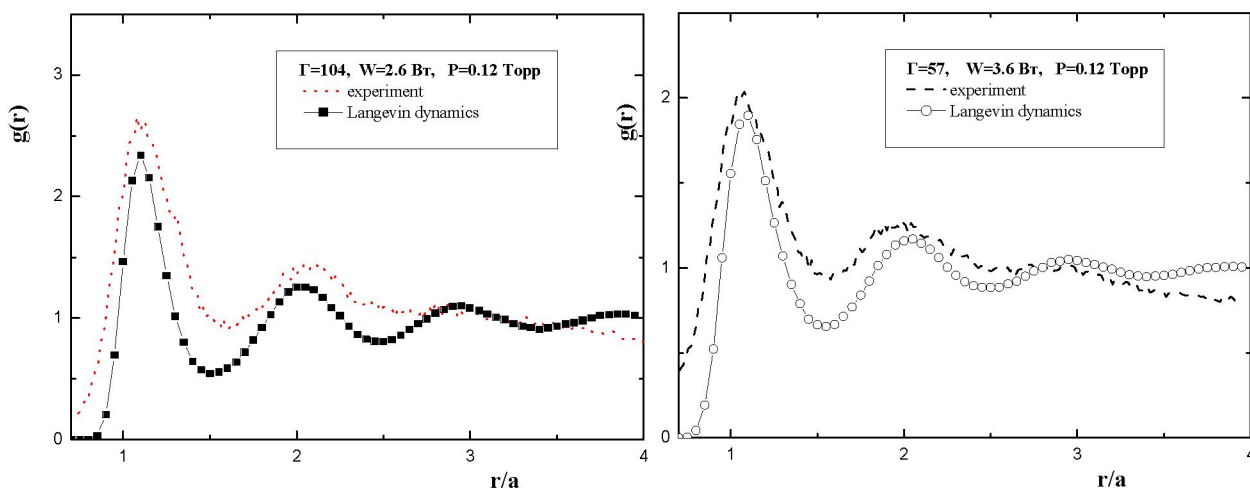


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные радиальные функции распределения плазменно-пылевых частиц в RF-разряде

разряда и с уменьшением давления рабочего газа упорядоченность в структуре разрушается.

Как видно из рис. 3, в первых четырех экспериментах, которым соответствуют первые четыре корреляционные функции, давление газа поддерживалось постоянным, а мощность разряда варьировалась, как указано на рис.4. И, наконец, в последнем пятом эксперименте мощность разряда оставалась примерно такой же, как у четвертого эксперимента, но уменьшалось давление рабочего газа.

При сравнении первых четырех корреляционных функций можно заметить, что наблюдается уменьшение высоты первого максимума с уве-

личением мощности разряда, которое влечет за собой увеличение температуры пылинок, а, следовательно, уменьшение  $\Gamma$ . При постоянной же мощности и уменьшении давления опять-таки наблюдается уменьшение параметра неидеальности, т.е. упорядоченности структуры. По-видимому, это объясняется тем, что при падении давления уменьшается поток электронов на пылевые частицы, а, следовательно, ее заряд.

На рис. 5. представлены сравнения экспериментальных кривых RF-разряда с расчетами компьютерного моделирования, полученные по методу ланжевеновой динамики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* // Успехи физических наук. 2004. Т. 174.
2. *Рамазанов Т.С., Джумагулова К.Н., Досболаев М.К., Джумабеков А.Н., Петров О.Ф., Гавриков А.В., Стаценко К.Б.* // ФНТП-2007. Т. 2. С. 200.
3. *Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Dzhumabekov A.N., Petrov O.F., Antipov S.N.* // PPPT-5. Minsk, 2006.
4. *Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В., Шахова И.А., Семенов Ю.П.* // Физика плазмы. 2003. Т. 29, № 8. С. 698-713.
5. *Ramazanov T.S., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K.* // PPPT-5. Minsk, 2006.
6. *Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Kadyrsizov E.R., Petrov O.F., Gavrikov A.V.* // J. Phys. A: Math. And Gen. 2006, **39**, 4521–4525.

## Резюме

DC- және RF-разрядтарындағы тозаңды плазма бөлшектерінің радиалды таралу функциялары алынған. Ланжевен динамикасы әдісі негізінде экспериментке сәйкес келетін параметрлер үшін радиалды таралу функциялары есептелінді. Теоретикалық және эксперименталдық нәтижелер өзара салыстырылды.

## Summary

In this work the radial distribution functions of dust particles obtained experimentally in DC and RF discharges are presented. They were calculated from data of video recording of dust structures. On the basis of the Langevin dynamics the computer simulation for each experiment was performed. The comparisons and conclusion are presented.

*КазНУ им. аль-Фараби,  
г. Алматы*

*Поступила 12.12.07г.*