

# ПЛАЗМА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ: САМООРГАНИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ

В.И. Молотков, М.Ю. Пустыльник, В.М. Торчинский, В.Е. Фортон

*Институт теплофизики экстремальных состояний РАН,  
125412, Москва, ул. Ижорская 13/19, michael2206@mail.ru*

Ионизированный газ, содержащий пылевые частицы, является предметом изучения в течение многих лет. Однако в последние десятилетия прогресс в этой области был особенно стремительным в связи с различными техническими приложениями (процессы горения, плазменные технологии, физика атмосферы, управляемый термоядерный синтез). К тому же пыль и пылевая плазма широко распространены во вселенной (планетные кольца, межзвездные облака, хвосты комет).

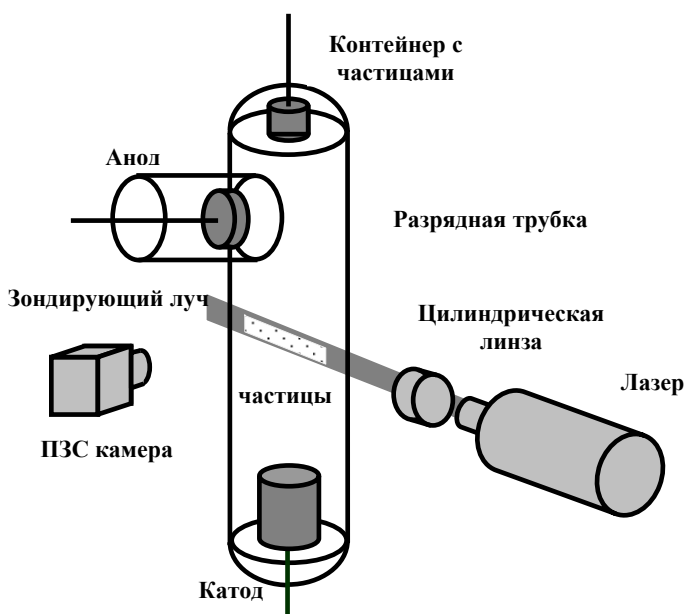
Кристаллизация пылевых частиц в плазме была предсказана в 1986 году. В [1] было показано, что пылевые частицы, помещенные в газоразрядную плазму, заряжаясь и взаимодействуя посредством экранированного кулоновского потенциала, при определенных условиях должны образовывать упорядоченные структуры жидкостного и даже кристаллического типа. Это явление было экспериментально обнаружено в 1994 г. [2], и с тех пор исследования в этой области ведутся в десятках лабораторий по всему миру. Наиболее полный на настоящий момент обзор работ по физике пылевой плазмы содержится в монографии [3].

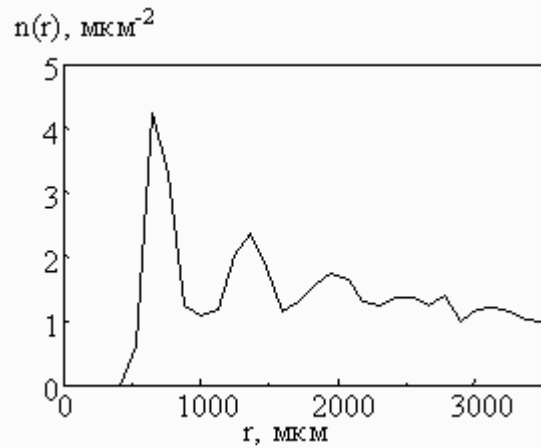
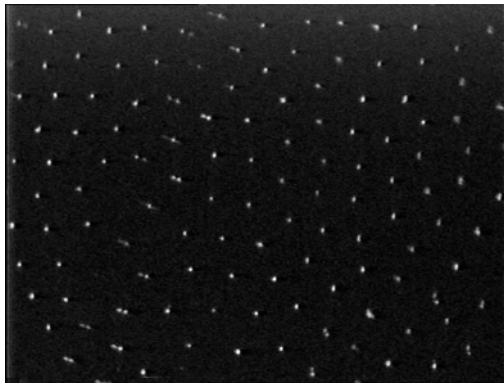
Одним из направлений в физике пылевой плазмы является исследование плазменно-пылевых структур в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Сильная неоднородность плазмы, наличие резких градиентов продольного поля приводят к появлению в плазменно-пылевых структурах тлеющего разряда некоторых характерных для них черт, таких как конвективные потоки пылевых частиц, так называемая пылеакустическая неустойчивость и др. Эти особенности будут рассмотрены в данной работе.

Установка для исследования пылевой плазмы в тлеющем разряде постоянного тока представлена на Рис. 1 [4, 5].

Она представляет собой вертикально ориентированную разрядную трубку, в которой создается тлеющий разряд с холодными электродами. Трубка заполняется неоном либо смесью неона с водородом до давления 0,1 – 2 торр. Рабочий диапазон разрядных токов 0,1 – 4 мА. В этих режимах в разряде наблюдаются стоячие страты. Предполагаемый диапазон электронной температуры в этих условиях 2 – 6 эВ, плотности плазмы  $10^7 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Пылевые частицы содержатся в контейнере с сетчатым дном над областью разряда. При встряхивании контейнера, частицы падают вниз и левитируют в стратах, образуя упорядоченные структуры. Визуализация пыли осуществляется при помощи подсветки плоским лазерным лучом. Рассеянный свет регистрируется видеокамерой. Наблюдения ведутся в первой от катода страте.

В стратах тлеющего разряда постоянного тока были получены различные структуры. В разряде в смеси неона с водородом, когда страты сильно уплотняются, уда

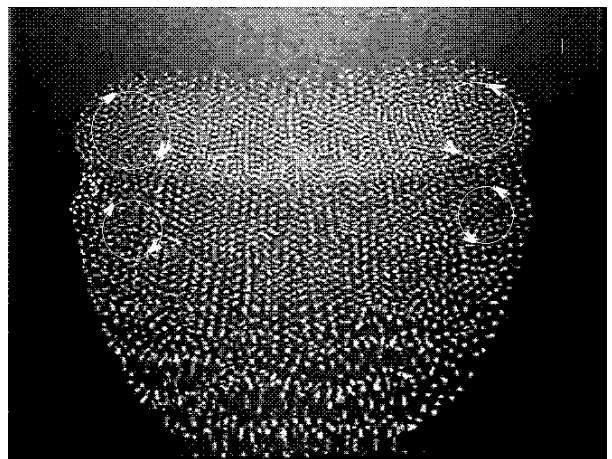




**Рис. 2.** Видеоизображение горизонтального сечения плазменного кристалла (а) и его функция распределения. Условия разряда: ток 1.1 мА, давление 0.8 торр, смесь неона с водородом (1:1). Частицы из меламинформальдегида диаметром 1.87 мкм.

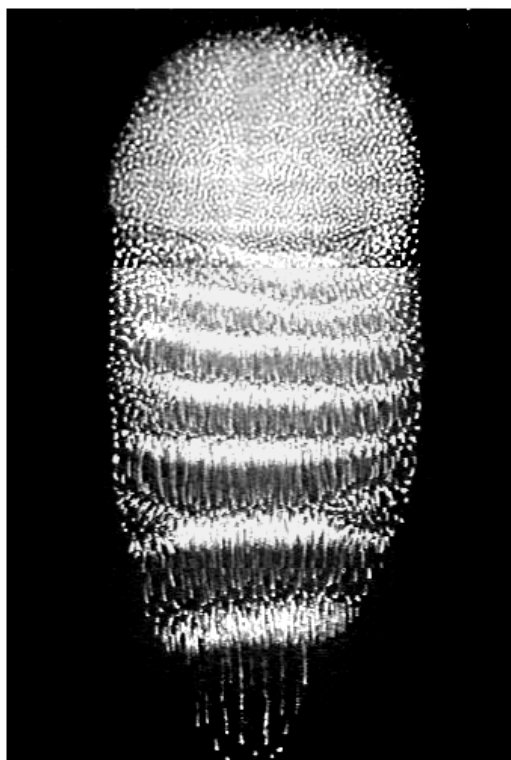
лось наблюдать кристаллизацию пылевых частиц (Рис. 2). Постоянная решетки этого кристалла порядка 700 мкм. При изменении параметров разряда система претерпевала фазовые переходы из кристаллического состояния в жидкостное.

В разряде в чистом неоне плазменно-пылевые структуры имеют существенно трехмерный характер. На рис. 3 представлена сложная плазменно-пылевая структура. В центральной части она хорошо упорядочена, и порядок близок к кристаллическому. По бокам имеются зоны конвективного движения. Ближе к центру структуры пылевые частицы движутся вниз, а на периферии идут вверх. Угловая скорость этого вращения порядка  $0.8 \text{ с}^{-1}$ . В нижней части структуры наблюдаются волны плотности пылевых частиц. Причиной их возбуждения является так называемая пылеакустическая неустойчивость [6, 7], вызываемая совместным действием направленного ионного потока и изменения заряда пылевой частицы при распространении волны.

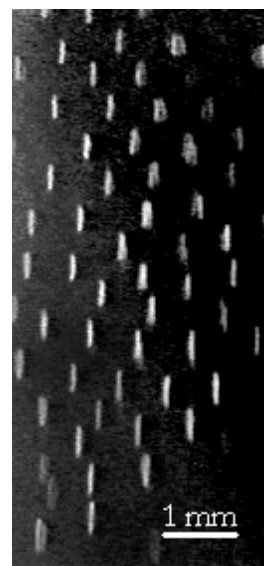


**Рис. 3.** Видеоизображение сложной плазменно-пылевой структуры (верти-кальное сечение). Стрелки показывают направления конвективных движений пылевых частиц. Условия разряда: давление неона 0.3 торр, ток 5 мА. Частицы из меламинформальдегида, диаметр 1.87 мкм. Размер кадра 14x10.6 мм.

Пылеакустическая неустойчивость – явление, характерное для плазменно-пылевых образований в тлеющем разряде постоянного тока. Они возникают при уменьшении давления нейтрального газа до величин порядка долей тора. Тогда снижается трение пылевых частиц о газ, которое является основной причиной затухания волн, и развивается неустойчивость. Инкремент неустойчивости прямо пропорционален величине продольного электрического поля в разряде [7]. Тем временем условие стабильной левитации пылевых частиц требует увеличения электрического поля в направлении катода. По этой причине пылеакустическая неустойчивость развивается прежде всего в нижних частях структур, как это показано на



**Рис. 4.** Развитые пыле-акустические волны (вертикальное сечение). Давление неона 0.3 торр, ток 0.6 мА. Частицы из меламинформальдегида диаметром 1.87 мкм. Длина волны 0.5 – 1.5 мм, частота 10 – 50 Гц.



**Рис. 5.** Фрагмент видеоизображения плазменного жидкого кристалла (горизонтальное сечение). Микроцилиндры из нейлона, длина 300 мкм, диаметр 15 мкм. Давление 0.9 торр, ток 3.8 мА, смесь неона с водородом (1:1).

рис. 3. Однако во многих случаях самовозбуждающиеся волны распространяются по всей структуре и имеют при этом сильно нелинейный характер (Рис. 4).

Большая часть исследований в области физики пылевой плазмы проводится с частицами сферической формы. Между тем, интерес представляет и исследование поведения сильно асимметричных макрочастиц в газоразрядной плазме. В работе [8] были использованы нейлоновые микроцилиндры длиной 300 и 600 мкм и с диаметрами 5, 7.5 и 15 мкм. Частицы диаметром 15 мкм левитировали только в стратах, полученных в смеси неона с водородом, образуя всего несколько слоев. Левитацию остальных типов частиц можно было наблюдать и в разряде в чистом неоне и аналогично сферическим частицам формировали трехмерные структуры.

Было обнаружено, что протяженные пылевые частицы левитируют горизонтально и выстраиваются параллельно некоторой общей оси. При определенных условиях в расположении их центров масс наблюдался ближний порядок. Такое состояние было названо плазменным жидким кристаллом по аналогии с молекулярными жидкими кристаллами (Рис. 5), где имеется выделенное направление в ориентации длинных молекул. Ориентацией частиц удавалось управлять внесением в разряд искажений симметрии. К примеру, чуть ниже первой страты вводилась поперечная диэлектрическая вставка с отверстием на краю. Таким образом, искажение разряда было визуально наблюдаемым. При повороте вставки наблюдался и поворот выделенного направления частиц. Подобно частицам в структуре ориентировались и одиночные частицы, левитировавшие в разряде.

Таким образом, пылевая плазма тлеющего разряда постоянного тока дает широкие возможности для исследования различных явлений:

- фазовые переходы в объемных и плоских плазменно-пылевых структурах из сферических частиц (кристаллизация и плавление);

- кристаллизация пылевой компоненты в случае сильно-асимметричных частиц (жидкий плазменный кристалл);
- формирование сложных плазменно-пылевых образований, в которых сосуществуют зоны с ближним и дальним порядком (плазменная жидкость);
- возникновение пылеакустической неустойчивости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. Ikezi // *Phys. Fluids* 1986, V. 29, p. 1764
2. H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel et. al// *Phys. Rev. Lett.* 1994, V. 73, P. 652
3. P.K. Shukla, A.A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics*, IoP Publishing, London, 2002
4. В. Е. Фортвов, А. П. Нефедов, В. М. Торчинский, В.И. Молотков, А.Г. Храпак, О.Ф. Петров, К.Ф. Вольхин // *Письма в ЖЭТФ* 1996, Т. 64, С. 86
5. А.М. Лунаев, В.И. Молотков, А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, В.М. Торчинский, В.Е. Фортвов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак // *ЖЭТФ* 1997, Т. 112, С. 2030
6. В.И. Молотков, А.П. Нефедов, В.М. Торчинский, В.Е. Фортвов, А.Г. Храпак // *ЖЭТФ* 1999, Т. 116, С. 902
7. V.E. Fortov, A.G. Khrapak, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, A.P. Nefedov, O.F. Petrov, V.M. Torchinsky // *Phys. Plasmas* 2000, V. 7, P. 1374
8. В. И. Молотков, А. П. Нефедов, М. Ю. Пустыльник, В. М. Торчинский, В. Е. Фортвов, А. Г. Храпак, К. Ёшино // *Письма в ЖЭТФ* 2000, Т. 71, С. 152