

## ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

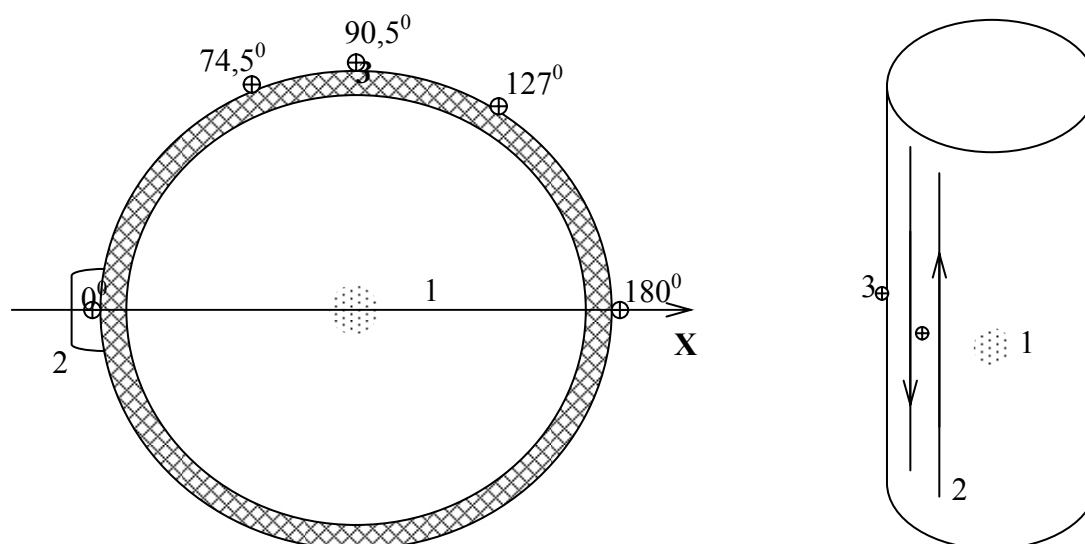
В.И. Молотков, М.Ю. Пустыльник, В.М. Торчинский, В.Е. Фортов

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

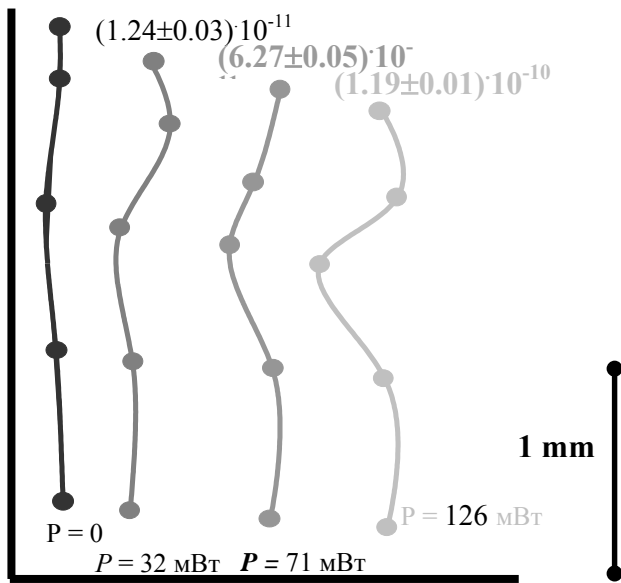
Исследование различных внешних воздействий на плазменно-пылевые структуры представляет большой интерес по нескольким причинам. Во-первых, воздействия, вносящие незначительные искажения в фоновую плазму, могут быть использованы в качестве диагностических средств. Внешние воздействия могут так же использоваться для управления пространственным положением и упорядоченностью плазменно-пылевых структур. Кроме того, внешние воздействия могут быть использованы для введения в плазменно-пылевые структуры энергии с целью изучения их поведения при экстремальных условиях.

В данной работе будут представлены результаты исследований четырех различных видов воздействий: воздействие сфокусированного лазерного излучения, градиента температуры, газодинамического воздействия и воздействия магнитного поля на левитирующие в разряде ферромагнитные пылевые частицы.

Экспериментальная установка представляет собой вертикально ориентированную [1, 2] 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. 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 частиц осуществляется при помощи подсветки плоским лазерным лучом. Рассеянный свет регистрируется видеокамерой с частотой кадров от 25 до 300 кадров в секунду. Наблюдения ведутся в первой от катода страте.



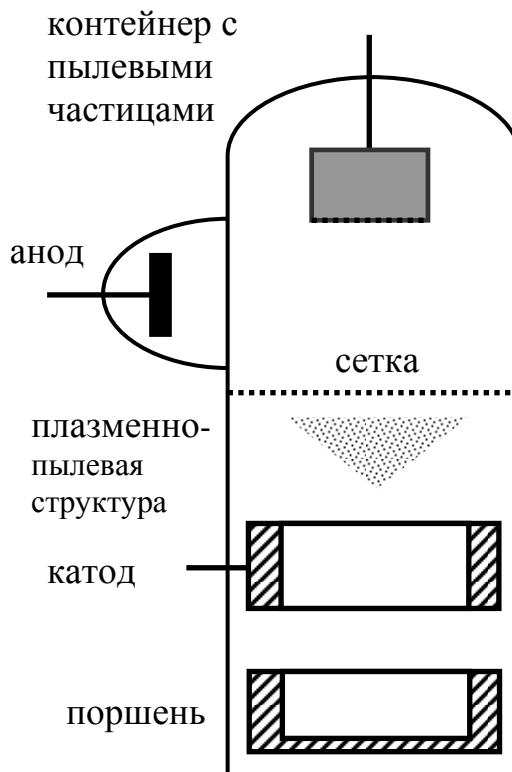
**Рис. 1.** Схема установки для исследования теплового воздействия на плазменно-пылевые структуры. 1 – пылевые частицы, 2 – нагреватель, 3 – термопары



**Рис. 2.** Пример распределения радиальной силы в разряде. Частицы из меламинформальдегида диаметром 4.82 мкм. Давление неона 0.8 торр, разрядный ток 1.66 мА.

Воздействие градиента температуры (или термофоретической силы) так же использовалось в диагностических целях. С его помощью можно измерить распределение сил, действующих на пылевые частицы в ловушке. Экспериментальная установка показана на Рис. 1. Для создания градиента температуры использовался проволочный нагреватель. Поскольку длина нагревателя была много больше длины вертикальной цепочки пылевых частиц, формируемой в разряде, поле температуры можно было считать для нее двумерным. Поэтому температура измерялась в одной плоскости в пяти точках окружности трубки (Рис. 1) хромель-алюмелевыми термопарами с ЭДС ~65 мкВ/град. Затем, решая стационарное уравнение теплопроводности, можно было восстановить распределение температуры в разряде. При включении нагрева цепочка из пылевых частиц отклонялись от равновесного положения. Причем, разные частицы отклонялись на разное расстояние, т.е. цепочка искривлялась. Поскольку термофоретическая сила, действующая на каждую из частиц с хорошей точностью одинакова, изгиб цепочки можно объяснить лишь наличием осевого распределения радиальных сил в разряде. Это распределение, в свою очередь, может быть связано с

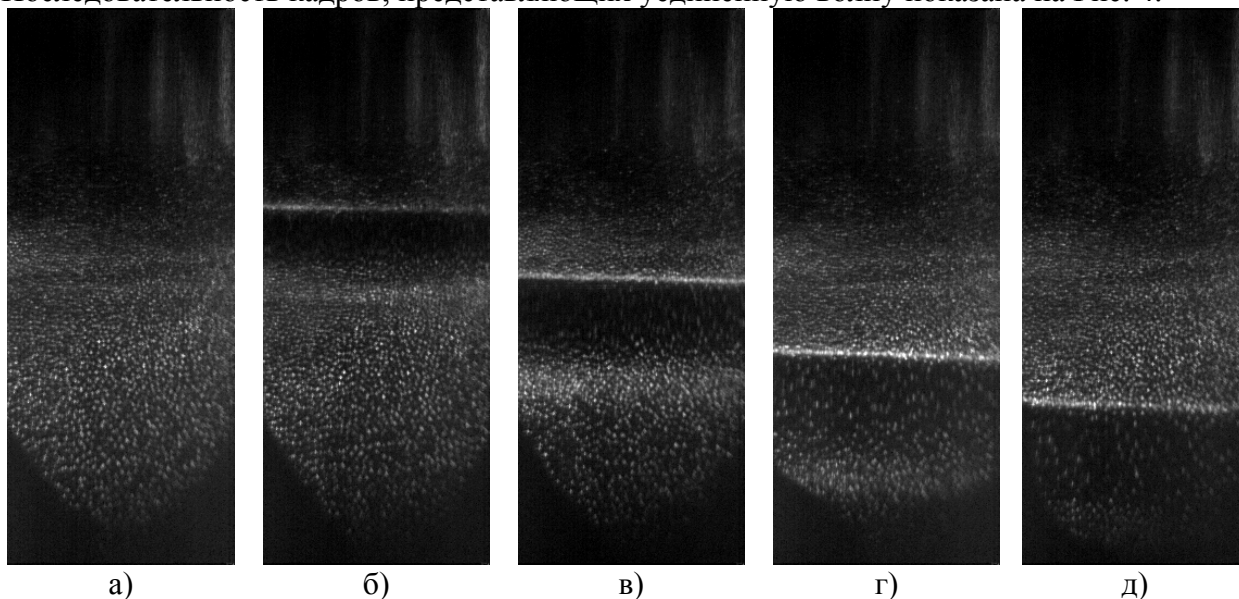
Воздействие сфокусированного лазерного излучения использовалось для определения заряда пылевых частиц, левитировавших в стратах [3]. Под воздействием света пылевая частица выдвигается из структуры затем выходит из лазерного луча и возвращается в структуру. Поскольку давление нейтрального газа в данных экспериментах сравнительно высокое, возвратное движение частицы было аperiодическим. Начиная движение с нулевой радиальной скоростью, она сначала ускорялась электрическими силами, а затем по мере увеличения скорости и уменьшения радиального электрического поля начинала превалировать сила трения, и частица замедлялась. Таким образом, скорость частицы имела максимум. В точке максимума сила трения равна электрической силе. Из этого условия определялся заряд.



**Рис. 3.** Схема эксперимента по газодинамическому воздействию.

распределением параметров фоновой плазмы по длине страты. Таким образом, изогнутая цепочка пылевых фактически отражает изолинию радиальной силы, действующей на пылевую частицу данного размера при данных условиях разряда. Пример таких изолиний показан на Рис. 2.

При помощи газодинамического воздействия удавалось возбуждать в стабильной структуре пылевых частиц пылеакустическую неустойчивость [4, 5]. Катод был выполнен в виде полого цилиндра (Рис. 3). Под катодом располагался поршень, который приводился в движение магнитом. Скорость движения поршня была 30 – 40 см/с, ход 4-5 см. Над катодом была поставлена сетка, находившаяся под плавающим потенциалом. При движении поршня вниз пылевые частицы увлекались вниз, в область более сильного электрического поля, и в структуре возникала неустойчивость. Удавалось получить как уединенные волны, так и появляющуюся сразу во всем объеме неустойчивость. Последовательность кадров, представляющих уединенную волну показана на Рис. 4.



**Рис. 4.** Последовательность видеозображений распространяющейся уединенной нелинейной пылеакустической волны. Высота каждого кадра 14 мм. Разрядный ток 0.1 мА, давление 0.3 торр. Итервал между кадрами б, в, г и д 83 мс.

По воздействию на ферромагнитные частицы имеются пока лишь предварительные результаты. Основная проблема здесь – обеспечить воздействие именно на ферромагнетики, минимизировав при этом возмущение фоновой плазмы. Эксперименты показали, что это возможно. Использовались частицы железа размером 2 – 6 мкм и частицы никеля диаметром меньше 5 мкм. Было показано, что в достаточно слабом неоднородном магнитном поле ( $\sim 50$  Гс), создаваемом на срезе небольшой катушки, частицы втягиваются в область сильного магнитного поля, в то время как страта, в которой левитируют ферромагнитные частицы, напротив выталкивается в область слабого поля. Более того, эксперименты в тех же конфигурациях магнитного поля, но с левитирующими в страте неферромагнитными частицами показали, что они выталкиваются из области сильного магнитного поля, следуя за движением страты.

Таким образом, внешние воздействия дают широкие возможности как для диагностики, так и для управления плазменно-пылевыми структурами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Фортон, 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

2. *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*
3. *V.E. Fortov, A.P. Nefedov, V.I. Molotkov, M.Y. Poustylnik, V.M. Torchinsky //Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 205002*
4. *В.И. Молотков, А.П. Нефедов, В.М. Торчинский, В.Е. Фортвов, А.Г. Храпак //ЖЭТФ 1999, Т. 116, С. 902*
5. *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*