

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им.

А.В. Гопчьева Российской академии наук,



Профессор РАН, д.х.н

А.Л. Максимов

2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Сыроватки Романа Александровича, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему:
«Кулоновские структуры микрочастиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении»,
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация посвящена изучению кулоновских структур микрочастиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении. Хотя кулоновские структуры имеют определенные перспективы в решении ряда прикладных проблем, но наиболее важным и интересным представляется научный аспект их исследования. В таких объектах наблюдаются многие красивые физические явления. В зависимости от степени неидеальности кулоновские системы могут иметь свойства жидкости или кристалла, в них наблюдаются фазовые переходы, волны и неустойчивости. Область знаний, которой посвящена диссертация, интенсивно исследуется в разных странах. Особенно много работ выполнено по исследованию кулоновских плазменно-пылевых структур при пониженных давлениях. Много работ и по исследованию удержания одной частицы в электродинамических ловушках. В электродинамических ловушках есть исследования создания структур ионов. Возможность создания стабильных кулоновских структур заряженных пылевых частиц при атмосферном давлении была показана в работах по численному моделированию таких систем, выполненных ранее в этой же лаборатории, поэтому экспериментальное подтверждение этого было важной научной задачей. Тем не менее, остаются нерешенные научные проблемы, в частности такие, как изучение свойств кулоновских систем большого числа заряженных частиц при атмосферном давлении в электродинамических ловушках, воздействие на такие структуры газовых потоков, электрических полей и плазмы. Здесь важно отметить, что без решения фундаментальных задач невозможно определение путей использования таких систем и выработки рекомендаций по их применению.

Решению этих задач посвящена диссертация Р.А. Сыроватки.

Тема диссертационной работы, несомненно, актуальна.

Структура и содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Содержание работы изложено на 109 страницах, включая 81 рисунок. Список литературы состоит из 105 наименований.

Во **Введении** сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цели исследования, апробация работы, опубликованные по теме диссертации работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит достаточно полный обзор публикаций по теме диссертации. Дано представление о кулоновских структурах и истории их исследований. Описаны электродинамические ловушки, как устройства для удержания заряженных частиц (ловушки Пауля и Пеннинга, линейная квадрупольная ловушка), направления использования и принципы их работы. Описаны методы измерения заряда частиц и способы их зарядки.

Глава 2 описывает созданную многофункциональную экспериментальную установку для исследования электродинамических методов захвата и удержания заряженных частиц при атмосферном давлении. Она допускает зарядку частиц (используется коронный разряд), их транспортировку в зону удержания, а также позволяет работать в покоящейся среде и с газовыми потоками. Визуализация движения частиц осуществляется с помощью подсветки лазерами (с длиной волны 650 нм с максимальной мощностью 100 мВт, и лазера LDD-10 с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 350 мВт) с регистрацией двумя цифровыми камерами для медленно и быстропротекающих процессов. Достаточно подробно описаны основные блоки установки и их характеристики. Для работы автор использовал линейные четырехэлектродную (квадрупольную) и восьмиэлектродную (октупольную) электродинамические ловушки. На электроды электродинамической ловушки подавалось напряжение переменного тока с частотой 20 – 200 Гц и величиной от 0,1 до 10 кВ, на сферический электрод - постоянное напряжение от 0,1 до 15,0 кВ.

В качестве пылевых частиц использовались: полидисперсный порошок Al_2O_3 ($\rho=3,99$ г/см³), калиброванные микросферы из меламинформальдегида ($\rho=1,57$ г/см³) диаметром 10 мкм и сферические частицы из стеклоуглерода диаметром от 10 до 20 мкм.

Третья глава является методической и в ней описана разработанные автором красивые методики определения массы и заряда частиц.

Масса частицы определялась по скорости ее свободного падения в вязкой среде (воздухе). Заряженные частицы инжестировались в линейную квадрупольную ловушку, после чего из роя частиц удалялись все частицы, кроме одной. Метод был проверен с помощью калиброванных микросфер.

Заряд частицы определялся по положению ее левитации в неоднородном электрическом поле. При этом структура поля заряженного шара рассчитывалась с учетом заряда, индуцированного на стержнях электродинамической ловушки. Показано, что этот эффект существенен. Показано также, что заряд частицы не изменялся в течение длительного времени, превышающего длительность эксперимента. Метод определения заряда сопоставлялся с измерениями, проведенными в плоском конденсаторе и показал удовлетворительное согласие. В частности, показано, что исходное распределение частиц по размерам отличается от распределения заряженных частиц.

Представленные методики тщательно протестированы, что значительно увеличивает их достоверность.

Приведены также результаты измерения заряда и массы частиц при зарядке их в отрицательном и положительном коронном разряде при одинаковом напряжении на разряде. На основе анализа результатов сделан вывод о том, что в положительном коронном разряде частицы приобретают больший заряд.

И, наконец, определены границы области удержания частиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке. Рассмотрено качественное объяснение полученных результатов на основе действующей силы Миллера.

Четвертая глава является основной и в ней представлены наиболее важные полученные результаты. Перечислим некоторые из них.

Первая решенная задача – увеличение числа уловленных в ловушке частиц при атмосферном давлении. Эксперименты проводились в горизонтально ориентированной квадрупольной электродинамической ловушке при амплитуде переменного напряжения 1.4-6.8 кВ и частоте 50 Гц. Показано, что число уловленных частиц растет при увеличении напряжения. Причем в зависимости от напряжения структура имеет разную степень упорядоченности, а частицы разных размеров собираются в разных частях ловушки. Получена парная корреляционная функция и проведено моделирование движения частицы в квадрупольной ловушке. Обсуждаются причины различия характеристик структур в экспериментах и расчетах.

Приведены результаты исследования кулоновских структур в линейных квадрупольной и октупольной вертикально ориентированных электродинамических ловушках при различных напряжениях. При увеличении амплитуды переменного напряжения ловушки пылевая структура вытягивается вверх. Пылевая структура расширяется книзу, что обусловлено весом расположенных выше частиц. При амплитуде напряжения не превышающем 5 кВ имеет место упорядоченная пылевая структура, а при напряжении 5,1 кВ структура начинает вращаться.

Интересные результаты получены при изучении динамики кулоновских структур. Они получены при фиксированном напряжении и изменении частоты переменного напряжения (50 -130 Гц). Показано, что характер заполнения ловушки частицами зависит

от частоты: при повышении частоты частицы сдвигаются от центра ловушки, амплитуда частиц уменьшается. В октупольной ловушке частицы располагаются по окружности, увеличивающей радиус при увеличении частоты. Такая зависимость связана с уменьшением силы, удерживающей частицы при увеличении частоты.

Получены кулоновские структуры в квадрупольной кольцевой ловушке. Интересным является исследование удержания заряженных пылевых частиц в ловушке с потоком воздуха (скорость 50 см/с). Эта задача важна для решения прикладных задач очистки газовых потоков от частиц субмикронных размеров. Проведено моделирование, позволившее определить максимальные скорости потока, при которых частицы удерживаются.

Изучено также влияние прямоугольных электрических импульсов разной частоты, амплитуды и скважности на кулоновскую структуру в ловушке. Интересно наблюдение и исследование волн плотности в кулоновской структуре, а также удержание частиц в квадрупольной ловушке, в которой электроды являются коронирующими электродами.

Заметим, что основные главы заканчиваются формулированием основных результатов, полученных в главах. Это значительно улучшает представление полученных результатов.

Заключение суммирует полученные результаты. Заметим, что оно отличается от привычной формы заключения. Нет обычного раздела «Выводы и результаты». По-видимому, автор посчитал достаточным положения, выносимые на защиту, которые приведены во Введении.

Диссертация не свободна от недостатков. Ниже приводятся некоторые из них.

Замечания:

1. Было бы правильным в конце литературного обзора сформулировать нерешенные проблемы, откуда должны вытекать задачи исследования.
2. На рис.12 приведены данные о скорости «электрического ветра». Не написано, как она измерялась и какова погрешность?
3. В третьей главе описан разработанный автором метод определения заряда и массы частиц. В выводах необходимо было бы сформулировать достоинства предложенного метода по сравнению с известными, и описанными в разделе 1.4.
4. В третьей главе приведены результаты расчетов (напр., рис.25). Нет пояснений, разрабатывались ли коды автором, или использовался один из известных пакетов программ (напр., Comsol)? Для наглядности было бы правильным сопроводить двухмерную картинку аксиальным распределением поля и показать отличие от определяемого по формуле распределения поля. В тексте говорится о большой погрешности в определении последнего. Об этом свидетельствует и рис. 24.
5. Какую массу имели тестовые микросферы? Это были сферы из меламинформальдегида, или из стеклоуглерода? Для первых плотность дана в главе 2.

6. Формулы 4.1. дают параметры, которые можно определить с помощью парной корреляционной функции. В тексте же приведено значение только одной величины.
7. Есть текстовые неточности. Например, на стр.24 написано «зарядке макрочастиц в **воздушной и газовой** среде атмосферного давления», на стр. 34 «Для определения **количества** длины, приходящееся на один пиксель», название п.4.1, и др.

Перечисленные замечания не снижают важности и достоверности полученных результатов.

Автором выполнен большой объем исследований. Диссертация является примером тщательно выполненной экспериментальной работы. Хотя она содержит и расчеты, но они служат для качественного объяснения экспериментальных результатов. Представляется, что экспериментальная часть является основной. Многие результаты получены впервые. Полученные результаты подтверждают сказанное в начале отзыва о возможности наблюдения в кулоновских структурах интересных явлений. Результаты могут явиться основой для моделирования описанных систем.

Можно выделить **основные, на наш взгляд, научные результаты:**

1. Разработанный оригинальный метод определения заряда и массы заряженных частиц.
2. Удержание стабильных кулоновских структур из большого количества пылевых частиц в воздухе при атмосферном давлении с помощью электродинамических ловушек с различной конфигурацией электродов.
3. Создание стабильных структур заряженных частиц в плазме коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении в линейной электродинамической ловушке.
4. Возбуждение уединенных волн плотности в линейной электродинамической ловушке.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием известных надежных методик измерения, использованием поверенного измерительного оборудования и подтверждается воспроизводимостью результатов измерений, сравнением экспериментальных результатов и численного моделирования.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях. Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 8 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК. Получено 2 патента.

Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области исследования и применения плазменных систем (ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ФТИ РАН, ИКИ РАН, ИНХС РАН, МГУ, МГТУ, К(П)ФУ, КНИТУ, ИГХТУ, СПБГУ, ГНЦ ФЭИ, МИФИ, МФТИ).

Диссертация Сыроватки Р.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9

Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. Задачи и содержание работы отвечают паспорту специальности 01.04.08 – Физика плазмы. Ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертационная работа Сыроватки Р.А. была заслушана на научном семинаре лаборатории «Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» ИНХС РАН 29 июня 2018 г, протокол № 7.

Г.н.с. лаборатории Плазмохимии и физикохимии
импульсных процессов ИНХС РАН,
доктор физико-математических наук

Ю. А. Лебедев

Сведения о составителе отзыва:

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, почтовый адрес: 117597, Москва, Литовский бульвар, д.1.. кв. 490, тел.: 8(495)4270926, адрес электронной почты: lebedev@ips.ac.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), должность: главный научный сотрудник.

Подпись д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедева удостоверяю
Зам. директора ИНХС РАН
кандидат химических наук



С.В. Антонов

Адрес организации: 119991, Москва, Ленинский проспект, 29,
тел. 8(495) 9544275,
e-mail: tips@ips.ac.ru