

На правах рукописи

Рыковатко

Сыроватка Роман Александрович

**КУЛОНОВСКИЕ СТРУКТУРЫ МИКРОЧАСТИЦ
В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЛОВУШКАХ
ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Филинов Владимир Сергеевич

Официальные оппоненты: Филиппов Анатолий Васильевич, д.ф.-м.н.,
первый заместитель директора отделения –
начальник отдела АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г.
Троицк

Карасев Виктор Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования Санкт-Петербургского
государственного университета, г Санкт-
Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Ордена Трудового Красного
Знамени Институт нефтехимического синтеза
им. А.В. Топчиева Российской академии наук,
г. Москва

Защита состоится «17» октября 2018 г. в 11 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 002.110.02 Учреждения Российской академии
наук Объединенный институт высоких температур РАН по адресу 125412, г.
Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте
https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н., проф.

 Л.М. Василяк

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Заряженные пылевые частицы широко распространены в окружающем нас мире (мезосфера Земли, поверхность Луны и Марса, кольца планет) и в разных технологических процессах, таких как плазменное осаждение и травление в микроэлектронике, в плазмохимических реакторах, в мукомольной промышленности, в установках термоядерного синтеза «Токамак», при термоядерном преобразовании энергии и в др. Чрезвычайно интересными объектами являются кулоновские системы заряженных пылевых частиц, в которых потенциальная энергия взаимодействия может существенно превосходить кинетическую энергию частиц, что приводит к возникновению пространственно-упорядоченных жидкостных или кристаллических пылевых структур, фазовым переходам, волновым процессам. Упорядоченные кулоновские пылевые структуры были получены и исследованы при пониженном давлении в высокочастотном и тлеющем газовом разряде в лабораторных условиях и в условиях микрогравитации на МКС, в ядерно-возбуждаемой плазме, а также при создании заряда на пылевых частицах УФ излучением. Попытки удержания частиц в газовых разрядах при атмосферном давлении, например, в коронном разряде, не увенчались успехом.

Известно, что заряженные частицы можно удерживать в определенной области пространства с помощью переменных электрических полей, например, в ловушках Пауля. Ранее в работах в ОИВТ РАН [11, 12] экспериментально и путем математического моделирования была показана возможность удержания стабильных структур из небольшого количества заряженных частиц микронных размеров в линейной квадрупольной ловушке, однако не были получены структуры с большим количеством частиц, не были исследованы их свойства и влияние на эти структуры газовых потоков, плазмы и электрических полей.

Левитирующие пылевые кулоновские структуры из заряженных частиц радиоактивного материала могут использоваться для создания батарей, преобразующих ядерную энергию радиоактивного распада в электрическую, или лазеров с ядерной накачкой.

Актуальной проблемой в условиях ухудшения экологической обстановки является возрастающие требования к фильтрации воздуха от пылевых частиц в устройствах ядерной энергетики, машиностроении, химической промышленности и других производствах. Одним из возможных способов очистки воздуха от пылевых частиц является захват пылевых частиц с помощью электродинамических ловушек. Преимуществом электродинамических методов очистки воздуха, по сравнению с

используемыми сейчас электростатическими методами, является возможность селективного захвата частиц и увеличение степени фильтрации в «окне прозрачности» существующих электростатических фильтров с коронным разрядом.

Целью диссертационной работы является исследование свойств кулоновских систем заряженных частиц в воздухе при атмосферном давлении в электродинамических ловушках разных типов и исследование воздействия на них газовых потоков, электрических полей и плазмы.

Для достижения цели работы необходимо проведение экспериментальных исследований и численного моделирования условий удержания кулоновских структур, содержащих большое количество заряженных пылевых частиц в воздухе при атмосферном давлении с помощью электродинамических ловушек с различной конфигурацией электродов в неподвижной среде и газовом потоке. Также необходима разработка способов определения параметров пылевых частиц, находящихся в электродинамических ловушках.

Научная новизна работы

- Впервые были экспериментально получены устойчивые кулоновские структуры из большого количества (несколько тысяч) заряженных пылевых частиц при атмосферном давлении в линейных электродинамических ловушках с различными конфигурациями электродов.
- Впервые экспериментально продемонстрирована возможность удержания пылевых частиц электродинамическими ловушками в воздушных потоках.
- Обнаружен эффект возбуждения уединенных волн плотности в кулоновских однокомпонентных структурах в электродинамической ловушке.
- Впервые получены устойчивые структуры заряженных частиц в линейной электродинамической ловушке в плазме коронного разряда при атмосферном давлении.
- Предложен метод измерения заряда и массы пылевой частицы в линейной электродинамической ловушке.

Научная и практическая ценность

В настоящее время структуры заряженных частиц, в которых взаимодействие осуществляется посредством незранированного кулоновского потенциала, а также в плазме при атмосферном давлении мало изучены. Полученные в работе результаты по созданию и свойствам устойчивых структур из большого количества частиц (несколько тысяч) с

помощью электродинамических ловушек могут быть использованы для построения моделей однокомпонентных кулоновских структур. без экранированного потенциала. Результаты по получению стабильных структур могут быть использованы в ядерно-оптических преобразователях энергии (лазеры с ядерной накачкой), а также при создании источников электрической энергии, основанных на прямом преобразовании энергии ядерного распада в электричество (фотовольтаическая батарея). Результаты по удержанию частиц в потоке воздуха могут быть использованы для создания новых устройств фильтрации газов от пылевых частиц, получен патент. Предложен способ измерения зарядов частиц и получен патент.

Научные положения, выносимые на защиту

- Удержание стабильных кулоновских структур из большого количества пылевых частиц в неподвижной воздушной среде при атмосферном давлении с помощью электродинамических ловушек с различной конфигурацией электродов.
- Захват и удержания заряженных пылевых частиц в воздушном потоке при атмосферном давлении линейной квадрупольной электродинамической ловушкой.
- Создание стабильных структур заряженных частиц в плазме коронного разряда при атмосферном давлении в линейной электродинамической ловушке.
- Возбуждение уединенных волн плотности в кулоновских однокомпонентных структурах в линейной электродинамической ловушке.
- Метод измерения заряда пылевых частиц в электродинамической ловушке.
- Результаты измерений заряда пылевых частиц, заряженных предварительно в коронном разряде.

Достоверность полученных результатов определяется проведением измерений на современном поверенном оборудовании с использованием апробированных методик, тщательной калибровкой аппаратуры, хорошей воспроизводимостью результатов измерений и их разумным согласием с данными моделирования, а также совпадением результатов данной работы с полученными ранее в случаях, когда такое сравнение было возможно.

Апробация результатов работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», НИЯУ МИФИ 2012; XXVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter,

Elbrus 2013; XLI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород 2014; Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014, Казань 2014; XXIX International Conference on Equations of state for Matter, Elbrus 2014; Non-Ideal Plasma Physics Annual Moscow Workshop NPP-2015, Moscow 2015; VIII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk 2015; XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus 2015; 15th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas, Almaty 2015; XXXI International Conference on Equations of state for Matter, Elbrus 2016; Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus 2017.

Публикации

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 8 статей в рецензируемых журналах [1-8], входящих в список ВАК, 2 авторских свидетельства [9, 10].

Личный вклад автора.

Диссертация написана автором лично, положения, выносимые на защиту, сформулированы автором самостоятельно. Экспериментальные результаты получены и проанализированы автором также самостоятельно. Написание статей и тезисов докладов на конференциях осуществлялось совместно с соавторами при определяющем вкладе автора диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 109 страницах текста, содержит 81 рисунок, список литературы включает 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, поставлена цель диссертационной работы, кратко изложены результаты, характеризующие новизну работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит литературный обзор. Анализируются способы удержания заряженных пылевых частиц. Такие частицы можно удерживать в определенной области пространства в электродинамических ловушках или разрядах низкого давления. При низком давлении были получены структуры, содержащие тысячи частиц, и исследованы их свойства. В плазменной среде при высоком давлении структуры заряженных частиц не были получены. Для удержания заряженных частиц при высоком давлении используются электродинамические ловушки. В работах [11, 12] была разработана

математическая модель и проведены эксперименты по удержанию заряженных частиц в воздухе при атмосферном давлении. Удалось удержать порядка ста частиц.

В литературе рассматривается применение структур заряженных пылевых частиц, в фотовольтаических преобразователях энергии и лазерах с ядерной накачкой. Для этого необходимо существенно увеличить количество частиц, удерживаемых в электродинамической ловушке. Еще одним возможным применением электродинамических ловушек является фильтрация воздуха от пыли в промышленности и на предприятиях ядерной энергетики. В работе [12] методами математического моделирования показано, что при определенных параметрах электродинамической ловушки можно добиться захвата и удержания частиц размером 0,3-0,5 мкм, которые относительно плохо удаляются электростатическими фильтрами.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки для исследования динамики заряженных пылевых частиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении и описанию методики численного эксперимента. Экспериментальная установка состоит из устройства зарядки частиц в коронном разряде, электродинамических ловушек с различной конфигурацией электродов, системы визуализации и регистрации пылевых частиц и систем измерения заряда на частицах.

Устройство для зарядки частиц в коронном разряде (рис. 1) представляет собой три решетки электродов, расположенные в воздушном тракте с поперечным сечением 6х6 см. Заземленные электроды из стальных стержней диаметром 3 мм расположены по обеим сторонам от коронирующих электродов из вольфрамовой проволоки диаметром 70 мкм. Одна из решеток заземленных электродов могла находиться под плавающим потенциалом. В этом случае система коронирующих электродов формировала электрический ветер.

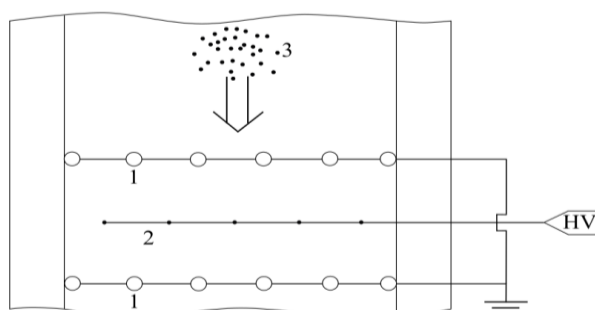


Рис. 1. Схема устройства для зарядки частиц в коронном разряде (вид сверху):
1 – заземленные электроды, 2 – коронирующие электроды, 3 – пылевые частицы.
Стрелкой показано направление движения воздуха.

В работе использовались квадрупольные и октупольные линейные электродинамические ловушки с электродами из стержней круглого сечения диаметром 4 мм и длиной 30 см. Расстояние между электродами составляло от 1 до 4 см. Ловушки располагались горизонтально или вертикально. Была также создана квадрупольная ловушка нового типа в виде кольца с диаметром электродов 8 мм. Использовались различные пылевые частицы: полидисперсный порошок Al_2O_3 с размерами частиц от 1 до 50 мкм, калиброванные сферические частицы из меламин-формальдегида диаметром 10 мкм и сферические частицы из стеклоуглерода диаметром от 10 до 20 мкм, полые стеклянные сферы диаметром 60-200 мкм. Регистрация частиц осуществлялась CCD камерой HiSpec 1 с разрешением 1280x1024 пикселей и скоростью съемки до 504 кадров/с. Подсветка частиц обеспечивалась лазером с длиной волны 532 нм и мощностью до 150 мВт и системой цилиндрических линз, которая формировала плоский лазерный луч с толщиной в перетяжке 0,25 мм.

Для моделирования движения частиц в электродинамической ловушке использовался метод броуновской динамики; для каждой частицы численно решалось уравнение Ланжевена:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i, t) - 6\pi\eta \frac{d_i}{2} \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + \sum_{j \neq i} k \frac{q_j q_i \mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}^2 r_{ji}} + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{b_i}(t) \quad (1)$$

где m_i – масса i -той частицы, \mathbf{r}_i – радиус вектор i -той частицы, $\mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i)$ – сила, действующая на частицу со стороны электродинамической ловушки, η – динамическая вязкость воздуха, d_i – диаметр i -той частицы, q_j и q_i – заряды j -той и i -той частицы, \mathbf{r}_{ij} – вектор, направленный от j -той частицы к i -той частице, модуль которого равен расстоянию между этими частицами, \mathbf{g} – ускорение свободного падения, $\mathbf{F}_{b_i}(t)$ – дельта-коррелированная случайная сила, возникающая за счет соударений частицы с молекулами газа. Сила, действующая на пылевую частицу со стороны электродинамической ловушки, вычислялась как сумма сил от электрических зарядов, которые равномерно распределены на цилиндрических электродах при заданном потенциале на электродах.

В **третьей главе** представлены методика и результаты измерений заряда и размера пылевых частиц, захваченных электродинамической ловушкой. В частности, заряд частиц измерялся с помощью предложенного метода, основанного на уравнивании частицы в неравномерном электрическом поле и гравитационном поле. Этот метод позволяет определять заряд частиц, находящихся непосредственно в электродинамической ловушке. Экспериментально была определена область удержания частиц в линейной электродинамической ловушке. Масса частицы определялась следующим образом. Одиночная частица

левитировала в вертикально ориентированной ловушке над дополнительным сферическим электродом, на который подавался постоянный электрический потенциал. Когда электрод заземлялся, частица падала вниз под действием собственного веса. Размер (масса) частицы определялся по установившейся скорости свободного падения. Для верификации метода использовались моодисперсные частицы меламин формальдегида диаметром 10 мкм. Относительная погрешность измерения составила 2 %. Определение заряда частицы производилось по положению равновесия в электрическом поле, создаваемом дополнительным электродом.

На рис. 2 представлены измеренные значения заряда и размера частиц с помощью электродинамической ловушки. Напряжение на коронирующих электродах составляло 18 кВ. Напряженность электрического поля в коронном разряде существенно неоднородна, поэтому можно предположить, что заряд частицы помимо прочего будет зависеть от ее траектории в устройстве зарядки частиц. На рис. 2 сплошными линиями обозначен максимальный заряд, который частица может получить в электрическом поле напряженностью от 10 до 20 кВ/см. Поскольку значения измеренных зарядов на частицах находятся между этими линиями, то можно заключить, что частицы заряжались в областях коронного разряда с напряженностью электрического поля от 10 до 20 кВ/см.

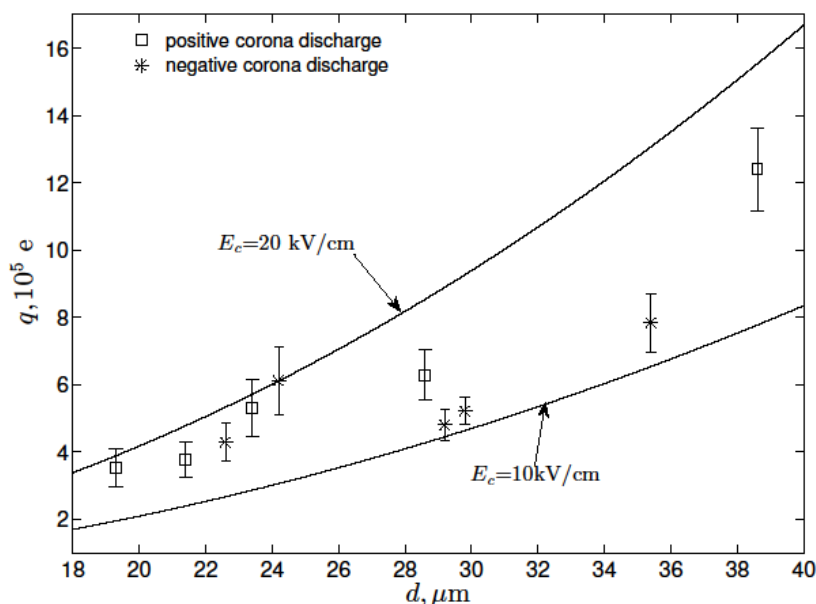


Рис. 2. Результаты измерений заряда и массы частиц.

Линии обозначают максимальный заряд, который частица может получить в поле напряженностью 10 и 20 кВ/см.

Для измерения зарядов большого количества частиц одновременно применялся плоский конденсатор. Обкладки конденсатора были расположены с верхней и нижней стороны воздушного тракта. Заряд частиц

определялся с помощью анализа траекторий движения частиц в равномерном электрическом поле. Были проведены измерения заряда большого количества частиц с помощью плоского конденсатора при напряжении на коронирующих электродах равном 18 кВ. Средний заряд частиц составил $5,84 \times 10^5 e$, что показывает хорошее совпадение с результатами измерений с помощью электродинамической ловушки.

Определение области удержания частиц в вертикальной линейной электродинамической ловушке проводилось следующим образом. У одиночной частицы, измерялись заряд и масса. После этого частота напряжения ловушки уменьшалась (для определения нижней границы) или увеличивалась (для определения верхней границы), пока частица не улетала из ловушки. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

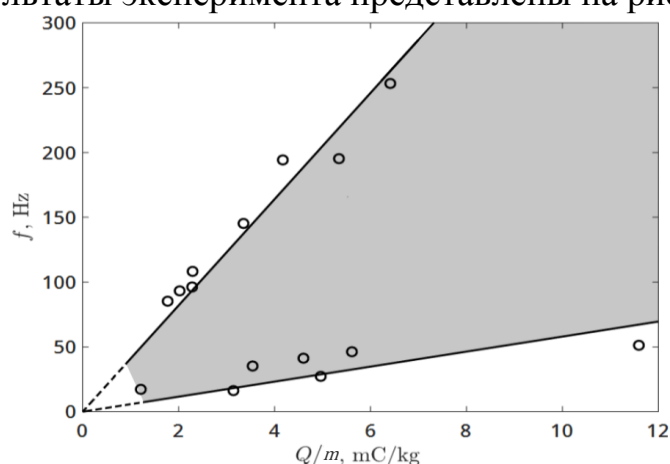


Рис. 3. Область удержания частиц в линейной квадрупольной ловушке

На частицу, движущуюся в переменном электрическом поле $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \sin(\omega t)$ действует сила Гапонова-Миллера \mathbf{F}_{gm} [13]:

$$\mathbf{F}_{gm} = -\frac{q^2}{2m(\omega^2 + \nu^2)} \nabla E^2(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Следует заметить, что выражение для силы Гапонова-Миллера верно, если сила вязкого трения, действующая на частицу, линейно зависит от скорости частицы ($\mathbf{F}_{fr} = -m\nu\mathbf{v}$). В нашем случае для частицы выполняется закон Стокса ($\mathbf{F}_{fr} = 6\pi\mu r\mathbf{v}$), где μ – динамическая вязкость, r – радиус частицы. Из выражения (2) можно видеть, что сила, удерживающая частицу внутри ловушки, убывает с увеличением частоты напряжения. С другой стороны, при уменьшении частоты в какой-то момент частица успевает покинуть ловушку за время, соответствующее половине периода напряжения. Результаты экспериментального исследования согласуются с качественной оценкой динамики частицы в электродинамической ловушке.

Четвертая глава посвящена изучению кулоновских структур из большого количества частиц в электродинамических ловушках с различной конфигурацией электродов, которые были ориентированы как горизонтально, так и вертикально. Впервые в линейных ловушках получены кулоновские структуры с числом частиц порядка нескольких тысяч. Рассмотрено влияние на кулоновскую структуру внешних воздействий таких, как воздушный поток и импульсное электрическое поле. Обнаружен эффект самовозбуждения уединенной волны в кулоновской структуре. Впервые были получены устойчивые структуры заряженных частиц в плазменной среде при атмосферном давлении. Для этого использовалась линейная квадрупольная электродинамическая ловушка, электроды которой использовались и для создания коронного разряда. Были получены кулоновские структуры в квадрупольной ловушке нового типа в виде кольца диаметром 14 см. Пылевые частицы в такой ловушке формируют торообразную структуру вдоль оси симметрии ловушки. Так как в кольцевых ловушках отсутствуют краевые эффекты, то кольцевые ловушки перспективны для исследования волновых процессов и других коллективных явлений в кулоновских структурах.

Кулоновские структуры в вертикально ориентированных электродинамических ловушках

В случае вертикально ориентированной квадрупольной ловушки пылевые частицы сконцентрированы в центральной области (рис. 4а, 4б, 4в). При увеличении частоты напряжения ловушки с 50 до 130 Гц при фиксированном значении амплитуды переменного напряжения U_A средняя амплитуда колебаний частиц уменьшается с 0,65 мм до 0,23 мм. При амплитуде напряжения ловушки меньше 5 кВ частицы образуют устойчивую структуру (рис. 4а), при этом частицы колеблются около положения равновесия. При увеличении напряжения верхняя часть структуры начинает вращаться против часовой стрелки (рис. 4б) и становится неустойчивой.

В восьмиэлектродной ловушке частицы не занимают центральную область, формируя кольцо (рис 4г). Диаметр этого кольца увеличивается при увеличении частоты от 50 до 130 Гц с 16,2 мм до 27,2 мм. Средняя амплитуда колебаний частиц уменьшается с 0,62 до 0,37 мм. Уменьшение амплитуды колебаний при увеличении частоты напряжения связано с тем, что в каждую сторону частица движется меньшее количество времени. Образование кольца в восьмиэлектродной ловушке можно объяснить тем, что в центре ловушки напряженность электрического поля недостаточно сильна для удержания частиц.

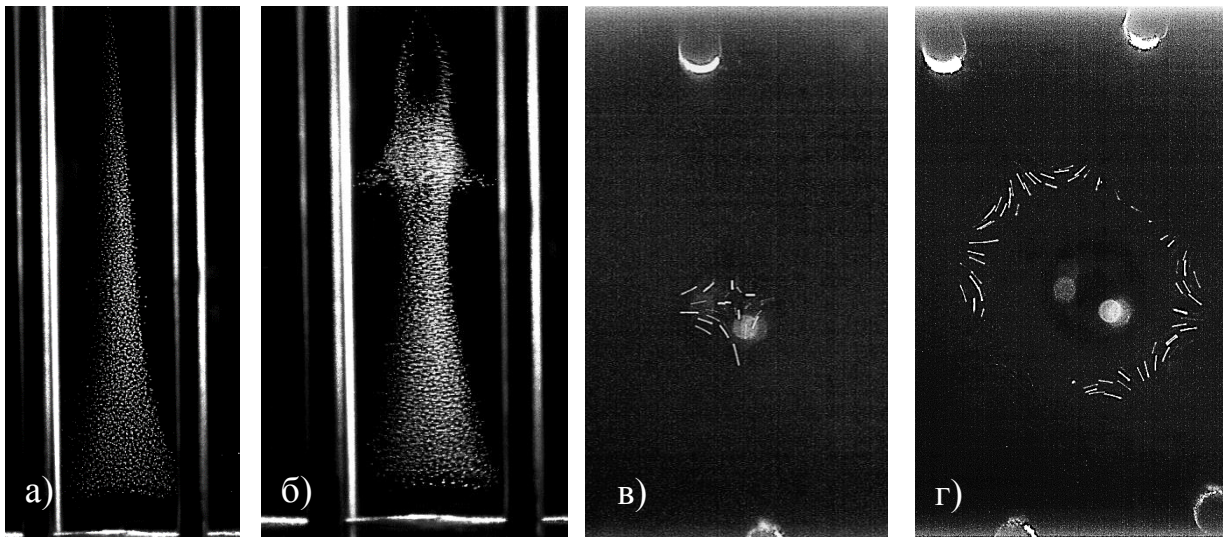


Рис. 4. Кулоновские структуры в вертикально ориентированных ловушках.

Квадрупольная ловушка: а) $U_A = 4,5$ кВ, $f=50$ Гц, вид сбоку; б) $U_A = 5,1$ кВ, $f=50$ Гц, вид сбоку; в) $U_A = 4,5$ кВ, $f=50$ Гц, вид сверху. Восьмиэлектродная ловушка: г) $U_A = 4,25$ кВ, $f=50$ Гц, вид сверху. Круглые пятна на виде сверху – электроды ловушки.

Кулоновские структуры в горизонтально ориентированных электродинамических ловушках

В горизонтально ориентированной квадрупольной ловушке при увеличении амплитуды переменного напряжения увеличивается количество удерживаемых частиц. При достаточно низких значениях напряжения (2,8 кВ) упорядоченной структуры не наблюдается (рис. 5а). При увеличении U_A до 4,2 кВ пылевая структура приобретает упорядоченность, частицы колеблются около положений равновесия с частотой f ; количество частиц увеличивается, межчастичные расстояния уменьшаются (рис. 5б). При дальнейшем увеличении напряжения до 5,6 кВ частицы в верхней части структуры начинают перескакивать с места на место, упорядоченность сохраняется в нижней части структуры (рис. 5в). В ловушке, представленной на рис. 5 впервые при атмосферном давлении были получены кулоновские структуры, содержащие более 2000 частиц.

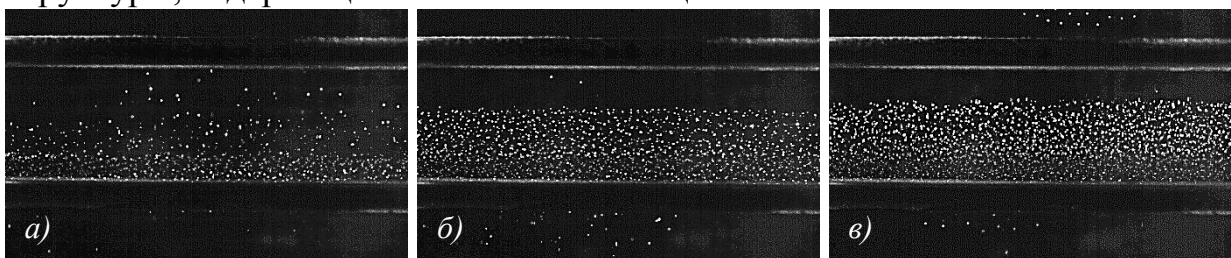


Рис. 5. Большие структуры из частиц Al_2O_3 в горизонтальной ловушке при различных значениях напряжения: а) $U_a = 2,8$ кВ, б) $U_a = 4,2$ кВ, в) $U_a = 5,6$ кВ; расстояние между электродами 3 см, $f = 50$ Гц.

При некоторых условиях в кулоновской структуре в горизонтальной ловушке возможно одновременное существование упорядоченных и неупорядоченных областей. На рис. 6 представлена фотография структуры из частиц стеклоглерида размером от 10 до 20 мкм. В центральной области структуры частицы совершают малые колебания около положения равновесия. В верхней и нижней областях частицы помимо малых колебаний совершают дрейфовое движение. Для частиц в этих областях была построена парная корреляционная функция $g(r)$, определяющая вероятность двух частиц находиться на расстоянии r друг от друга (рис. 7).

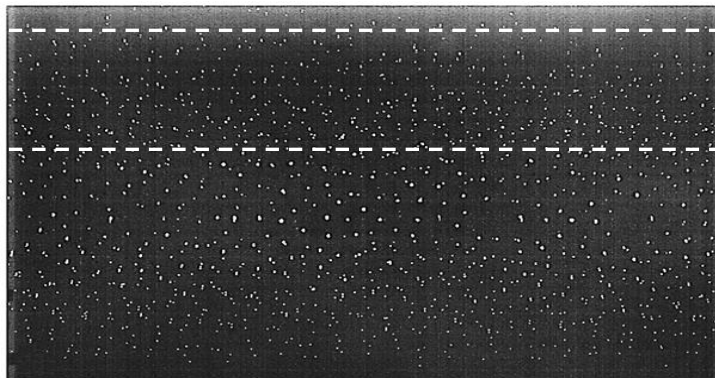


Рис. 6. Кулоновская структура из частиц стеклоглерида размером от 10 до 20 мкм. $U_A = 2,6$ кВ, $f = 50$ Гц, расстояние между электродами 2 см. Штриховыми линиями ограничена часть структуры, используемая для построения парной корреляционной функции.

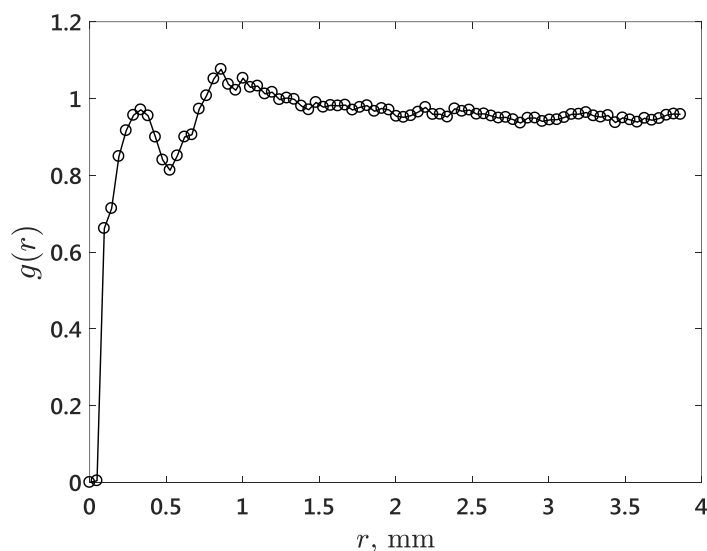


Рис. 7. Парная корреляционная функция

Парная корреляционная функция имеет первый пик небольшой высоты, что является нетипичным. Это может быть связано с различной концентрацией частиц в верхней и нижней областях исследуемого участка кулоновской структуры. Тем не менее, представленная парная

корреляционная функция позволяет судить о слабом взаимодействии между частицами и отсутствии упорядоченности.

Расчет термодинамических величин системы пылевых частиц

Как известно из статистической теории жидкого состояния вещества, парная корреляционная функция позволяет получить информацию о термодинамических величинах подсистемы пылевых частиц, таких как энергия и давление, которые можно рассчитать по следующим формулам:

$$U = N \left(\frac{m\bar{v}^2}{2} + \frac{2\pi}{\gamma} \int_0^\infty \Phi(r)g(r)r^2 dr \right),$$

$$P = \frac{m\bar{v}^2}{2\gamma} \left(1 - \frac{4\pi}{3\gamma m\bar{v}^2} \int_0^\infty \frac{d\Phi(r)}{dr} g(r)r^3 dr \right),$$

где N – количество частиц в кулоновской системе, γ – объем, приходящийся на одну частицу, $\Phi(r)$ – энергия парного взаимодействия частиц.

Для описанных выше экспериментальных условий получим энергию, приходящуюся на одну частиц $U/N = 3 \cdot 10^{-15}$ Дж.

Методами математического моделирования исследовались кулоновские структуры в линейной квадрупольной электродинамической ловушке, состоящей из четырех электродов радиусом 1,5 мм, и длиной 10 см, расположенных на расстоянии 2 см друг от друга, на которую подавалось переменное напряжение $U_{\text{trap}} = U_A \sin(\omega t)$ со сдвигом, равным π между соседними электродами с амплитудой $U_A = 5$ кВ, и частотой $\omega = 2\pi \cdot 50$ рад/с. При проведении численного эксперимента моделировалось движение 10 000 частиц диаметром 2 мкм с зарядом $q = 2500$ единиц элементарного заряда и плотностью материала частиц принималась 4 г/см³. На рис. 8 представлена кулоновская структура, удерживаемая в ловушке. На рис. 9 представлена парная корреляционная функция спустя десять секунд после инъекции. Для указанных параметров численного эксперимента энергия, приходящаяся на одну частицу U/N , составила $4 \cdot 10^{-13}$ Дж.

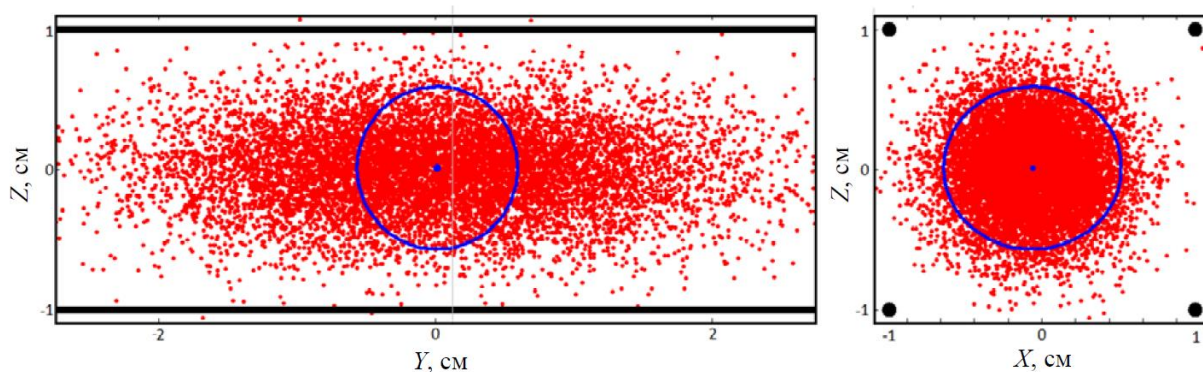


Рис. 8. Кулоновская структура из 10 000 частиц, удерживаемая в ловушке.

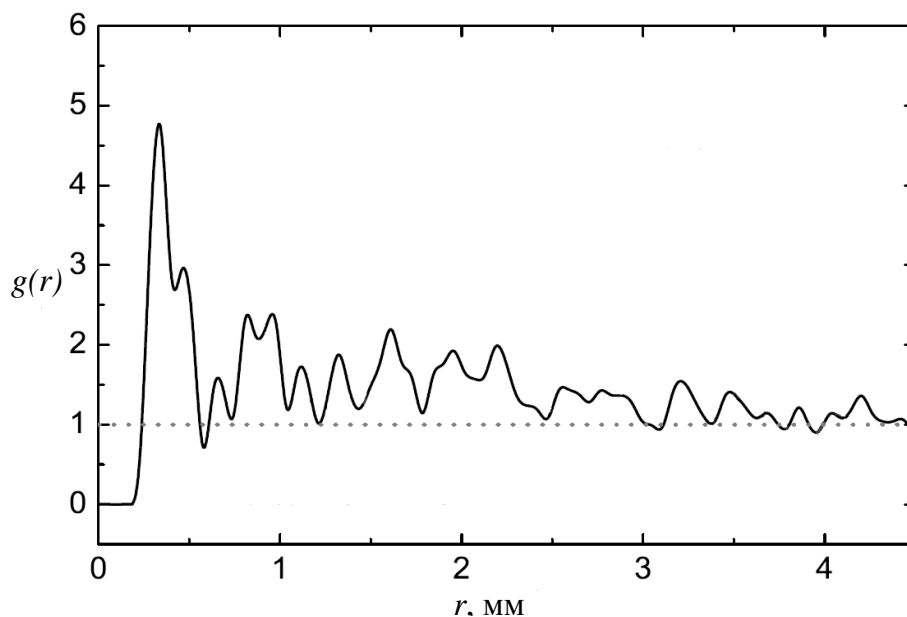


Рис. 9. Парная корреляционная функция через десять секунд после инъекции частиц; $d = 1$ мкм, $q = 2\,500$ е.

В случае математического моделирования удельная энергия частиц превышает таковую для экспериментальных условий, описанных в разделе 4.1.1 на два порядка, что согласуется с видом парной корреляционной функции, указывающей на наличие ближнего порядка.

В работе изучалась устойчивость структур частиц в зависимости от рабочих параметров электродинамической ловушки. На рис. 10 представлена смесь частиц Al_2O_3 и стеклянных микросфер диаметром $60\div 200$ мкм в линейной квадрупольной ловушке при следующих параметрах: $U_A = 2,4$ кВ, $f = 50$ Гц. При $U_A = 2,8$ кВ структура была стабильна, однако при уменьшении напряжения до 2,4 кВ, правая часть структуры становится неустойчивой, частицы двигаются хаотично, однако остаются в ловушке. Левая часть структуры остается стабильной и упорядоченной. При изменении амплитуды напряжения длина неустойчивой части изменяется и таким способом можно получать в ловушке полностью устойчивые, полностью неустойчивые и частично неустойчивые структуры.

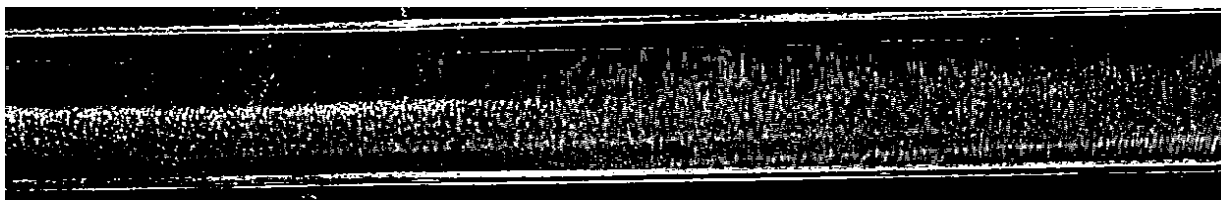


Рис. 10. Смесь частиц Al_2O_3 и стеклянных микросфер диаметром $60\div 200$ мкм в линейной квадрупольной ловушке; $U_A = 2,4$ кВ, $f = 50$ Гц.

Захват и удержание пылевых частиц в воздушном потоке

Экспериментально было установлено, что электродинамические ловушки могут удерживать пылевые частицы в воздушных потоках со скоростями до 50 см/с. С целью изучения возможности селективного захвата частиц Al_2O_3 из воздушного потока было проведено сопоставление распределения частиц по размерам в исходном порошке и частиц, захваченных ловушкой (рис. 11). Наблюдается селективность в захвате частиц ловушкой в воздушном потоке. Лучше всего захватываются частицы размером около 10 мкм. Хуже всего – частицы в диапазоне от 45 до 50 мкм.

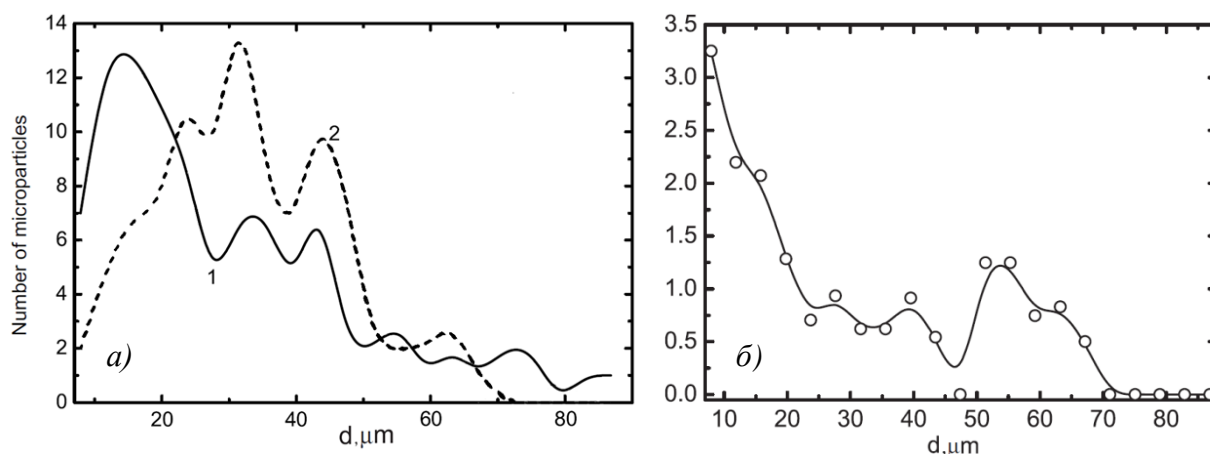


Рис. 11. а) распределения частиц по размерам: 1 – захваченные ловушкой частицы, 2 – исходный порошок; б) отношение распределения захваченных частиц к исходному порошку.

В связи с перспективной возможностью использования электродинамических ловушек для очистки воздуха, интерес представляет изучение захвата электродинамическими ловушками частиц субмикронного размера, поскольку частицы именно такого размера хуже всего удаляются электростатическими способами очистки воздуха. Исследование удержания частиц субмикронного размера проводилось численными методами. Диаметр электродов ловушки принимался равным 1,5 мм, расстояния между поверхностями электродов X принимались равными 3 мм. Заряд частицы принимался равным заряду, который мог быть приобретен в униполярной короне с напряженностью поля 15 кВ/см.

На рисунке 12 представлены максимальные скорости воздушного потока, при которых частицы удерживаются в электродинамической ловушке. При увеличении частоты напряжения на электродах ловушки, сила, удерживающая частицы, уменьшается и максимальная скорость воздушного потока так же уменьшается. Можно видеть, что частицы большего размера удерживаются в воздушном потоке с большей скоростью. По-видимому, это

связано с тем, что сила, удерживающая частицы в ловушке прямо пропорциональна заряду частицы, то есть квадрату размера. Сила же сопротивления среды пропорциональна лишь первой степени размера частицы. В данном случае средняя напряженность электрического поля ловушки U_A/X была равна 5 кВ/см.

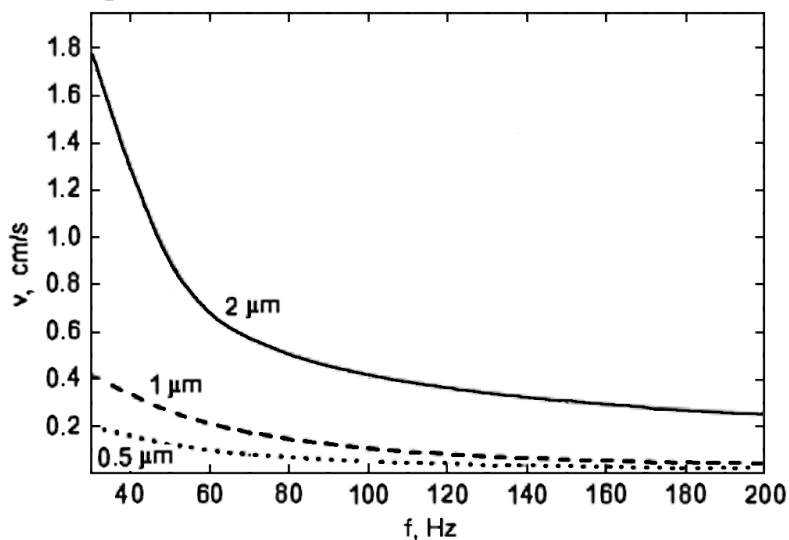


Рис. 12. Области удержания частиц разных размеров в зависимости от частоты напряжения и скорости воздушного потока (численный расчет). Области удержания расположены ниже граничных линий.

Воздействие на кулоновскую структуру электрическими импульсами

Исследовано воздействие на кулоновскую структуру электрическими импульсами. Использовалась линейная квадрупольная ловушка с горизонтальным расположением электродов длиной 10 см, диаметром 4 мм и расстоянием между электродами 2 см. Электрическое воздействие на кулоновскую структуру из частицы Al_2O_3 осуществлялось путем подачи прямоугольных электрических импульсов на два электрода, находящихся на оси в обоих торцах ловушки.

На рис. 13 представлены фотографии вынужденных колебаний кулоновской структуры при амплитуде напряжения ловушки 4,5 кВ, амплитуде воздействующих импульсов 320 В и скважности 0,5. При увеличении частоты воздействия амплитуда колебаний уменьшалась и была практически незаметна при 20 Гц; колебания переставали затрагивать центральную область структуры и наблюдались только по краям. Анализ колебательного движения пылевых частиц позволил провести оценку отношения заряда к массе частиц в структуре, составившего 0,5 мК/кг.

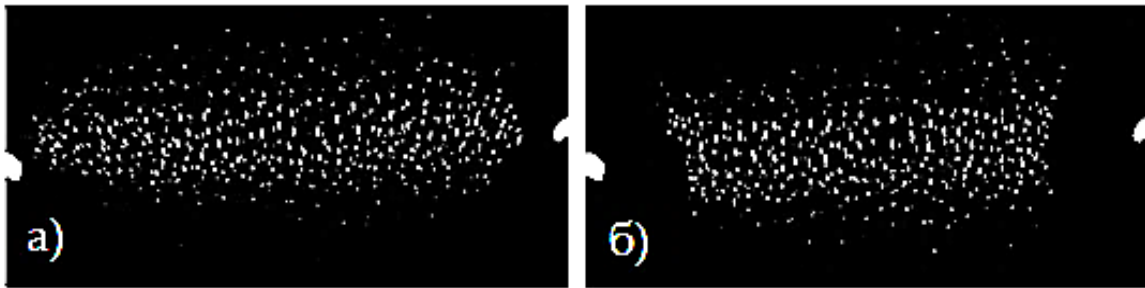


Рис. 13. Кулоновская структура в квадрупольной ловушке под воздействием периодических электрических импульсов в моменты наибольшего разрежения а) и сжатия б). Частота импульсов $f_p = 3$ Гц, Амплитуда импульсов 320 В, скважность 0,5.

Волновые процессы в кулоновских структурах

Исследовано самовозбуждение уединенных волн в кулоновской структуре, удерживаемой в горизонтально ориентированной линейной электродинамической ловушкой. У одного из торцов ловушки находился кольцевой электрод, на который подавался постоянный электрический потенциал. Другой торец ловушки был открыт, где за счет неоднородности и переменного характера электрического поля на частицы действует постоянная сила, направленная к центру ловушки и удерживающая частицы внутри ловушки. За счет накачки энергии в структуру переменным электрическим полем и действия постоянной силы у торцов ловушки в структуре происходило самовозбуждение волнового процесса, представленного на рис. 14. Волна двигалась от свободного конца ловушки к кольцевому электроду. Доходя до кольцевого электрода, или до торцов ловушки волна отражалась и двигалась в обратном направлении с той же скоростью. Скорость волны составляла 5,3 см/с, что соответствует скорости звука в кулоновской структуре.

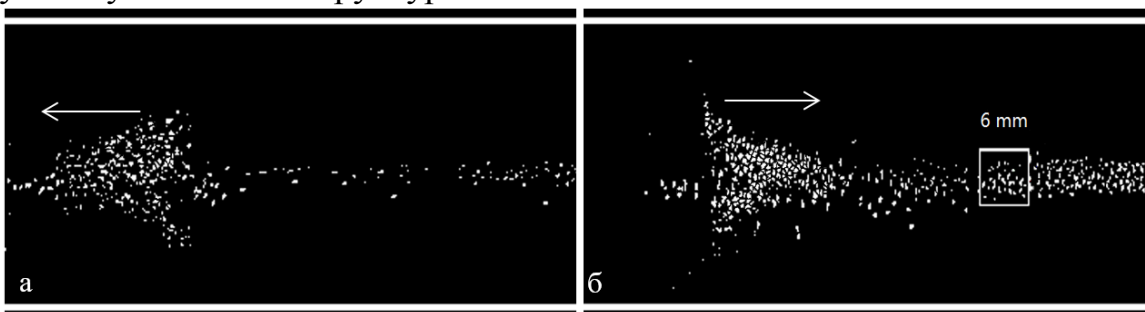


Рис. 14. Уединенная волна в структуре заряженных частиц в квадрупольной ловушке: а) волна движется в сторону кольцевого электрода, б) волна отразилась от потенциально барьера кольцевого электрода и движется в обратную сторону.

Наблюдались случаи возникновения одновременно нескольких уединенных волн. На рис. 15а представлена кулоновская структура в которой образовались три уединенные волны в ловушке с расстоянием между

электродами 1 см. Амплитуда напряжения ловушки составляла 3 кВ. Волны возникали после воздействия на структуру электродом, с постоянным потенциалом 10 кВ. Волны, обозначенные цифрами 1 и 2 движутся на встречу друг другу. На рис. 15б представлен момент их слияния. После слияния волна двигалась слева направо. Скорость движения составляла 2,5 см/с.

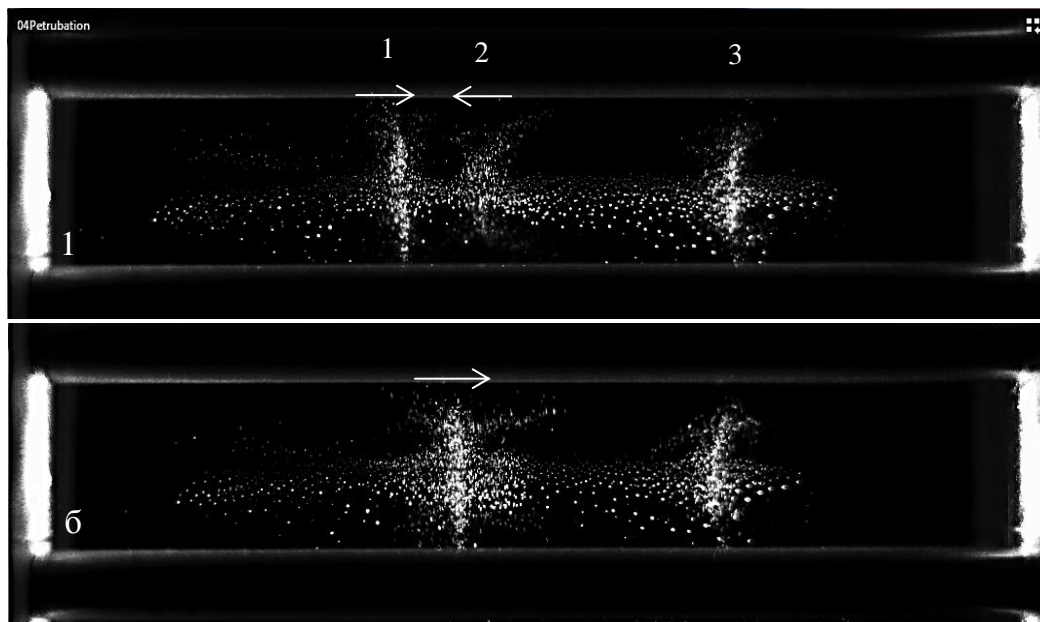


Рис. 15. Уединенные волны в кулоновской структуре.

Удержание частиц в плазме коронного разряда с помощью электродинамической ловушки

Впервые были получены устойчивые кулоновские структуры пылевых частиц в плазме коронного разряда при атмосферном давлении. Коронный разряд реализовывался в квадрупольной электродинамической ловушке, в которой динамические электроды использовались и для создания коронного разряда. Диаметр электродов составлял 300 мкм, а расстояние между электродами 1 см. Коронный разряд зажигался при напряжении 5 кВ. Незаряженные частицы оксида алюминия инжектировались в область ловушки, где заряжались в плазме коронного разряда и удерживались продолжительное время (рис 16). Заряд частиц в коронном разряде зависит от локальной напряженности электрического поля и, как следствие от положения частицы в ловушке. Например, частица размером 10 мкм, находящаяся поблизости от электрода, может зарядиться до 40000 зарядов электрона.



Рис. 16. Структура из частиц Al_2O_3 , в линейной ловушке в плазме коронного разряда. $U_A = 7$ кВ, $f = 50$ Гц.

Сепарация пылевых частиц с помощью переменных электрических полей

Был обнаружен эффект пространственной сепарации пылевых частиц в ловушке особой конструкции. Два верхних электрода были наклонены таким образом, что у одного основания ловушки торцы электродов располагались в углах квадрата со стороной 1,6 см, а у другого – по углам прямоугольника длиной 5,5 см и шириной 1,6 см. Полидисперсные частицы из оксида алюминия предварительно заряжались в коронном разряде и затем захватывались ловушкой, где расслаивались на два облака (рис. 17а). С помощью микроскопа определялся размер частиц в каждом облаке, и были построены функции распределения частиц по размерам (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**б). Средний размер частиц для верхнего облака составил 2,85 мкм, а для нижнего – 5,5 мкм.

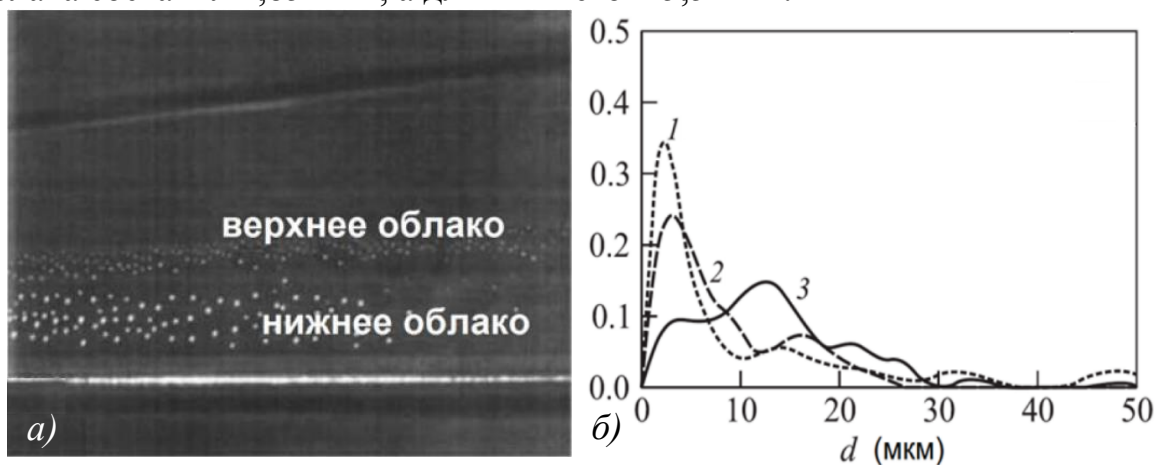


Рис. 17. а) эффект пространственной сепарации частиц в ловушке; б) распределения частиц по размерам: 1 – исходное распределение частиц после их прохождения модуля коронного разряда, 2 – верхнее облако, 3 – нижнее облако.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Создан экспериментальный стенд для исследования процесса захвата и удержания заряженных пылевых частиц электродинамическими ловушками в неподвижном воздухе и воздушных потоках при атмосферном давлении. Стенд включает в себя устройство зарядки частиц в коронном разряде, электродинамические ловушки с различной конфигурацией электродов, средства визуальной диагностики и электрических измерений, системы измерения зарядов.
2. Предложен новый метод измерения размера и заряда частиц, находящихся непосредственно в электродинамической ловушке.
3. Впервые получены большие структуры, содержащие несколько тысяч частиц в электродинамической ловушке при атмосферном давлении.
4. Рассчитаны термодинамические величины системы пылевых частиц в электродинамической ловушке.
5. Впервые экспериментально показано, что в воздушном потоке со скоростью до 50 см/с возможен захват и удержание заряженных пылевых частиц с помощью электродинамической ловушки.
6. Обнаружены неустойчивости, колебания и уединенные волны в электродинамических ловушках.
7. Впервые получены устойчивые кулоновские структуры в плазме переменного коронного разряда при атмосферном давлении, создаваемого линейными электродами электродинамической ловушки.
8. Обнаружен эффект пространственной сепарации пылевых частиц в электродинамических ловушках с помощью переменных электрических полей.

Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

Статьи

1. Syrovatka R.A., Deputatova L.V., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., Vladimirov V.I. Charge and Mass Measurements of a Dust Particle in the Linear Quadrupole Trap // Contrib. Plasma Phys., – 2016. – V. 56, – № 5, – Pp. 419–424.
2. Syrovatka R.A., Vasilyak L.M., Deputatova L.V., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Pecherkin V.Ya., Vladimirov V.I. Coulomb Structure with a Large Number of Particles in the Dynamic Trap at Atmospheric Pressure // Contrib. Plasma Phys., – 2016. – V. 56, – № 3-4, – Pp. 321–326.
3. Lapitsky D.S., Filinov V.S., Vasilyak L.M., Syrovatka R.A., Deputatova L.V., Vladimirov V.I., Pecherkin V.Ya. Confinement of the charged microparticles by alternating electric fields in a gas flow // Europhys. Lett., – 2015, – V. 110, – № 1, – Pp. 15001.

4. Deputatova L.V., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Pecherkin V.Ya., Syrovatka R.A., Vasilyak L.M., Vladimirov V.I. Measurement of the charge of a single dust particle // J. Phys.: Conf. Ser., – 2015, – V. 653, – Pp. 012129.
5. Deputatova L.V., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Pecherkin V.Ya., Syrovatka R.A., Vasilyak L.M., Vladimirov V.I. Confinement of charged microparticles in a gas flow by the linear Paul trap // J. Phys.: Conf. Ser., – 2015, – V. 653, – Pp. 012131.
6. Василяк Л.М., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Сыроватка Р.А., Филинов В.С. Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздушном потоке // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 329-334.
7. Лапицкий Д.С., Филинов В.С., Василяк Л.М., Сыроватка Р.А., Депутатова Л.В., Владимиров В.И., Печеркин В.Я. Расчет термодинамических величин заряженных структур микрочастиц в электродинамических ловушках // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 32-36.
8. Mihalcea B.M., Stan C., Giurgiu L.C., Groza A., Surmeian A., Ganciu M., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Deputatova L.V., Vasilyak L.M., Pecherkin V.Ya., Vladimirov V.I., Syrovatka R.A. Multipole Traps as Tools in Environmental Studies // Rom J. Phys., – 2016, – V. 61, No. 7-8, Pp. 1395-1411.

Патенты

9. Патент РФ № 2612292, 06.03.2017, Бюл. № 7, приоритет от 26.10.2015. Способ удаления заряженных микрочастиц из газового потока // Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Филинов В.С., Василяк Л.М., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Сыроватка Р.А.
10. Патент РФ № 173873, 15.09.2017, Бюл. № 26, приоритет от 26.12.2016. Устройство для измерения удельного заряда частиц микронного размера // Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Филинов В.С., Сыроватка Р.А., Депутатова Л.В., Владимиров В.И.

Список цитированной литературы

11. Vasilyak L.M., Vladimirov V.I., Deputatova L.V., Lapitsky D.S., Molotkov V.I., Pecherkin V.Ya., Filinov V.S. and Vortov V.E. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air // New J. Phys., – 2013, V. 15, P. 043047.
12. Лапицкий Д.С. Моделирование динамики заряженных пылевых частиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.08: Москва, 2013. – 84 с.
13. Гапонов А.В., Миллер М.А. О потенциальных ямах для заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 2. С. 242-243.

Сыватка Роман Александрович

**КУЛОНОВСКИЕ СТРУКТУРЫ МИКРОЧАСТИЦ
В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЛОВУШКАХ
ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно
ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2		