



УДК 533.9

*О.Ф. Петров<sup>1</sup>, М.Н. Васильев<sup>2</sup>, В.Е. Фортвов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия

## **ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ: МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Разработан комплекс оптических методов для определения параметров пылевой компоненты плазмы при воздействии внешних сил на плазменно-пылевые структуры (оптическое излучение, магнитные поля, криогенные температуры, электронные пучки).*

### **ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА, ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ**

**1. ВВЕДЕНИЕ.** Пылевая плазма является частично ионизованным газом с положительно или отрицательно заряженными ( $\sim 10^3 - 10^5 e$ ) частицами субмикронных или микронных размеров ( $\sim 0,01 - 10$  мкм). Широкая распространенность плазменно-пылевых систем, а также целый ряд их уникальных и необычных свойств, таких как способность к самоорганизации и образованию упорядоченных структур, получивших название кулоновских (или плазменных) кристаллов, делают пылевую плазму чрезвычайно привлекательным и интересным объектом исследования.

Пылевые частицы являются достаточно большими для эффективного рассеяния света, несмотря на малую объемную долю фракции, поэтому, в отличие от обычных атомарных жидкостей и газов, пылевые частицы могут быть по отдельности зарегистрированы видеокамерой и другими оптическими приборами. В данной работе разработан комплекс оптических методов для определения параметров пылевой компоненты плазмы при воздействии внешних сил на плазменно-пылевые структуры (оптическое излучение, магнитные поля, криогенные температуры, электронные пучки).

**2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ.** Изучались процессы теплопереноса в плазменно-пылевых жидкостных структурах. Эксперименты проводились для частиц окиси алюминия (с размерами  $\sim 3 - 5$  мкм) в плазме ВЧ разряда. Выполнены измерения коэффициента теплоемкости пылевых частиц в плазме. По результатам анализа стационарного и нестационарного процессов теплопереноса восстановлены коэффициенты теплопроводности и температу-

ропроводности для жидкостных пылевых структур. Получена температурная зависимость этих коэффициентов, которая качественно согласуется с результатами численного моделирования.

Проведено экспериментальное исследование вязких свойств плазменно-пылевой жидкости. Разработан оригинальный метод определения коэффициента сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных распределений дрейфовой скорости макрочастиц, движение которых обусловлено воздействием лазерного излучения, позволил получить зависимости коэффициента сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости от величины давления плазмообразующего газа и мощности лазерного излучения, а также сделать выводы о неьютоновом поведении плазменно-пылевой жидкости и наличии притяжения между пылевыми частицами.

Проведен структурный и динамический анализ плазменно-пылевых образований в тлеющем разряде постоянного тока при температурах жидкого азота (77 К) и жидкого гелия (4,2 К). Определены парные корреляционные функции пылевых структур, температуры и коэффициенты диффузии микрочастиц. Обнаружено развитие плазменно-пылевой неустойчивости (нелинейных автоколебаний) в плазменно-пылевой структуре при температуре 77 К. При температуре жидкого гелия (4,2 К) обнаружены плазменно-пылевые протяженные структуры со свободной поверхностью, движущиеся в плазменном столбе.

С помощью интегральных уравнений теории жидкости из экспериментально измеренных парных корреляционных функций найдены заряд, радиус экранирования и потенциал взаимодействия пылевых частиц в слабокоррелированной структуре. По этим данным оценены фактор сжимаемости, сжимаемость и внутренняя энергия пылевой подсистемы.

Выполнено экспериментальное исследование трехчастичной корреляции для макрочастиц в пылевой плазме. Изучена область применимости суперпозиционного приближения. Наблюдалось формирование регулярных кластеров макрочастиц как в экспериментальных плазменно-пылевых системах, так и в моделируемых жидкостных структурах.

Проведены экспериментальные исследования плазменно-пылевых структур, формирующихся в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 0,25 Тл. Наблюдалось вращение небольших пылевых структур в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси симметрии разряда. Получена зависимость значения угловой скорости вращения пылевого облака в страте тлеющего разряда постоянного тока при различных значениях магнитного поля. Обнаружен уход пылевых частиц из приосевой области в пристеночную при значении индукции аксиального магнитного поля  $\sim 0,07$  Тл, при этом угловая скорость вращения частиц в пристеночной области составляла  $\sim 1 - 2$  рад/с. Получена оценоч-

ная зависимость угловой скорости вращения пылевой структуры от индукции магнитного поля.

Также проведены исследования больших плазменно-пылевых структур, содержащих  $\sim 10^3$  частиц. Эксперименты проводились с разрядом в неоне при воздействии аксиального магнитного поля индукцией до 0,03 Тл, при этом вращения таких структур не наблюдалось. Из анализа кривых массопереноса, полученных в результате обработки видеоданных, был вычислен параметр неидеальности. Найдены зависимости кинетической энергии и коэффициента диффузии частиц при различных значениях индукции магнитного поля. Обнаружено, что с увеличением индукции аксиального магнитного поля наблюдается увеличение параметра неидеальности и уменьшение коэффициента диффузии плазменно-пылевых структур.

Проведен анализ вращения плазменно-пылевой компоненты, который показал, что инверсия радиального электрического поля и, следовательно, скорости вращения пылинок в магнитном поле может быть связана с двумя факторами: изменением знака радиальной составляющей градиента плотности ионов  $dn_i/dr$  и замагниченностью электронов до такой степени, что их подвижность становится меньше подвижности ионов. Приведена оценка индукции магнитного поля  $\sim 10^3$ , при которой стенка газоразрядной трубки из-за замагниченности плазмы становится положительно заряженной.

Предложена методика для одновременного определения параметров пылевой компоненты плазмы, таких как температура макрочастиц, их коэффициент трения и характерная частота колебаний. Выполнены оценки параметра неидеальности исследуемых систем. Приведено сравнение измеренных характеристик пылевой подсистемы (коэффициентов диффузии, парных корреляционных функций, зарядов и коэффициентов трения макрочастиц) с существующими теоретическими и численными данными.

Эксперименты проводились для монодисперсных пластиковых частиц плотностью ( $\rho_p \approx 1,5 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) различных размеров (радиусом  $a_p \approx 2,75 \text{ мкм}$  и  $a_p \approx 6,37 \text{ мкм}$ ) в приэлектродном слое ВЧ разряда в аргоне с давлением  $P = 0,03 - 0,5$  Торр, при мощности разряда  $W \approx 2 - 30$  Вт. В результате обработки видеозаписей горизонтального сечения пылевого облака были получены автокорреляционные функции скоростей частиц  $\langle V(0)V(t) \rangle = \langle V_x(0)V_x(t) \rangle + \langle V_y(0)V_y(t) \rangle / 2$ , функции массопереноса ( $D_{G-K}(t)$ ,  $D_{msd}(t)$ ), коэффициенты диффузии  $D$ , парные корреляционные функции  $g(l)$  и концентрация пылевых частиц.

Параметры макрочастиц, такие как среднеквадратичная скорость  $V_T^2 = T/M$  их стохастического «теплового» движения, характерная частота  $\omega_c$  и коэффициент трения  $\nu_{fr}$  были получены путем наилучшего согласования между измеренными функциями  $\langle V(0)V(t) \rangle$ ,  $D_{msd}(t)$  и  $D_{G-K}(t)$  и соответствующими аналитическими решениями для гармонического осциллятора при

помощи метода последовательных итераций. Информация об этих параметрах позволила оценить величину эффективного параметра неидеальности  $\Gamma^*$  и минимальную величину зарядов пылевых частиц.

Величина восстановленной среднеквадратичной скорости пылевых частиц  $V_T^2$  находилась в соответствии с результатами ее определения из измерений функций распределения скоростей частиц путем наилучшей аппроксимации этих функций функциями Максвелла. Корректность определения характерных частот, параметров неидеальности, зарядов и коэффициентов трения макрочастиц при помощи предлагаемой методики была проверена путем сравнения измеренных характеристик с существующими теоретическими и численными данными.

**3. БЛАГОДАРНОСТИ.** Данная работа была частично поддержана грантом CRDF RUP2-2891-MO-07 и грантом NWO 047.017.039.

*O.F. Petrov<sup>1</sup>, M.N. Vasiliev<sup>2</sup>, V.E. Fortov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institution of the Russian Academy of Science Joint Institute for High Temperatures RAS,  
Moscow

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National University), Russia

### **DUST-PLASMA STRUCTURES UNDER ACTION OF EXTERNAL FORCES: DIAGNOSTICS METHODS AND RESULTS OF INVESTIGATIONS**

*The optical methods were developed for determination of dust parameters in plasma under action of external forces on dust-plasma structures (optical radiation, magnetic fields, cryogenic temperatures, electron beams).*

DUSTY PLASMA, PLASMA DIAGNOSTICS