

**АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШТЫКОВ**

преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*shtykoff@gmail.com*

## ИЗМЕРЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ\*

Показано, что для расчета реальных значений скоростей макрочастиц, составляющих плазменно-пылевые структуры, с использованием скоростной съемки существуют оптимальные частоты съемки объектов. Проведенные эксперименты по набору статистически достоверных данных приводят к заключению, что коэффициенты диффузии, рассчитанные различными методами, совпадают только в определенном диапазоне данных, полученных при использовании скоростной съемки на определенных частотах.

Ключевые слова: плазменно-пылевые структуры, коэффициент самодиффузии, кинетические характеристики

### ВВЕДЕНИЕ

Определение скоростей макрочастиц, составляющих плазменно-пылевые структуры (ППС), а также коэффициентов диффузии является важной задачей для расчета кинетических характеристик ППС, определения фазового состава ППС, более глубокого изучения процессов массопереноса в структурах. Основной группой методов для определения и расчета кинетических характеристик ППС являются бесконтактные методы, основанные на получении спектральной картины рассеянного излучения на структуре, или методы видеорегистрации структуры. Все они имеют достаточно высокую точность, но их применимость зависит от фазового состояния ППС. Комбинированное воздействие на ППС внешних сил, сил межчастичного взаимодействия и процессов дисципации приводит к формированию как квазистационарных структур (кристаллическая фаза), так и сложных колебательных и даже хаотических систем (жидкая или газообразная фаза).

На сегодняшний день существует большое количество работ, описывающих методики расчета скоростей ППС в зависимости от условий их создания, их состава и процессов, протекающих в них. В [1] эксперименты проводились для монодисперсных частиц в приэлектродном слое высокочастотного разряда в аргоне давлением  $P = 0,03\text{--}0,5$  Торр при мощности разряда 2–30 Вт. Регистрация положения пылевых частиц осуществлялась высокоскоростной CMOS-камерой с частотой съемки 500 кадров в секунду. Время эксперимента составляло 5–10 с. Видеозапись обрабатывалась при помощи специальной программы, которая позволяла идентифицировать положения отдельных пылевых частиц в поле зрения видеосистемы. В результате обработки видеозаписей горизонтального сечения были получены скорости макрочастиц при разных значениях давления газа. В [5] эксперименты проводились для монодисперсных полимерных частиц радиусом  $a = 1,7$  мкм в широком диапазоне параметров плазмы, который обеспечивался путем измене-

ния давления  $P = 0,36\text{--}0,98$  мбар и мощности  $W = 0,15\text{--}0,98$  Вт емкостного ВЧ-разряда в аргоне. Видеозапись обрабатывалась при помощи специальной программы, которая позволяла идентифицировать положения и вычислять смещение отдельных частиц. На основе программы определялись спектры скоростей макрочастиц в различных областях наблюдаемых пылевых структур. В [4] исследовалась кинетика макрочастиц в упорядоченных плазменно-пылевых структурах комплексной плазмы тлеющего разряда в газоразрядных трубках при низких давлениях (0,3–3 Торр) и малых токах (0,3–1,5 мА). Съемка велась с помощью ПЗС-камеры с частотой 25 кадров в секунду. Программой на основе Imaq Vision определялись положения отдельных частиц. Показана зависимость скорости макрочастиц от таких параметров, как давление и ток. В рассмотренных работах для определения скорости частиц применялся метод прямой регистрации, то есть определялись положения отдельных частиц на видеокадрах. Для съемки плазменно-пылевых структур использовались камеры с частотой съемки от 25 до 500 кадров в секунду.

В настоящей работе проведены измерения скоростей с помощью высокоскоростной видеокамеры со скоростями от 250 до 1000 кадров в секунду. На основании полученных данных рассчитаны коэффициенты диффузии ППС методом прямой регистрации. Рассчитанные значения коэффициентов диффузии были сопоставлены со значениями, полученными методом корреляционной спектроскопии. Объектом исследования являются упорядоченные плазменно-пылевые структуры в плазме инертных газов, которые создаются путем инжектирования частиц вещества в плазменный разряд. Основным методом, используемым в работе, является метод прямой регистрации. Данным методом определены значения коэффициентов самодиффузии и получены данные о скоростях движения макрочастиц, составляющих ППС.

## МЕТОД ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ

В методе прямой регистрации определяется положение всех частиц пылевой плазмы на изображении. Изображение содержит сотни частиц. Их координаты по оси x и по оси y могут быть вычислены с использованием метода моментов, который заключается в оценке подпиксельной позиции частицы. Суммарная ошибка в вычислении включает pixel locking эффект и случайный шум на каждом пикселе. Координаты частицы обычно оценивают как центр яркого пятна на изображении. После вычисления позиции частиц скорость измеряется как отношение смещения частиц на двух последовательных кадрах к интервалу времени между кадрами. Также возможно определять скорость частиц при слежении за их перемещением на множестве последовательных пар кадров и рассчитывать значение коэффициента диффузии, пользуясь следующей формулой:

$$D(t) = \frac{\langle\langle (r(t) - r_0(t))^2 \rangle\rangle_N}{2nt},$$

где  $(t)$  – начальный радиус вектор-частицы,  $r(t)$  – радиус вектор-частицы в момент времени  $t$ ,  $\langle\rangle$  – усреднение по ансамблю, состоящему из  $N$  частиц, а – усреднение по всем отрезкам времени длительностью  $t$  за полное время измерений. Время  $t$  – время проведения эксперимента,  $n = 2$  или  $n = 3$  соответственно для двумерной или трехмерной систем [6].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения эксперимента была использована установка «Плазменный кристалл». Подробное описание установки приведено в [7]. Стеклянная разрядная трубка, в которой индуцировалась плазма тлеющего разряда и формировалась ППС, откачивалась до давления  $10^{-5}$  Па и заполнялась рабочим газом. Дляброса частиц во время эксперимента применялся контейнер с частицами. После включения высоковольтного источника тока разрядный ток в трубке задавался набором сопротивлений. Визуализация пылевой структуры осуществлялась полупроводниковым лазером «DTL-316» и набором линз, формирующих «лазерный нож», в рассеянном свете которого возможно наблюдение ППС. В состав программно-аппаратного комплекса для видеозображений входили: скоростная видеокамера «Hispec 1» и программное обеспечение «Hispec Control Software», реализующее получение данных в режиме реального времени, сохранение и их обработку.

Эксперимент проводился следующим образом: в объем трубки напускался рабочий газ в диапазоне давлений от 20 до 120 Па. Были использованы неон и аргон. После генерации разряда устанавливалось значение тока разряда на уровне 1,5 мА. В область плазменного разряда производилось инжектирование пылевых частиц (цинк, оксид алюминия), после чего выдерживалось время для стабилизации параметров ППС. Далее производилась настройка лазера для визуализации ППС и

регистрация видеофрагмента в течение одной минуты с разными скоростями от 25 до 1500 кадров в секунду. После сохранения экспериментальных данных в виде видеоизображений производился расчет значений коэффициентов диффузии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведения эксперимента по измерению скоростей движения макрочастиц, составляющих ППС, находящихся в «жидком» фазовом состоянии, было выявлено, что при увеличении частоты кадров средняя скорость движения частиц увеличивалась (табл. 1). Это можно объяснить тем, что при расчете средней скорости частицы берется величина ее перемещения за момент времени  $t$ , равный времени, прошедшему между двумя кадрами (в случае съемки с частотой 25 кадров в секунду это составляет 0,04 сек., а для частоты 1500 кадров в секунду – 0,6 миллисекунды). Очевидно, что при достаточно высокой скорости движения макрочастиц увеличение частоты кадров будет уточнять траекторию движения частицы и отражать реальный путь, проходимый ею за разный момент времени. При этом при высоких скоростях съемки траектория, которую прошла частица между кадрами, сравнима с размерами частицы, что вносит существенную погрешность в расчет реального пути, который прошла частица за время  $t$ . Таким образом, нужно определить оптимальный режим скоростной съемки, необходимый для вычисления реальной скорости частицы, как мгновенной, так и средней.

**Таблица 1**  
Средние значения скоростей макрочастиц, рассчитанных при разных частотах съемки

Частота кадров, кадры/сек.	V, см/сек
25	$0,031 \pm 0,003$
50	$0,06 \pm 0,007$
100	$0,11 \pm 0,02$
150	$0,13 \pm 0,02$
250	$0,14 \pm 0,03$
300	$0,14 \pm 0,03$
375	$0,18 \pm 0,04$
500	$0,19 \pm 0,06$
750	$0,25 \pm 0,09$
1500	$0,37 \pm 0,17$

Экспериментальным путем, на основании измерения скоростей частиц для ППС с «жидким» фазовым состоянием, состоящих из частиц цинка, левитирующих в аргоновой плазме (диапазон токов 1–1,5 мА, давлений 100–130 Па), оптимальная частота съемки скоростной камерой была определена в диапазоне [100; 500] кадров в секунду.

Для подтверждения этих данных было произведено сравнение значений коэффициента самодиффузии, полученных методом прямой регистрации с использованием изображений, полученных при съемке с частотой в заявленном диапазоне и значениями коэффициента самодиффузии, рассчитанными методом корреляционной спектроскопии. Оба метода дают равные, в пределах пог-

решности, значения коэффициента самодиффузии (табл. 2). Также было проведено сравнение полученных данных с данными, представленными в экспериментальных работах других авторов [1], [2], [5], на основании чего можно сделать вывод, что порядок величины коэффициента сравним, что может говорить о сопоставимости данных. А тот факт, что значения, полученные экспериментально, согласуются с теоретическими моделями [3], дает право утверждать, что полученные данные в рамках настоящей работы достоверны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе произведен расчет значений скоростей макрочастиц, составляющих ППС, на основании данных скоростной съемки. Сделан вывод о том, что существуют оптимальные режимы съемки, при которых возможен более точный расчет значений скоростей движения макрочас-

**Таблица 2**  
Сравнение данных, полученных методом прямой регистрации и методом корреляционной спектроскопии

	Ток, мА	Давление, Па	Газ	Материал частиц	D, см <sup>2</sup> /с	Доверительный интервал (p = 0,9)
Метод корреляционной спектроскопии	0,6	80	Ar	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 × 10 <sup>-7</sup>	±0,09 × 10 <sup>-7</sup>
	0,8				1,3 × 10 <sup>-7</sup>	
	1,0		Ne	Zn	0,9 × 10 <sup>-7</sup>	
	1,2				1,5 × 10 <sup>-7</sup>	
Метод прямой регистрации	0,6	80	Ar	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3 × 10 <sup>-7</sup>	±0,1 × 10 <sup>-7</sup>
	0,8				1,3 × 10 <sup>-7</sup>	
	1,0		Ne	Zn	1,0 × 10 <sup>-7</sup>	
	1,2				1,4 × 10 <sup>-7</sup>	

тиц. Выводы подтверждаются сравнением рассчитанных значений коэффициентов диффузии, сделанных на основании данных, полученных различными методами.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортов В. Е. Анализ процессов массопереноса в неидеальных диссипативных системах (эксперименты в пылевой плазме) // ЖЭТФ. 2008 Т. 133. В. 5. С. 367–379.
2. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортов В. Е. Моделирование процессов массопереноса на малых временах наблюдения в неидеальных диссипативных системах // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. В. 5. С. 1153–1165.
3. Карапев В. Ю., Штыков А. С. Изучение динамики фазовых состояний плазменно-пылевых структур с помощью метода корреляционной спектроскопии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2015. № 4 (149). С. 104–109.
4. Пискунов А. А. Кинетика макрочастиц в упорядоченных структурах комплексной плазмы тлеющего разряда: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2011. 122 с.
5. Фортов В. Е., Ваулина О. С., Петров О. Ф., Молотков В. И. Динамика макрочастиц в пылевой плазме в условиях микрогравитации (первые эксперименты на МКС) // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. В. 4. С. 798–814.
6. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luirova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macro particle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.

Shtykov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## MEASUREMENT OF KINETIC CHARACTERISTICS' VALUES OF DUSTY PLASMA STRUCTURES BY MEANS OF HI-SPEED VIDEO CAMERA

It is shown that the calculation of actual velocities of plasma dusty particles with the use of high-speed camera can be conducted with the help of the existing optimum rate of shooting. The experiments carried out on a set of statistically significant data lead to the conclusion that the diffusion coefficients calculated by various methods coincide only in a certain range of data obtained with the use of high-speed photography at certain frequencies.

Key words: dusty plasma, self-diffusion coefficient, kinetic characteristics

## REFERENCES

1. Vaulina O. S., Petrov O. F., Fortov V. E. Analysis of mass transfer processes in imperfect dissipating systems (experiments in a dusty plasma) [Analiz protsessov massoperenosa v neideal'nykh dissipativnykh sistemakh (eksperimenty v pylevoy plazme)]. ZhETF. 2008. Vol. 133. B. 5. P. 367–379.
2. Vaulina O. S., Petrov O. F., Fortov V. E. Modeling of mass transfer processes at small observation times in non-ideal dissipative systems [Modelirovaniye protsessov massoperenosa na mal'ykh vremenakh nablyudenija v neideal'nykh dissipativnykh sistemakh]. ZhETF. 2005. Vol. 127. B. 5. P. 1153–1165.
3. Karasev V. Yu., Shtykov A. S. The investigation of phase transition dynamics in dusty plasma by correlation spectroscopy method [Izuchenie dinamiki fazovykh sostoyaniy plazmenno-pylevykh struktur s pomoshch'yu metoda korrelyatsionnoy spektroskopii]. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki" [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2015. № 4 (149). P. 104–109.
4. Piskunov A. A. Kinetika makrochastits v uporyadochennykh strukturakh kompleksnoy plazmy tleyushchego razryada: Diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Kinetics of particulates in ordered structures of complex plasma glow discharge: Dis. ... cand. phys.-mat. sciences]. Petrozavodsk, 2011. 122 p.
5. Fortov V. E., Vaulina O. S., Petrov O. F., Molotkov V. I. Dynamics of particulates in in dusty plasma in micro-gravity (the first experiments on the ISS) [Dinamika makrochastits v pylevoy plazme usloviyakh mikrogravitatsii (pervye eksperimenty na MKS)]. ZhETF. 2003 Vol. 123. B. 4. P. 798–814.
6. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F. Dusty plasma [Pylevaya plazma]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Phys. Def. Science]. 2004. (174). 5 h. P. 495–544.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luirova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macro particle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.

Поступила в редакцию 15.09.2015