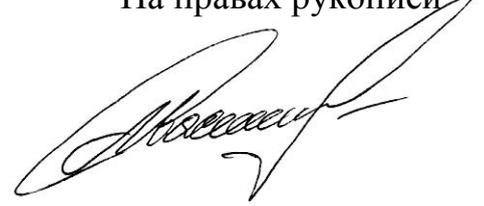


На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВ Михаил Михайлович

**ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР
ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОЧАСТИЦ: МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

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

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., Первый заместитель директора отделения - начальник отдела, Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, (Акционерное общество «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»), ФИЛИППОВ Анатолий Васильевич.

д.ф.-м.н., проф., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),

ПОПЕЛЬ Сергей Игоревич;

д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),

КАРАСЕВ Виктор Юрьевич;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Защита состоится «27» июня 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, диссертационный совет ОИВТ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ио. ученого секретаря
диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н.

Л.М. Василяк

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению эволюции открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц в пылевой плазме.

Актуальность работы. Согласно современным представлениям более 99 % вещества во Вселенной является плазмой. Ионизация в звездах обусловлена высокой температурой; в туманностях, разреженном межзвездном газе и пылегазовых облаках ионизация может возникать и поддерживаться под воздействием жесткого излучения. Макрочастицы в плазме могут существенным образом влиять на ее свойства. Пылевые частицы в плазме могут появляться в результате различных процессов, например в результате различных химических реакций, конденсации и других, а также инжектироваться в плазму преднамеренно. Для обозначения плазмы, содержащей пылевые частицы, как правило, применяется термин «пылевая плазма» (англ. *dusty plasma*). В плазме, макрочастицы могут приобретать заряд в результате потоков электронов и ионов на ее поверхность; в результате фотоэлектронной или термоэлектронной эмиссии. Заряд макрочастиц в плазме, не постоянен, зависит от локальных условий и флуктуирует. Системы заряженных сильно взаимодействующих частиц представляют наибольший интерес и работа посвящена их исследованию.

В настоящее время исследование плазмы, в том числе с точки зрения ее практического применения, занимает существенное место в различных научно-технических областях, таких как электрофизика, астрофизика, магнитогидродинамика, ядерная физика. В свою очередь, реально применяемая плазма всегда имеет конечные размеры и ограничена или стенками газоразрядной камеры или газовой средой. Таким образом, вопрос о взаимодействии плазмы с конденсированным веществом и газом имеет важное значение. В тоже время пылевая плазма является уникальным объектом, позволяющим изучать различные явления, в том числе процессы самоорганизации и эволюции на кинетическом уровне.

Одной из важных особенностей плазмы с пылевыми частицами является то, что энергия взаимодействия заряженных частиц $\propto Z_p^2$ может быть существенно выше энергии их теплового движения, что характерно для сильнонеидеальных систем, поскольку заряд пылевых частиц Z_p может составлять 10^3 - 10^6 зарядов электрона. В качестве параметра, характеризующего неидеальность пылевой плазмы, принято использовать параметр неидеальности Γ , равный отношению потенциальной энергии

кулоновского взаимодействия пылевых макрочастиц к их кинетической энергии, определяемой их «тепловым» движением.

Еще в работе Ишимару [Ichimaru S., Rev.Mod. Phys., 1982] на основе модели однокомпонентной плазмы было показано, что при $\Gamma \gtrsim 1$ в системе зарядов появляется ближний порядок, а при $\Gamma \cong 10^6$ однокомпонентная плазма «кристаллизуется». Аналогичные рассуждения привели Икези к выводу о возможности «кристаллизации» пылевой подсистемы в газоразрядной плазме [Ikezi H., Phys. of Fluids, 1986]. А спустя несколько лет пылевой кристалл экспериментально наблюдался сначала в плазме высокочастотного емкостного разряда в приэлектродной области, а затем в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Пылевая система не может быть строго описана с помощью подходов равновесной термодинамики, поскольку не является замкнутой, и для нее характерен обмен энергией и веществом с окружающей плазмой. В таких пылевых системах могут возникать условия, приводящие к их самоорганизации, т.е. к переходу ансамблей пылевых частиц от хаоса к более упорядоченным состояниям. И.Р. Пригожин в работах по неравновесной термодинамике назвал такие системы диссипативными, подчеркивая тем самым, что процесс диссипации может играть в формировании упорядоченных состояний основополагающую роль [Prigogine I., Heinemann, 1984].

В лабораторных условиях формирование пылевых облаков происходит в плазменных ловушках, где в результате самосогласованного действия гравитационных, электрических и других сил создаются условия для удержания заряженных макрочастиц. Эксперименты с пылевой плазмой проводятся при давлениях газа P от 0.01 до 1 Торр, где диссипация вводимой энергии обусловлена столкновениями с молекулами или атомами газа и играет значительную роль. Пылевые частицы в газоразрядной плазме приобретают значительный отрицательный заряд в результате потоков на ее поверхность электронов и ионов. Заряженные макрочастицы взаимодействуют как между собой, так и с внешними электрическими и магнитными полями, а также атомами, ионами и электронами. Совместное действие сил на макрочастицы со стороны окружающей плазмы и сил межчастичного взаимодействия может приводить к формированию самых различных структур: квазидвумерных плазменно-пылевых структур, протяженных трехмерных пылевых структур и др. Зарядовый состав плазмы и динамическое поведение частиц являются одними из важных вопросов при изучении эволюции пылевых систем в плазме. Квазидвумерные пылевые структуры, состоящие из одного или нескольких пылевых монослоев

макрочастиц, могут быть экспериментально получены в приэлектродной области ВЧ разряда. В свою очередь в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока, как правило, наблюдаются трехмерные структуры.

Цели диссертационной работы заключались в экспериментальном изучении динамических и структурных характеристик, механизмов и условий формирования сильнокоррелированных структур заряженных макрочастиц и их эволюции.

Для достижения поставленной цели были разработаны экспериментальные стенды для удержания и диагностики ансамблей макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов; проведены экспериментальные исследования динамических и структурных особенностей пылевых структур в широком диапазоне параметров газового разряда и магнитных ловушек; проведен анализ экспериментальных наблюдений поведения макрочастиц в плазме; а также изучены механизмы, объясняющие наблюдаемые в экспериментах явления.

Научная новизна.

В результате были разработаны и реализованы экспериментальные и диагностические стенды для формирования пылевых структур в электростатических и магнитных ловушках при различных внешних воздействиях: при криогенных температурах, лазерном воздействии, воздействии внешних магнитных полей. Предложена методика диагностики пылевых структур и восстановления информации о пространственном положении макрочастиц, траекторий и скорости их движения на основе метода бинокулярного зрения. На основе анализа проведенных экспериментальных исследований получены количественные данные о динамических характеристиках плазменно-пылевых структур в стратах тлеющего разряда постоянного тока в магнитном поле с индукцией 0 - 2500 Гс и предложен механизм объясняющий динамику пылевых частиц в тлеющем газовом разряде в магнитном поле. Впервые экспериментально изучены условия формирования и эволюция пылевой подсистемы в плазме криогенного тлеющего разряда постоянного тока с повышением температуры нейтрального газа от 4 до 10 К. Предложена методика формирования кулоновских структур сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в криогенных жидкостях, а также их парах. Изучены динамические и структурные характеристики пылевых кластеров в магнитных ловушках в лабораторных условиях и условиях микрогравитации. Для квазидвумерных плазменно-пылевых структур в

плазме ВЧ разряда проведен анализ трансляционного, ориентационного порядка в пылевой системе и ее топологических дефектов при фазовом переходе кристалл-жидкость с промежуточной гексатической фазой.

Научная и практическая значимость работы

Одним из важнейших вопросов современного естествознания является вопрос о возникновении упорядоченности в открытых системах, далеких от равновесия. В химии и биологии диссипативные структуры играют особую роль – это и периодические реакции в химии, и различные коллективные явления в биологических средах, морфогенез, проблема предбиологической эволюции [Пригожин И., М. Мир. 1979]. В физике ведутся исследования самоорганизации или фазовых переходов открытых диссипативных систем. Диссипативная самоорганизация – это фазовый переход структур вдали от состояния равновесия. Примером такой системы является плазма, содержащая пылевые макрочастицы. Данная система обладает целым рядом уникальных свойств. В таких системах могут формироваться пылевые структуры в результате сложного взаимодействия большого числа макрочастиц, которые в свою очередь находятся в диссипативной среде и участвуют в обмене энергией и веществом с плазмой. Значимость представленных в работе исследований определяется экспериментальными результатами и полученными сведениями об эволюции плазменно-пылевых систем и их свойствах. Полученные в работе данные могут использоваться для изучения явлений самоорганизации и фазовых переходов в открытых диссипативных системах.

Развитие методов диагностики динамических характеристик макрочастиц в плазменно-пылевых системах имеет большое прикладное значение. Так оптический метод трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур позволяет находить пространственные координаты, скорости и траектории пылевых частиц и может использоваться не только для диагностики пылевых частиц, но и любых малых объектов, например, биологических жидкостей (кровь, семенная жидкость, и т.д.)

Результаты космического эксперимента «Кулоновский кристалл» по исследованию формирования пространственно-упорядоченных структур диамагнитных частиц легли в основу нового метода для формативной трехмерной биофабрикации тканевых конструкций, осуществляемой методом программируемой самосборки живых тканей и органов в условиях земного притяжения и условиях микрогравитации посредством неоднородного магнитного поля [Parfenov V., Biofabrication, 2018]. Для практической реализации метода была разработана соответствующая аппаратура.

Полученные в работе результаты по исследованию динамических плазменно-пылевых структур позволяют глубже понять возникновение и существование различного рода неустойчивостей: автоколебаний, мурмурации, вихревого движения в таких структурах.

Результаты исследования пылевой плазмы в магнитном поле могут найти приложения для выявления особенностей поведения высокодисперсной пылевой компоненты, например в установках термоядерного синтеза.

Полученные экспериментальные сведения о кинетике самоорганизации в пылевой плазме могут быть полезны для разработки практических методов управления пылевой компонентой в плазме, что может лечь в основу новых методов производства материалов с заданными свойствами и повышению качества различных технологических плазменных процессов.

Результаты, представленные в данной работе, могут найти применение в исследованиях широкого спектра специалистов, в т.ч. занимающихся изучением пылевой плазмы, ее свойств и практических приложений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс экспериментальных стендов для изучения структур макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов при комнатной и криогенных температурах, воздействии сильных магнитных полей.

2. Результаты исследования формирования плазменно-пылевых структур и динамики движения пылевых частиц в аксиальном магнитном поле с индукцией до 700 Гс.

3. Методика трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур на основе принципа бинокулярного зрения для нахождения пространственных координат, скоростей и траекторий частиц.

4. Результаты изучения эволюции пылевых структур, образование цепочечных структур в криогенном газовом разряде постоянного тока при изменении температуры нейтрального газа от 4 до 10 К.

5. Методика кинетического разогрева пылевых макрочастиц на основе фотофлоресценции в плазме газового разряда при воздействии лазерного излучения.

6. Экспериментальные результаты изучения фазового перехода кристалл-жидкость в пылевом монослое на основе анализа трансляционного, ориентационного порядка в пылевой системе и ее топологических дефектов.

7. Экспериментальное обнаружение промежуточной гексатической фазы при фазовом переходе в квазидвумерной плазменно-пылевой системе.

8. Результаты наблюдения формирования кулоновских структур из сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в жидком

азоте и его парах.

9. Исследование динамики движения заряженных макрочастиц и образование анизотропных (цепочечных) структур в условиях микрогравитации.

Достоверность результатов и апробация работы

Представленные в диссертации результаты экспериментальных исследований с высокой точностью повторяются в экспериментах на различных установках и согласуются с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов.

Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях: на 5th, 6th, 7th, 8th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas 2008, 2011, 2014, 2017 гг.; на Научно-координационной Сессии "Исследования неидеальной плазмы" 2011-2016 гг.; 49–59й Всероссийских научных конференциях с международным участием: «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» Московского физико-технического института 2006–2017 гг.; International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems 2005, 2011, 2014 гг.; 33-35, 37, 41, 42rd European Physical Society Conference on Plasma Physics 2006-2008, 2010, 2014, 2015 гг.; XXIV- XXX International conference «Interaction of intense energy fluxes with matter» 2007-2017 гг.; XXIII- XXX International conference «Equations of State for Matter» 2008-2018 гг.; 28st, 31st International Conference on Phenomena in Ionized Gases 2007, 2013 гг.; XXXIV, XXXV, XXXVII International Congress on Plasma Physics 2008, 2010, 2014 гг.; XIII, XV International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas 2009, 2015 гг.; 1st Workshop on the "Dust in Fusion Plasmas" 2007 г., 2nd International Conference on the Physics of Dusty and Burning Plasmas 2007 г.; 23rd Symposium on Plasma Physics and Technology 2008г.; Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» 2009 г.; Научных семинарах Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 8th Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals 2010 г.; 3 International conference Dusty plasmas and applications 2010 г.; 20th European Conference on the Atomic and Molecular of Ionized Gases 2010 г.; XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС 2011 г.; Information Storage and Processing System ISPS 2011 г.; NATO Advanced Research Workshop 2011 г.; VII и VIII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology 2012, 2015 гг.; V Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики 2013 г.; 7й Международный симпозиум по теоретической и прикладной

плазмохимии; 66th International Astronautical Congress 2015 г.; 22nd International Symposium on Plasma Chemistry ICPC 2015 г.; 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics 2015 г.; XXIII Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases 2016 г.; 14th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation 2016 г.; 26th IUPAP International conference on Statistical Physics 2016 г.

Работа автора по исследованию вихрей в пылевой плазме тлеющего разряда постоянного тока стала лауреатом конкурса «Новая генерация» в области энергетики и смежных наук Российской Академии наук и РАО ЕЭС России 2006 года. Автор является победителем конкурса «УМНИК» 2007 года за разработку и реализацию метода трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур. Автор является лауреатом конкурса научных работ молодых ученых ОИВТ РАН, посвященного 50-летию института в 2010 году. За цикл работ «Разработка методов диагностики пылевой плазмы газового разряда» в 2011 году автору вручена золотая медаль РАН с премиями для молодых ученых. Автор является победителем конкурса 2012 года на право получения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук в области технических и инженерных наук. Автор является призером Юбилейного конкурса научных работ, посвященного 100-летию чл.-корр. РАН Л.М. Бибермана. Автор является победителем Всероссийского конкурса научно-технических работ государственной корпорации Роскосмос «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» 2016 года.

Публикации. Автором совместно с соавторами опубликована глава в монографии, 95 докладов, 1 патент и 40 статей в российских и зарубежных научных журналах из перечня ВАК, из них 25 статей легли в основу настоящей диссертационной работы.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 211 страниц, включая 111 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 225 наименований.

Личный вклад автора

Диссертация обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. Вклад автора в совместно написанные работы заключается в следующем:

Все экспериментальные установки, используемые в работах,

разработаны и созданы либо лично автором, либо совместно с коллегами при определяющем участии автора.

Во всех работах автор проводил экспериментальные исследования, включая отладку экспериментальных и диагностических комплексов, проведение экспериментов, обработку и анализ полученных результатов.

Автор участвовал в постановке научных задач, совместных обсуждениях, а также подготовке рукописей к публикации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость задач, решаемых в работе. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию методов диагностики и определению параметров макрочастиц в газоразрядной плазме и плазменно-пылевых образований, сформированных ими. При исследовании комплексной плазмы, помимо диагностики газовой фазы, необходимо определять основные характеристики макрочастиц, которые наряду с параметрами плазмы (температура и концентрация электронов, ионов и нейтралов) обуславливают ее основные свойства. В главе приведены методы диагностики, которые применялись в настоящей работе, основанные как на технике визуализации макрочастиц, так и на непосредственном измерении их характеристик. Глава 1 состоит из трех частей, включая выводы.

В **п.1.1** рассматриваются оптические методы диагностики пылевых образований. Большинство методов для диагностики и определения параметров плазменно-пылевых систем относятся именно к оптическим методам поскольку последние, как правило, не вносят существенного возмущения в исследуемые пылевые системы, при этом обладают высокой точностью, быстродействием, возможностью применения автоматической обработки и получения данных в реальном времени.

В **п.1.1.1** описан метод визуализации, определения координат и скоростей макрочастиц в двумерном случае. В основе оптического метода определения пространственного положения макрочастиц в плазме газового разряда и их динамических характеристик лежит непосредственное наблюдение за пылевой подсистемой. Несмотря на малую объемную долю пылевой фракции, благодаря своим размерам, макрочастицы достаточно эффективно рассеивают свет. Возможность видеорегистрации положения пылевых частиц в каждый момент времени, в отличие от обычных жидкостей и газов, создает уникальную возможность узнать микросостояние исследуемой системы и изучить её на кинетическом уровне. Для визуализации

частиц в качестве подсветки, как правило, применяется лазерный пучок, который для некоторых задач с помощью цилиндрической линзы может формироваться в плоскопараллельный лазерный «нож» с толщиной перетяжки порядка сотни микрометров и шириной до нескольких десятков сантиметров. Рассеянный частицами свет фиксируется с помощью видеокамеры. Последующий анализ полученных видеозаписей позволяет определять координаты положения пылевых частиц в каждый момент времени, а на основе анализа смещений пылевых частиц между кадрами видеоизображения - скорости их движения. В результате анализа этих данных удастся получить такую важную информацию о состоянии пылевой подсистемы как межчастичные расстояния и концентрацию пылевых частиц, их кинетическую температуру. Для корректного определения скорости движения макрочастиц необходимо высокое пространственное и временное разрешение видеосистемы. Так время между двумя последовательными видеокдрами, за которое регистрируется смещение анализируемой макрочастицы, должно быть меньше характерного времени их торможения нейтральной компонентой $\sim v_{fr}^{-1}$. В противном случае, смещение пылевых частиц будет определяться диффузионным механизмом, что приведет к ошибке определения их скоростей.

В п.1.1.2 приведен краткий обзор методов восстановления трехмерных изображений пылевой структуры. В литературных источниках предлагаются различные подходы к восстановлению всех трех координат макрообъектов, формирующих объемную структуру. Среди них: метод голографической видеосъемки; метод на основе задания информации о третьей степени свободы при помощи формирования градиента интенсивности подсветки; метод сканирования пылевой структуры тонким лазерным «ножом». Однако точность восстановления третьей координаты этими методами остаётся невысокой. При этом для корректного определения величин, восстанавливаемых по этим координатам, таких как скорости частиц, их кинетическая температура и др. необходимо производить видеосъемку структуры с пространственным и временным разрешением, лежащим в определенных пределах, зависящих от параметров исследуемой структуры. В разделе приведено описание подхода трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур, применяемого в настоящей работе и основанного на принципе бинокулярного зрения. Для его реализации был собран диагностический комплекс, состоящий из двух синхронизированных видеокамер, расположенных под углом друг к другу. Камеры располагаются таким образом, чтобы положение координат вертикальных осей совпадали на левом и правом изображениях, а горизонтальные оси находились под

заданным углом друг к другу. В таком случае, получение изображений видеокамерами рассматривается как ортогональное проецирование на матрицы видеокамер и искомая координата определяется как простая тригонометрическая функция координат изображений рассматриваемой частицы. Однако такой метод годится только для структур с малым количеством частиц и высоким пространственным разрешением видеозаписи, поскольку из-за конечной точности определения координат несколько изображений могут иметь равные координаты в пределах погрешности. Для преодоления указанной проблемы можно проследивать историю изменения вертикальной координаты каждой частицы и сравнивать между собой эти истории для верификации координат. При возникновении проблем связанных с перекрыванием и исчезновением изображений частиц, производится распознавание видеозаписей и восстановление траекторий частиц отдельно с левой и правой камер. Далее сравниваются вертикальные координаты выбранной частицы на левой и правой видеокамерах, которые должны совпадать с точностью до ошибки. Таким образом однозначно определяются пары видеоизображений, относящихся к одной и той же частице в результате чего восстанавливаются их координаты.

В п. 1.1.3 приведено краткое описание метода определения размеров частиц по рассеянию лазерного излучения на основе теории рассеяния Ми. В теории поглощения и рассеяния света малыми частицами, как правило, рассматривается два типа задач: прямая и обратная. В прямой задаче определяется поле рассеянного на частице излучения при условии, что известны основные характеристики частицы, такие как ее размер, форма и комплексный показатель преломления материала частицы. Обратная задача заключается в восстановлении указанных параметров частицы по характеристикам рассеянного поля. В экспериментальных исследованиях плазмы с пылевыми макрочастицами наибольший интерес представляет именно обратная задача. Так для построения количественных моделей различных физических явлений в пылевой плазме необходимы данные о размерах пылевых частиц, содержащихся в плазме. Для этого в экспериментах, как правило, используют монодисперсные сферические частицы с заранее известным размером. Однако в ходе эксперимента частицы могут менять свои размеры. Исходные образцы монодисперсных частиц всегда содержат некоторое количество частиц с близкими, но отличными размерами. А при некоторых условиях эксперимента возможна реализация ситуации, когда плазменные потенциальные ловушки могут захватывать именно эти частицы, пропуская частицы основного размера. В основе метода решения обратной задачи теории рассеяния Ми лежит выбор подходящих аппроксимаций, связывающих измеряемые оптические

характеристики частицы с искомыми параметрами отдельных частиц или дисперсного объема из этих частиц. Для определения размера пылевых частиц в ходе эксперимента осуществляется видеосъемка пылевого облака при помощи фото или видеокамеры под разными углами к подсвечивающему лазерному излучению с шагом 1-2 градуса. Размер анализируемых частиц определяется из аппроксимации результатов измерения распределения интенсивности углового рассеяния с результатами расчетов.

В п.1.2 представлено описание метода отбора проб для анализа макрочастиц, формирующих пылевую структуру в газовом разряде. Извлеченные из газового разряда пылевые частицы анализируются методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Данный метод основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым объектом. РЭМ позволяет определять с высокой точностью размеры макрочастицы, получать изображение ее поверхности с высоким пространственным разрешением до десятых нанометров, а так же проводить рентгеноспектральный микроанализ для определения элементного состава поверхности частицы.

В п. 1.3 содержатся заключение и выводы к Главе 1.

Во второй главе представлено описание экспериментальных и диагностических комплексов для изучения кулоновских систем макрочастиц в газовых разрядах низкого давления и магнитных ловушках различного типа, используемые в настоящей работе. Представленные экспериментальные установки, разработаны и созданы либо лично автором, либо совместно с коллегами при определяющем участии автора. В главе обсуждается возможность удержания пылевого облака в различных газовых разрядах и магнитных ловушках, способы формирования пылевых структур разных размеров и размерностей (квазиодномерные, квазидвумерные, трехмерные) с различными характеристиками.

П. 2.1 посвящен описанию экспериментальных стендов для изучения пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока низкого давления. В результате стратификации разряда и потенциального барьера у стенок газоразрядной трубки возникают условия для «захвата» макрочастиц и их левитации в поле силы тяжести земли. В связи с формой электростатической ловушки в плазме тлеющего разряда постоянного тока возможно формирование как квазиодномерных пылевых цепочек, так и протяженных трехмерных пылевых облаков.

В п. 2.1.1 приведено описание экспериментального стенда для изучения пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока при комнатной температуре. Основным элементом экспериментального стенда является

вертикально ориентированная стеклянная газоразрядная трубка с холодными электродами. К трубке подключается вакуумный пост, состоящий из последовательно соединенных форвакуумного и турбомолекулярного насосов; блока индикации давления в трубке; газового тракта для заполнения трубки рабочим газом, газовых баллонов и газового резервуара для приготовления газовых смесей; газового расходомера с регулировкой скорости потока для прокачки газоразрядной трубки рабочим газом. Схематически экспериментальный стенд и его вакуумная система представлены на рисунке 1.

Для формирования тлеющего разряда постоянного тока из трубки откачивается воздух посредством вначале форвакуумного, а затем турбомолекулярного насоса до давления 10^{-5} - 10^{-6} Торр. Затем осуществляется напуск буферного газа в газоразрядную трубку до рабочих давлений 0,01-1 Торр. Для поддержания чистоты буферного газа в ходе эксперимента применяется газовый расходомер с регулировкой скорости потока буферного газа и блок управления соединенный с запорным клапаном насоса. Таким образом, в газоразрядной трубке поддерживается заданное рабочее давление и осуществляется замещение загрязненного примесями буферного газа чистым газом.

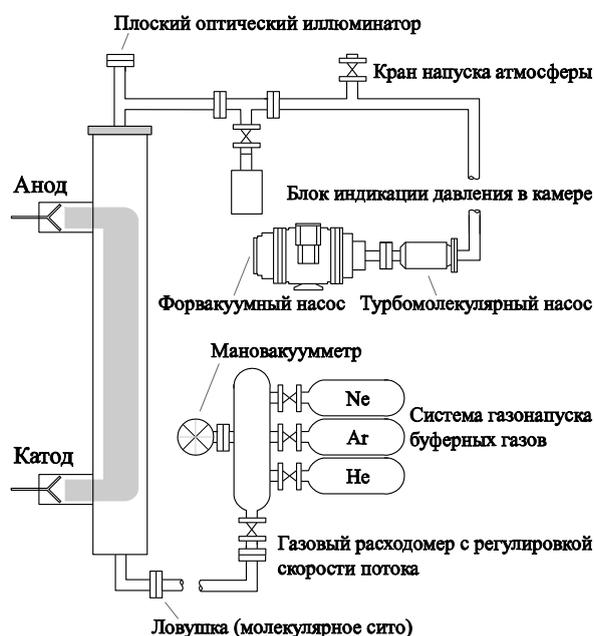


Рис. 1 – Схема экспериментального стенда с тлеющим разрядом постоянного тока.

Для инъекции в газовый разряд пылевых частиц в верхней части трубки помещаются контейнеры с сетчатым дном, в результате механической вибрации которых производится вброс макрочастиц в разряд. Пылевые частицы заряжаются в плазме и захватываются стратами тлеющего разряда.

Визуализация пылевого облака в плазме осуществляется посредством его подсветки лазерным излучением, которое вводится либо аксиально через плоский оптический иллюминатор в верхней части трубки, либо радиально через стенку трубки.

Для исследования воздействия магнитного поля на плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде постоянного тока была создана экспериментальная установка, описанная в п. 2.1.2 и схематически изображенная на рисунке 2. Основным элементом генератора магнитного поля является сверхпроводящая цилиндрическая катушка индуктивности из Nb-Ti. Катушка закреплена в гелиевой емкости, имеющей три патрубка и два токоввода. Один из патрубков используется для заливки жидкого гелия в емкость, через второй производится отвод паров гелия в газгольдер, третий патрубок используется для размещения датчика уровнемера жидкого гелия в гелиевой емкости. Газгольдер оснащен предохранительной мембраной, обеспечивающей безопасный сброс газообразного гелия при критическом давлении. Тепловое экранирование гелиевой емкости осуществляется при помощи азотного и вакуумного экранов. Ток на электроды криостата подается источником питания соленоида с водяным охлаждением и при максимальном значении магнитного поля 30 кГс составляет 200 ампер. Сам криостат осесимметричен и имеет в центре так называемое «теплое отверстие», диаметр которого составляет 150 мм, куда и помещается газоразрядная трубка с исследуемой пылевой компонентой. Температура внутри этого отверстия при рабочем захлажденном соленоиде не опускается ниже 273 К.

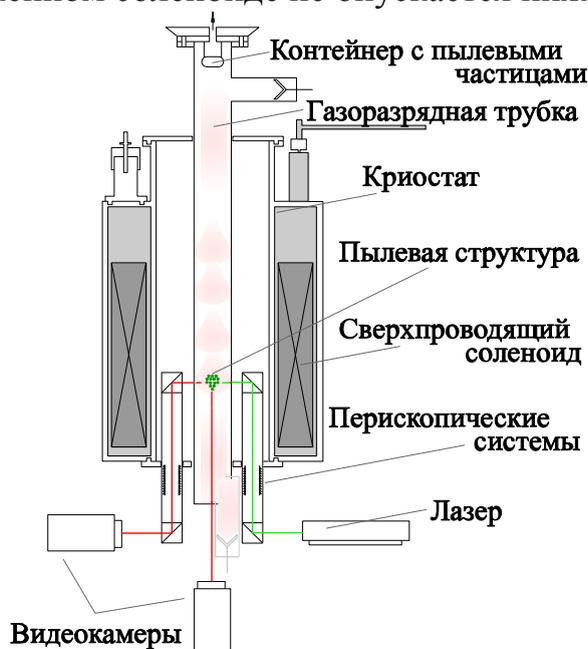


Рис. 2 – Схематическое изображение экспериментальной установки: криостат сверхпроводящего магнита, в который помещена газоразрядная трубка.

Для перехода к криогенным температурам при исследовании газоразрядной пылевой плазмы применяется метод охлаждения стенок разрядной трубки криогенными жидкостями или газами. В п. 2.1.3 представлено описание экспериментального стенда с тлеющим разрядом постоянного тока при температурах до 4 К. Основным элементом созданной экспериментальной установки является оптический гелиевый криостат, представляющий собой комплекс из двух коаксиальных емкостей – гелиевой шахты и азотного экрана, а также внешнего корпуса с оптическими окнами (Рисунок 3).

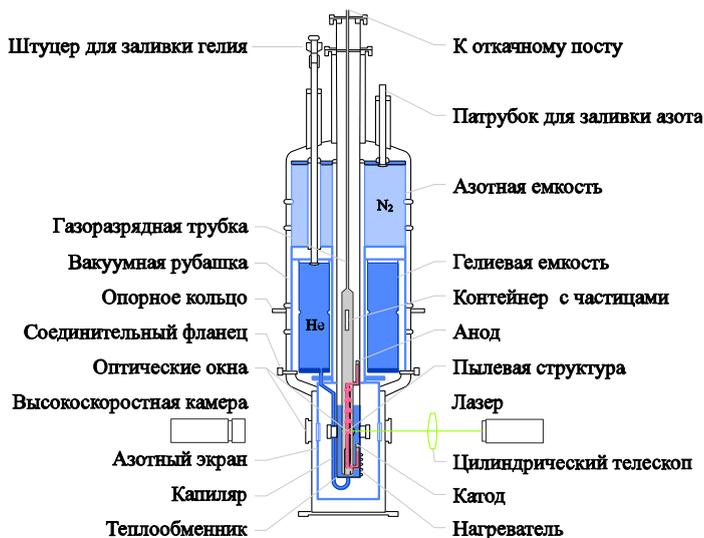


Рис. 3 – Схематическое изображение экспериментальной установки криогенной газоразрядной плазмы, на основе оптического криостата.

В шахту криостата, в которой обеспечивается стабилизация температуры, помещается стеклянная газоразрядная трубка, расположенная аксиально вдоль вертикальной оси криостата. Перед проведением эксперимента для предотвращения конденсации водяных паров на оптических окнах криостата, что в свою очередь может приводить к затруднению оптической диагностики пылевой подсистемы, из шахты криостата откачивается воздух, после чего она заполняется газообразным гелием до атмосферного давления. После этого осуществляется заливка в шахту криостата жидкого гелия. Для обеспечения возможности плавного варьирования температуры возможна организация продувки шахты криостата, в которой расположена газоразрядная трубка, газообразным гелием барботируемым через жидкий гелий. При этом температура стенки газоразрядной трубки контролируется температурным датчиком вблизи области формирования пылевой структуры. Оптические окна в нижней части криостата позволяют проводить диагностику пылевой плазмы, посредством подсветки лазерным излучением пылевой структуры через одно из окон и

видеосъемки через другое.

П. 2.2 посвящен описанию экспериментального стенда для исследования пылевой плазмы высокочастотного емкостного разряда низкого давления. В таком разряде пылевые частицы удерживаются в электростатической ловушке в приэлектродном слое и, как правило, формируют квазидвумерные пылевые структуры, состоящие из одного или нескольких слоев. Экспериментальный стенд состоит из газоразрядной камеры низкого давления, вакуумного поста, оптической и электрической системы, а также диагностического комплекса (Рисунок 4).

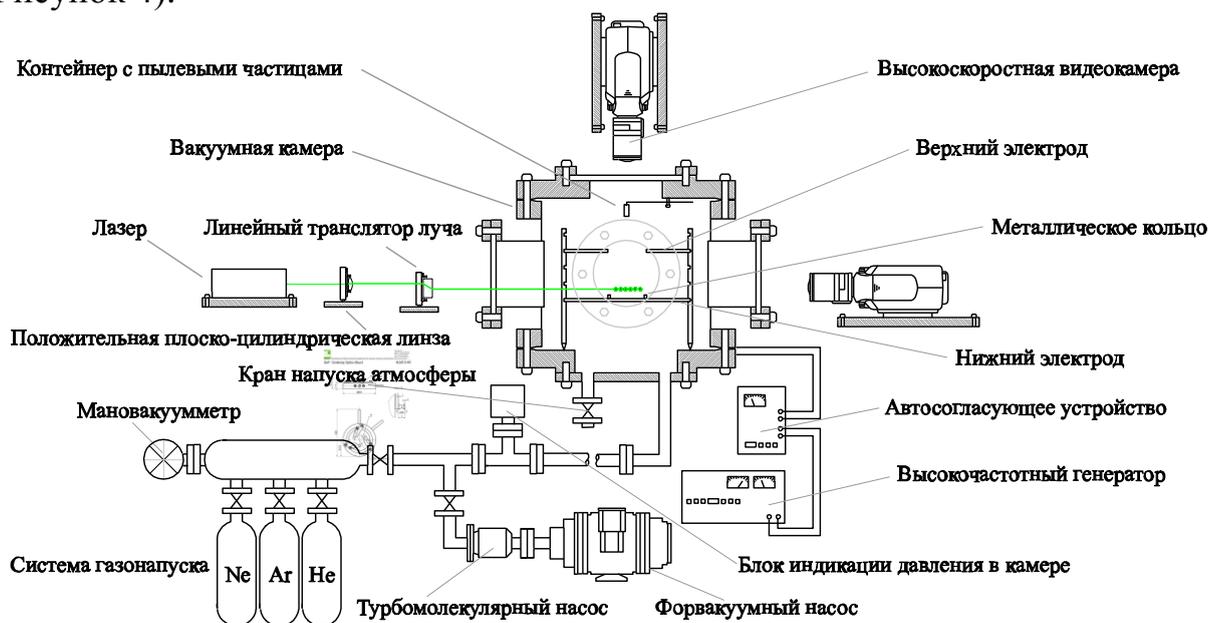


Рис. 4 – Схематическое изображение экспериментальной установки криогенной газоразрядной плазмы, на основе оптического криостата.

Основным элементом экспериментальной установки является газоразрядная вакуумная камера с оптическими окнами и токовводами. Откачка камеры для удаления воздушной атмосферы производится вакуумным постом, представляющим собой последовательно соединенные турбомолекулярный и форвакуумный насосы. После этого вакуумная камера заполняется рабочим газом до давления от сотых до единиц Торр через систему газонапуска. Система газонапуска состоит из контроллера газового потока, который управляет газонапуском; датчика и блока индикации давления, соединенные с баллонами с рабочими газами. Внутри вакуумной камеры для генерации плазмы помещаются два плоских горизонтальных электрода. Для формирования потенциальной ловушки и предотвращения разлета пылевых частиц из плоскости обзора вследствие взаимного отталкивания, на поверхности нижнего электрода устанавливалось металлическое кольцо, диаметр которого может варьироваться в зависимости

задач эксперимента и размера плазменно-пылевой структуры, которую требуется получить в эксперименте. На электроды через согласующее устройство подается напряжение от высокочастотного генератора с несущей частотой генерации 13,56 МГц, в результате чего в вакуумной камере возникает высокочастотный емкостной разряд. Для визуализации пылевых частиц, левитирующих в приэлектродном слое высокочастотного емкостного разряда осуществляется их подсветка лазерным излучением через оптическую схему. Для диагностики плазменно-пылевой системы используются две высокоскоростные камеры, информация с которых передается на персональный компьютер с пакетом специализированных программ для обработки видеоданных. В случае экспериментальных исследований с воздействием лазерного излучения на плазменно-пылевые структуры, как правило, один лазер применяется для подсветки пылевых макрочастиц, а второй используется для внесения возмущений или манипуляции ими.

П. 2.3 посвящен описанию экспериментальных стендов для изучения пылевых систем заряженных частиц в неоднородных магнитных полях. В основе удержания пылевых структур и экспериментального формирования сильно взаимодействующих кулоновских систем лежит возможность левитации диамагнитных тел в неоднородном стационарном магнитном поле.

В **п. 2.3.1** приведено описание экспериментального стенда на основе магнитной ловушки в лабораторных условиях и условиях микрогравитации. Для формирования пылевой структуры из диамагнитных частиц используется экспериментальная установка позволяющая создавать с помощью электромагнитов или постоянных магнитов конфигурации поля, имеющее локальный минимум, так называемую «магнитную яму». При этом диамагнитные частицы выталкиваются в область с меньшим полем и формируют пылевые структуры. Макрочастицы, формирующие кластер в магнитной яме могут быть заряжены при помощи проволочного электрического зонда, вводимого в область левитации частиц. При этом в зависимости от потенциала на зонде, макрочастицы могут приобретать как положительный, так и отрицательный заряд, и формируют кулоновский кластер.

В **п. 2.3.2** автором предложен оригинальный подход к формированию классической кулоновской системы из сверхпроводящих частиц, основанный на хорошо известном эффекте Мейснера вытеснения магнитного поля из области сверхпроводящей фазы и, формально, поведения сверхпроводника как идеального диамагнетика, который выталкивается в область с меньшим магнитным полем. В шахту оптического криостата, описание которого

приводилось в п. 2.1.3, помещалась специальная вставка, расположенная аксиально вдоль вертикальной оси криостата. В нижней части вставки располагалась платформа для фиксации магнитов, формирующих магнитную ловушку. Для предотвращения влияния потоков криогенных жидкостей на положение и динамику исследуемых пылевых кластеров магнитная ловушка окружалась стеклянным цилиндрическим экраном. Зарядка макрочастиц осуществлялась прямым контактным методом при соприкосновении острия электрического зонда с поверхностью макрочастиц. Визуализация пылевых частиц, левитирующих в магнитной ловушке, осуществлялась путем их подсветки лазерным излучением и регистрации посредством высокоскоростных видеокамер через оптические окна криостата.

В п. 2.4 содержится заключение и выводы к Главе 2.

В **третьей главе** представлено описание методов, используемых в работе для анализа результатов диагностических измерений характеристик пылевой плазмы. Глава 3 состоит из пяти частей, включая выводы.

В п. 3.1 приведено описание метода восстановления профиля распределения скоростей пылевых частиц и их кинетической температуры. Наличие информации о дискретных во времени положениях макрочастиц позволяет решать задачу, связанную с определением их траекторий движения. Данная задача сводится к определению положения конкретной макрочастицы на каждом из кадров видеозаписи. Полученные таким образом данные о динамике макрочастиц позволяют найти функцию распределения макрочастиц по скоростям. На основе полученных данных о скоростях всех макрочастиц пылевой системы в каждый момент времени можно получить распределение частиц по скоростям и их среднюю кинетическую энергию. Метод определения кинетической температуры пылевой системы основан на сравнении распределения скоростей макрочастиц с максвеловским распределением и фитированием экспериментальных результатов с кривой аппроксимации.

В п. 3.2 приведено описание метода определения пространственных корреляционных функций плазменно-пылевых структур. Одной из основных функций описывающих структурные характеристики системы макрочастиц является парная (или трансляционная) корреляционная функция, которая показывает усредненное распределение плотности частиц относительно любой частицы в системе. Форма парной корреляционной функции: количество пиков, отношение первого минимума к первому максимуму, значение первого максимума и его положение, ширина первого пика используются в качестве критериев того или иного состояния системы, близости к фазовым переходам.

Для описания структурной характеристики двумерной системы макрочастиц применяется также ориентационная корреляционная функция, которая определяет ориентационный порядок в системе. Одним из важнейших свойств этой функции является то, что для идеальной гексагональной решетки эта функция тождественно равна 1. Для кристаллической фазы функция должна быть постоянна и близка к единице. В классической работе [В. I. Halperin, Phys.Rev.Lett.,1978] было предсказано, что в гексагональной фазе эта функция убывает по степенному, а в жидкостной фазе по экспоненциальному закону. Таким образом, для неидеальных систем пространственная асимптотика данной функции указывает на фазовое состояние этой системы и может сохранять дальний порядок, в то время как дальний трансляционный порядок для нее может отсутствовать.

В п. 3.3 описан метод восстановления параметра неидеальности структур макрочастиц, основанный на интерпретации и применении результатов численного моделирования. Исходя из результатов моделирования, полученных в работе [Vaulina O., Plas. Phys., 2004] о соотношении величины параметра неидеальности и структурных характеристик системы - величины первого максимума и отношения первого максимума к первому минимуму парных корреляционных функций, делается вывод о степени неидеальности реальной экспериментально наблюдаемой системы макрочастиц. Для этого для нее строится парная корреляционная функция, по форме которой восстанавливается параметр неидеальности.

П. 3.4 посвящен описанию метода определения числа топологических дефектов в квазидвумерных структурах макрочастиц. В разделе дается определение дефектов, возникающих в структурах: свободных дисклинаций и дислокации, дислокационной пары. В идеальной гексагональной решетке каждая частица, расположенная в ее узле, будет иметь ровно шесть ближайших соседей. Для нахождения положений точечных дефектов в двумерной решетке применяется триангуляция Делоне, позволяющая построить бонды соединяющие пары ближайших частиц. При этом узел будет являться дефектом при количестве бондов отличных от шести. На основе триангуляции Делоне, строится Диаграмма Вороного путем восстановления серединных перпендикуляров для бондов соединяющих пары ближайших частиц. Количество сторон в ячейках Вороного определяет количество ближайших соседей у частицы и применяется для анализа дефектов структуры.

В п. 3.5 содержится заключение и выводы к Главе 3.

Четвертая глава посвящена экспериментальным результатам и анализу структурных и динамических свойств пылевых систем в плазме тлеющего разряда постоянного тока низкого давления.

Различные внешние воздействия могут использоваться для управления пространственным положением, степенью упорядоченности, а также динамикой плазменно-пылевых структур. В п. 4.1 представлены экспериментальные результаты динамики пылевых структур в тлеющем разряде.

В п. 4.1.1 приведены результаты экспериментальных исследований формирования структур макрочастиц и их динамики в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 2500 Гс. Наблюдалось вращение пылевых структур в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси симметрии разряда. При индукции поля 75 Гс вектор угловой скорости вращения пылевого облака имел направление, противоположное направлению магнитного поля. С ростом индукции магнитного поля через некоторое время вращение замедлялось и затем прекращалось при 500 Гс. В поле 630 Гс зафиксировано вращение пылевой структуры в противоположном направлении, вектор угловой скорости вращения пылевого облака оказывался сонаправленным с вектором магнитного поля (Рисунок 5).

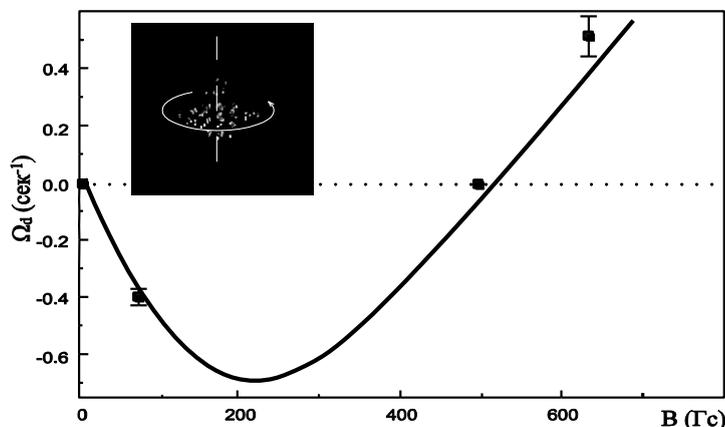


Рис. 5 – Угловая скорость вращения пылевой структуры в зависимости от индукции магнитного поля.

Предложено объяснение изменения направления вращения плазменно-пылевых структур и уход пылевых частиц из приосевой области разряда в пристеночную область в замагниченной газоразрядной плазме. Инверсия вращения плазменно-пылевой структуры с увеличением аксиального магнитного поля объяснена конкуренцией между двумя механизмами. Первый – это вращение пылевых частиц вместе с нейтральным газом, но из-за вихревых токов угловая скорость газа в области расположения пылевой

структуры направлена по часовой стрелке относительно направления магнитного поля. Второй – это вращение пылевых частиц под действием силы ионного увлечения в противоположном направлении. В слабых магнитных полях оба механизма вызывают вращение со скоростями, пропорциональными полю B , но второй механизм преобладает, и вращение пылевых частиц становится направленным против часовой стрелки. По мере увеличения магнитного поля вторая скорость уменьшается за счет замагниченности электронов в плазме и становится обратно пропорциональна B , в этом случае преобладает первый механизм и происходит инверсия вращения. При дальнейшем увеличении B область инверсии диффузионного потока расширяется, исчезает потенциальная ловушка в приосевой области, и пылевая структура разлетается, что наблюдается при $B \approx 700$ Гс. При этом ловушка, как показывают результаты эксперимента, не пропадает совсем, а смещается в периферийную область разряда.

При экспериментальном исследовании плазменно-пылевых структур существует достаточно широкий диапазон параметров тлеющего разряда при которых развиваются низкочастотные пылевые колебания и неустойчивости, приводящие к самовозбуждению линейных и нелинейных волн. В п. 4.1.2 представлен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований пылезвуковых колебаний в тлеющем разряде постоянного тока. Автором приведены экспериментальные результаты наблюдения плазменно-пылевых структур из монодисперсных частиц меламин-формальдегида (МФ) с автоколебаниями в атмосфере инертного газа Ne, при давлении 0.008 Торр и токе разряда в диапазоне 0.5 - 1,3 мА. Отмечено, что понижение тока разряда способствует раскачке автоколебаний, которая выражается в увеличении амплитуды колебания частиц (Рисунок 6).

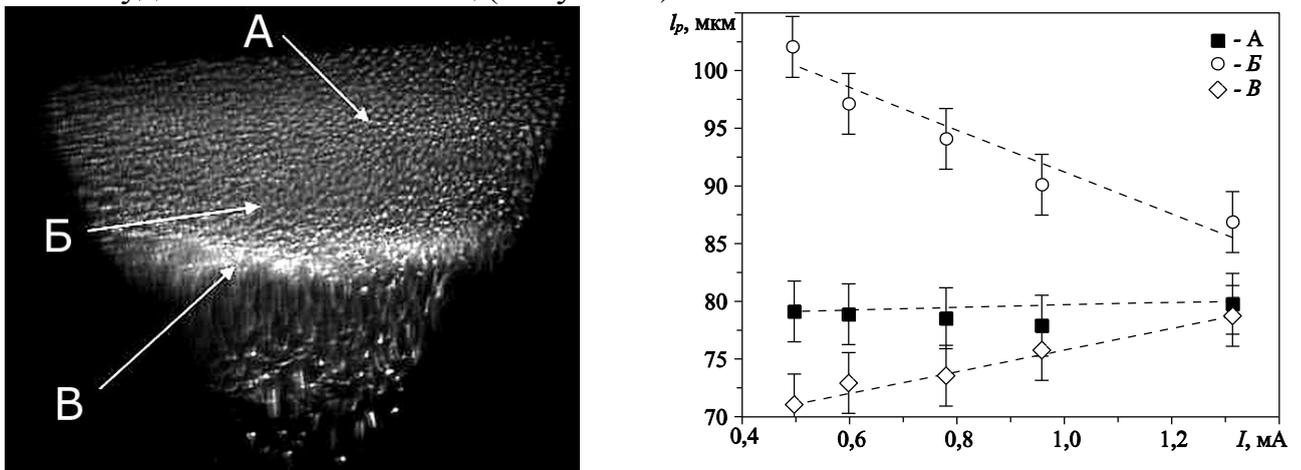


Рис. 6 – Видеокادر плазменно-пылевой структуры с автоколебаниями и средние межчастичные расстояния в разных областях структуры в зависимости от тока разряда.

П. 4.1.3 посвящен результатам экспериментальных исследований формирования вихревых плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде постоянного тока. Системы активных частиц, способных получать энергию из окружающей среды могут демонстрировать различные динамические особенности, включая формирование вихревого движения. В плазменно-пылевой системе подкачка энергии осуществляется за счет взаимодействия с электрическими полями. Заряд пылевой частицы зависит как от времени, так и от положения частицы, что, в конечном счете, приводит к переходу части потенциальной энергии электрического поля в кинетическую энергию частицы. Формирование пылевых структур с вихревым движением наблюдалось в плазме тлеющего разряда в атмосфере неона при давлении $P=0,4$ Торр и токе разряда $I=0,41$ мА. На рисунке 7 представлено пространственное распределение скорости потока заряженных макрочастиц и периода их обращения в зависимости от их радиального расположения в структуре.

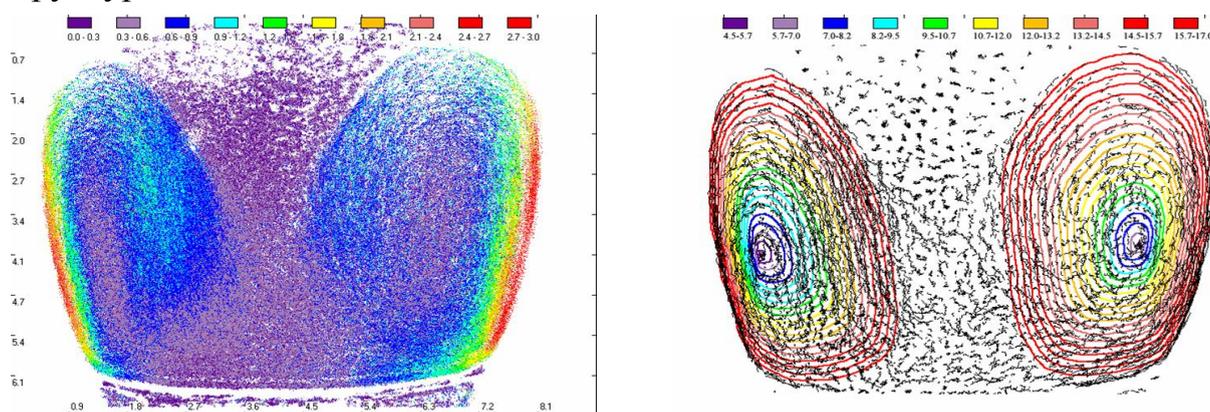


Рис. 7 – Распределение скоростей пылевых частиц и периода обращения макрочастиц от их радиального расположения в вихре.

В разделе рассмотрена теоретическая модель, показывающая, что формирование вихревой структуры может происходить только при наличии градиента заряда, ортогонального неэлектростатической силе [Ваулина О.С., ЖЭТФ, 2000], и в условиях силы тяжести достаточно небольшого изменения их зарядов. Для вихревой структуры, полученной в эксперименте, оценено значение радиуса экранирования $\lambda \approx 0,5$ мм, и градиента заряда, который составил несколько процентов. В качестве иллюстрации вихревого движения плазменно-пылевой жидкости рассмотрена конвективная модель: пылевой вихрь как ячейка Бенара. Число Рэлея Ra , показывающее отношение силы создающей неустойчивость (подъемной силы) к диссипативным силам для плазменно-пылевой жидкости, было оценено как 10^2 , и как раз при таких условиях экспериментально удалось наблюдать вихревые пылевые

структуры.

В п. 4.2 представлены экспериментальные результаты формирования цепочечных пылевых структур в плазме тлеющего разряда низкого давления.

Зачастую в лабораторных экспериментах с плазменно-пылевыми структурами наблюдаются эффекты, связанные с анизотропностью плазмы. В п. 4.2.1 обсуждаются механизмы формирования цепочечных пылевых структур в такой плазме, где ионы имеют направленную скорость по отношению к пылевым частицам. В широком круге теоретических и численных работ в качестве механизма формирования цепочечных структур обсуждается ионная фокусировка. В этих работах аналитически исследована структура кильватерного следа под точечным зарядом в плазме. Полагается, что макрочастицы, формирующие пылевую цепочку, взаимодействуют как с отрицательно заряженными макрочастицами, так и с положительным ионным фокусом. Другой важной особенностью пылевых систем является пространственная сепарация макрочастиц в плазме по размерам - обусловленная зависимостью сил, действующих на макрочастицу, от ее размера. Так при инъекции полидисперсных порошков в газовый разряд расстояние между пылевыми частицами, образующими цепочку, и их размер будут различными. В разделе приведены результаты эксперимента, в котором изучалось формирование цепочечной структуры из монодисперсных макрочастиц меламина-формальдегида диаметром $2.10 \pm 0,05$ мкм. Тлеющий разряд создавался в неоне при давлении буферного газа 0.1 Торр и разрядном токе 1.0 мА. В эксперименте измерялось угловое распределение интенсивности рассеянного света макрочастицами, сформировавшими пылевую цепочку, и решалась обратная задача теории Ми по восстановлению их размера. Таким образом, экспериментально было показано, что цепочка может формироваться частицами и одного размера.

В п. 4.2.2 приведены результаты трехмерной диагностики цепочечной пылевой структуры, сформированной полидисперсными частицами меди. Структура формировалась в плазме тлеющего разряда постоянного тока при давлении неона 0,14 Торр и токе разряда 1,02 мА. В разделе приводятся данные о динамике и структуре пылевой цепочки при воздействии лазерного излучения. В рамках эксперимента при неизменных параметрах газового разряда изменялась мощность лазерного излучения, и в результате действия фотофоретрической силы, наблюдалось увеличение кинетической энергии пылевых частиц, формирующих цепочку. Наблюдалось увеличение горизонтальной составляющей скорости макрочастиц с ростом мощности лазерного излучения, в то же время вертикальная составляющая практически не изменялась. Эти результаты подтверждают экспериментально

наблюдаемый характер хаотизации пылевой структуры, состоящей из набора цепочек. Хаотизация начинается с исчезновения порядка в расположении цепочек друг относительно друга. В процессе кинетического разогрева пылевых структур, состоящих из нескольких цепочек, наблюдался обмен их фрагментами, при этом отмечалось, что расстояния между пылевыми частицами в перемещенном фрагменте могут сохраняться, в то время как межчастичные расстояния в верхней части цепочек изменяются.

В п. 4.2.3 представлены результаты формирования пылевых цепочек при наличии примесей в буферном газе. Кинетические свойства ионного потока играют важную роль в формировании пылевых цепочечных структур в плазме газового разряда. Таким образом, выбором газовой смеси можно менять свойства таких структур. Параметры, которые в первую очередь важны при выборе газовой смеси – это потенциал ионизации, атомный вес и поляризуемость атомов. Кроме того, важную роль играет и процентное соотношение между различными газами. Выбором этих параметров можно обеспечить желаемые характеристики ионного потока. Так разряд в гелии с добавкой незначительного количества тяжелого газа (например, криптона, ксенона) или паров металлов с большим атомным весом позволит получить резкое изменение характеристик ионного потока и следует ожидать, соответственно, значительного изменения свойств пылевых структур в таком разряде. При исследовании формирования плазменно-пылевых структур в смеси He/Kr пылевые частицы, как и в случае чистых газов, могли формировать цепочечные структуры (Рисунок 8).

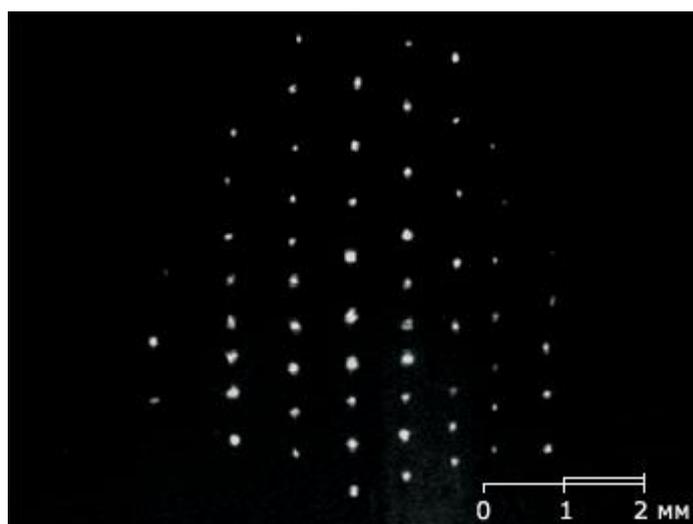


Рис. 8 – Вертикальное сечение цепочечной плазменно-пылевой структуры из сферических макрочастиц диаметром 5 мкм в смеси He и Kr при давлении 0,35 торр, доли Kr в смеси-1% и токе разряда = 0.5 мА.

В ходе эксперимента исследовались пылевые структуры, образованные монодисперсными сферическими частицами меламин-формальдегида плотностью $1,61 \text{ г/см}^3$ и диаметром $5,0 \text{ мкм}$. В экспериментах при содержании Kr в смеси в количестве 1%-10% одной из особенностей формирующихся плазменно-пылевых цепочечных структур по сравнению со структурами в чистых газах являлась значительно более сильная связь между частицами в цепочках. Так в смесях газов колебания частиц в узлах цепочек были практически неразрешимы используемой видеотехникой, в отличие от случая цепочек в чистых инертных газах, где их амплитуда обычно составляла порядка десятых долей межчастичного расстояния. Было проведено экспериментальное исследование зависимости межчастичных расстояний в цепочечных плазменно-пылевых структурах от давления газа и процентного состава газов в смеси – при содержании Kr в количестве 1%-10% в газовой смеси He-Kr. Показано, что при низкой концентрации криптона в Kr-He смеси увеличивается анизотропия взаимодействия макрочастиц, что наиболее сильно проявляется в большой разнице расстояний между макрочастицами в цепочке и между цепочками в структуре при 1% криптона.

П. 4.2.4 посвящен результатам изучения формирования цепочечных пылевых структур в криогенной плазме тлеющего разряда низкого давления. При понижении температуры буферного газа в газоразрядной трубке до температуры жидкого гелия $4,2 \text{ К}$ в результате уменьшения диссипации кинетической энергии макрочастиц наблюдается хаотизация пылевой компоненты. В ходе эксперимента с ростом температуры стенки газоразрядной трубки от $4,2$ до $5,8 \text{ К}$ наблюдалось уменьшение кинетической энергии макрочастиц, формирующих пылевую структуру и стабилизация неустойчивости, проявляющейся в виде колебаний структуры. В результате уменьшения кинетической энергии для части макрочастиц наблюдалась их локализация и, затем, формирование цепочечных структур. Время существования пылевой цепочки при температуре буферного газа $5 - 6 \text{ К}$ составляло доли секунды, при этом длина таких цепочек всего 2-3 макрочастицы. С ростом температуры наблюдалось увеличение как времени существования цепочек, так и их длины.

В п. 4.3 содержится заключение и выводы к Главе 4.

В Пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований и анализ динамических и структурных свойств пылевых образований в плазме высокочастотного емкостного разряда в лабораторных условиях. В отличие от плазмы тлеющего разряда постоянного тока в высокочастотном емкостном разряде пылевые структуры формируются в

приэлектродном слое и носят преимущественно квазидвумерный характер.

В п. 5.1 анализируются экспериментальные результаты формирования пылевых течений в плазменно-пылевой структуре в приэлектродной области ВЧ разряда. В экспериментах в качестве атмосферы использовалось два типа буферного газа: аргон и воздух при давлении в диапазоне 0,018 - 0,055 Торр. Эксперимент проводился при неизменных значениях ВЧ мощности разряда $W_{rf} = 12,5$ Вт. Для кинетического разогрева и подсветки макрочастиц в пылевой структуре использовался плоский пучок аргонового лазера с длиной волны 514 нм. Методика кинетического разогрева заключалась в использовании пылевых макрочастиц с поглощающей излучение металлической оболочкой, при воздействии лазерного излучения на которые, в результате возникновения фотофоретической силы, наблюдалось увеличение их кинетической энергии хаотического движения. Для формирования течения в пылевой структуре использовался второй лазер с длиной волны 532 нм. Формирование течения в пылевой структуре, сформированной из макрочастиц меламин-формальдегида, носило пороговый характер. При мощности продавливающего лазерного излучения ниже критического значения W_k наблюдалась деформация структуры, однако течение не наблюдалось. При дальнейшем росте мощности лазерного излучения наблюдалось формирование направленного движения пылевых частиц в области воздействия лазерного пучка. Экспериментально обнаружено, что значение мощности лазерного излучения W_k , при котором наблюдается формирование пылевого течения, зависит от степени коррелированности плазменно-пылевой системы. Так с ростом параметра неидеальности Γ^* наблюдалось уменьшение порогового значения W_k . В плазменно-пылевых структурах, сформированных макрочастицами с медным покрытием, варьирование мощности продавливающего лазера приводило к кинетическому разогреву пылевой структуры сперва в области лазерного воздействия, и в дальнейшем в периферийных областях структуры. Визуально выраженного канала течения в структуре не наблюдалось. Однако распределение скоростей макрочастиц при различных значениях мощности продавливающего лазера демонстрировало рост составляющей скорости, направленной вдоль пучка.

Особый интерес, как с теоретической, так и с практической точки зрения, вызывают переходы в квазидвумерных системах, поскольку они могут отличаться от фазового перехода «твердое тело – жидкость» трехмерной системы. П. 5.2 посвящен результатам изучения фазовых переходов в квазидвумерных плазменно-пылевых структурах в ВЧ разряде низкого давления. В экспериментальной работе автора впервые показано, что фазовый

переход в квазидвумерной пылевой структуре носит двухстадийный характер и идет согласно теории Березинского-Костерлица-Таулесса с образованием промежуточной, так называемой, гексатической фазы. Анализ экспериментальных данных показал, что в кристаллической структуре ориентационная и трансляционная симметрия имеют дальний порядок. При переходе в гексатическую фазу сохраняется ориентационный порядок, но при этом нарушается трансляционный дальний порядок. В жидкостной фазе как ориентационный, так и трансляционный порядок имеют короткодействующий характер. Так для двумерных неидеальных систем пространственное убывание пиков парной корреляционной функции в идеальном кристалле описывается степенной функцией $g \propto (r/r_p)^{-\eta}$ при $\eta < 1/3$, в гексатической фазе и жидкости - экспоненциальной зависимостью $g \propto \exp(-\mu r/r_p)$ при $\mu = \mu_h \equiv const$ и $\mu > \mu_h$, соответственно. Для ориентационной же корреляционной функции характерна степенная асимптотика в гексатической фазе и экспоненциальная – в жидкостной. На рисунке 9 приведены парные $g_2(r/r_p)$ и ориентационные $g_6(r/r_p)$ корреляционные функции, полученные в экспериментах при различных значениях параметра неидеальности Γ^* вблизи фазовых переходов.

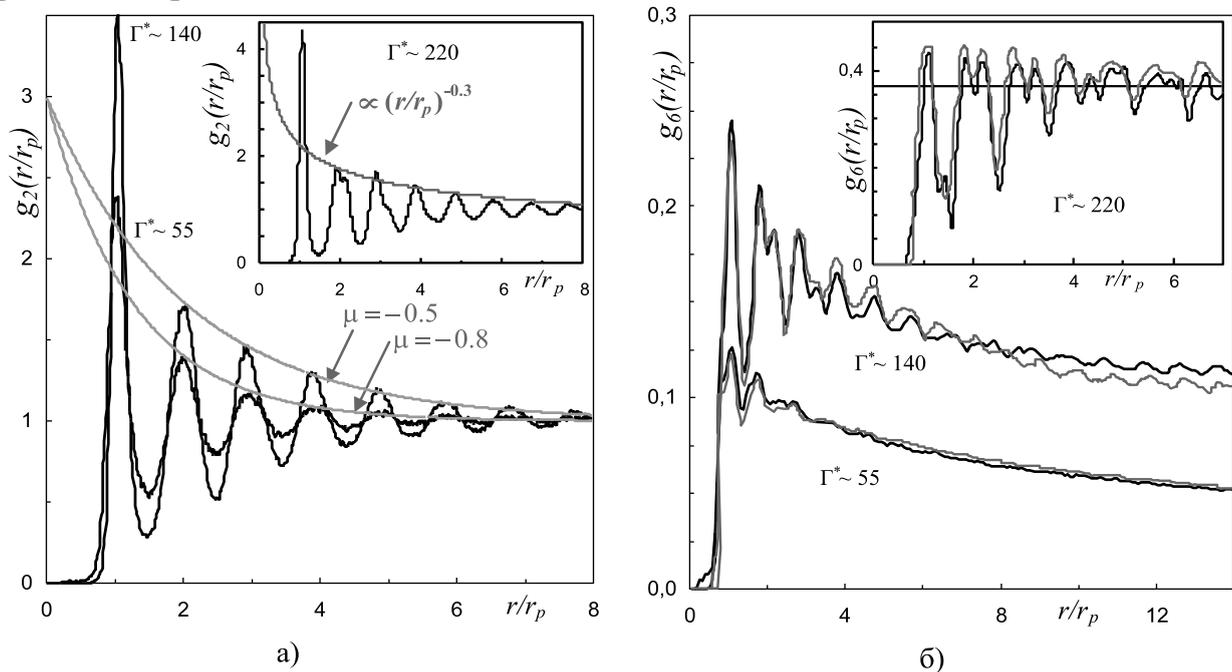


Рис. 9 – Парные и ориентационные корреляционные функции (черные линии) при различных параметрах неидеальности Γ^* для кристаллической ($\Gamma^* = 220$), гексатической ($\Gamma^* = 140$) и жидкостной фазы ($\Gamma^* = 55$), соответственно. Серые кривые: а - аппроксимации пиков парных корреляционных функций $g_2(r/r_p)$, б - результаты численного моделирования функций $g_6(r/r_p)$ с параметрами, близкими к эксперименту.

На рисунке 10 видно, что асимптотика кривых для жидкостной плазменно-пылевой структуры с параметром неидеальности в диапазоне $\Gamma^* = 10 - 85$, отличается от асимптотики, теоретически предсказанной, для гексатической фазы ($\eta < 1/4$). Таким образом, показано что фаза, соответствующая параметрам неидеальности Γ^* в интервале от 100 до 140 является гексатической, причем при переходе системы в изотропную жидкостную фазу (в точке $\Gamma^* \approx 100$) наблюдается экспоненциальное убывание как парной функции $g(r)$, так и функции $g_6(r)$.

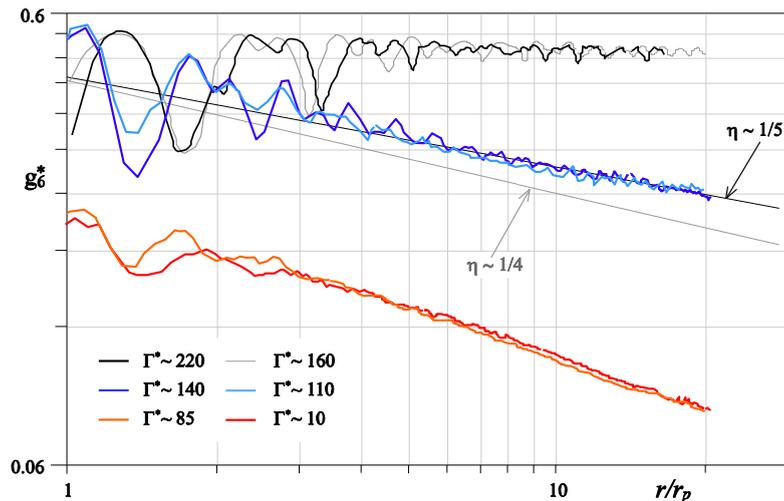


Рис. 10 – Ориентационные корреляционные функции $g_6^* = 100g_6(r/r_p)/N_6$ монослойной пылевой структуры, нормированные на число частиц N_6 с 6-тью ближайшими соседями (в % отношении) при различных значениях параметра неидеальности $\Gamma^* = 10, 85, 110, 140, 160, 220$. Прямыми линиями показаны аппроксимации экспериментальных данных функцией $\sim (r/r_p)^{-\eta}$ при $\eta = 1/5$ и при $\eta = 1/4$ (предел для КТННУ теории).

Анализ асимптотического поведения корреляционных функций позволяет различать разные фазовые состояния двумерных неидеальных систем, но он становится менее информативным при рассмотрении асимптотики в области фазовых переходов, где возрастает погрешность определения характеристик в непосредственной близости к критической точке фазового перехода. Чтобы избежать неоднозначности анализа, связанного с флуктуациями пространственных параметров, и краевыми эффектами, возникающими из-за конечного размера структуры и времени усреднения, а также, чтобы аккуратно определить точки фазовых переходов, был использован метод, описанный в работе [A.G. Yodh, Physical Review E, 2008]. Он основан на анализе флуктуаций ориентационного и трансляционного

параметров порядка с помощью расчета функции дисперсии соответствующих параметров порядка

$$\chi_{\alpha L} = L^2 (\langle |\Psi_{\alpha}^2| \rangle - \langle |\Psi_{\alpha}| \rangle^2).$$

где L – размер рассматриваемой системы, индекс $\alpha = 6, T$ обозначает ориентационный и трансляционный порядок соответственно, а Ψ_{α} – глобальный параметр порядка, равный усредненному локальному параметру порядка $\Psi_{\alpha,j}$ по всем N частицам j , взятым в квадратной области размером $L \times L$, выраженном в средних межчастичных расстояниях. Аналогично вводится локальный параметр трансляционного порядка:

$$\Psi_{T,j} = \exp(i\mathbf{G}\mathbf{r}_j),$$

где \mathbf{r}_j – радиус-вектор для j -той частицы, а \mathbf{G} – первичный вектор обратной решетки, определяемый по пику двумерного структурного фактора $s(\mathbf{k}_{xy})$ для каждого значения температуры. На рисунке 11 представлен график зависимости дисперсий трансляционного, χ_T , и ориентационного, χ_6 , параметров порядка, от эффективного параметра неидеальности Γ^* . Скачок функций χ_T и χ_6 явно указывает на две точки фазовых переходов при $\Gamma^* \sim 100$ и $\Gamma^* \sim 160$ соответственно, что показано вертикальными пунктирными линиями.

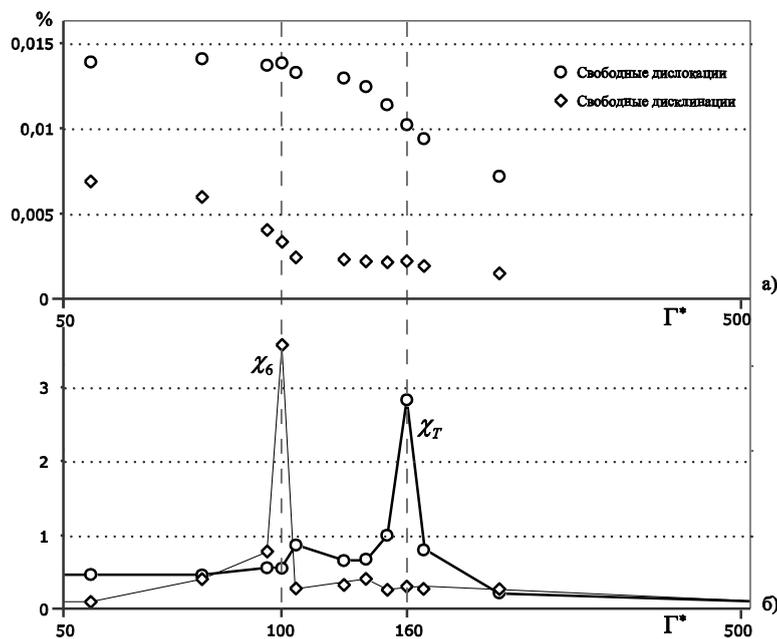


Рис. 11 – (а) Концентрация свободных дислокаций (круги) и свободных дисклинаций (ромбы); (б) дисперсия трансляционного, χ_T , и ориентационного, χ_6 , параметров порядка, в зависимости от эффективного параметра неидеальности Γ^* . Всплеск функций χ_T и χ_6 явно указывает на две точки фазовых переходов при $\Gamma^* \sim 100$ и $\Gamma^* \sim 160$ соответственно (вертикальные пунктирные линии).

Таким образом, с помощью анализа асимптотики корреляционных функций, параметра порядка, а также анализа характера возникающих дефектов и изменения их взаимной концентрации было показано, что процесс плавления происходит с образованием промежуточной гексатической фазы. Это полностью согласуется с теорией Березинского-Костерлица-Таулесса и результатами численного моделирования.

Также в разделе приведены результаты экспериментального исследования кинетики структурного фазового перехода для малых двумерных систем, состоящих из 7-61 частиц. Обнаружено, что сценарий фазового перехода отличается от сценария плавления для протяженных квазидвумерных систем. При лазерном разогреве кластеров наблюдалось увеличение кинетической температуры макрочастиц. При малых мощностях лазерного излучения ($\sim 0,03$ Вт) кластеры были стабильны, и частицы двигались в окрестности своего положения равновесия. При дальнейшем увеличении мощности лазера центральная частица увеличивала область своего теплового движения. Кинетическая энергия пылевых частиц во второй и следующих оболочках также возрастала, однако для них превалировала угловая составляющая движения над радиальной. Частицы, распределенные по оболочкам, продолжали свое движение в этих оболочках до определенной мощности лазерного излучения, после чего угловая составляющая движения пылевых частиц становилась сопоставимой с радиальной и частицы начинали «перепрыгивать» между оболочками.

В п. 5.3 содержится заключение и выводы к Главе 5.

В Шестой главе представлены результаты исследования пространственно-упорядоченных структур заряженных макрочастиц в неоднородных магнитных полях.

В п. 6.1 приведен краткий обзор постановки лабораторного эксперимента, предложенного в работе [S.F. Savin et. al., EPL, 2009] по формированию кулоновского кластера диамагнитных частиц в неоднородном магнитном поле. В отличие от плазменно-пылевых систем, описанная методика формирования структур, состоящих из заряженных диамагнитных частиц, позволяет проводить эксперименты как в неионизованном газе, так и в вакууме. Однако для создания и изучения коллективных явлений в протяженных трёхмерных структурах, содержащих десятки тысяч диамагнитных частиц, в наземных условиях необходимы электромагниты, создающие поля B более 10 Т с градиентами ~ 10 Т/см. В то же время в условиях невесомости для формирования протяженных структур заряженных

диамагнитных частиц достаточны значительно меньшие поля $B \sim 0.1$ Т с градиентами ~ 0.1 Т/см.

В п. 6.2 представлено описание космического эксперимента «Кулоновский кристалл» на Международной космической станции и результаты исследования динамики заряженных макрочастиц и образования структур в условиях микрогравитации. Описаны осцилляции ансамбля частиц в результате внешнего возмущения, создаваемого изменением тока в катушках электромагнита. Описан экспериментально наблюдаемый разлет пылевого кластера из $\sim 10^3$ частиц при подаче на заряжающий электрод потенциала 150 вольт, когда силы кулоновского отталкивания между частицами превышают не только силы удержания магнитной ловушки, но и силы автоадгезии. Представлены результаты образования анизотропных структур из диамагнитных макрочастиц в магнитной ловушке при наложении неоднородного электрического поля в условиях микрогравитации (Рисунок 12).

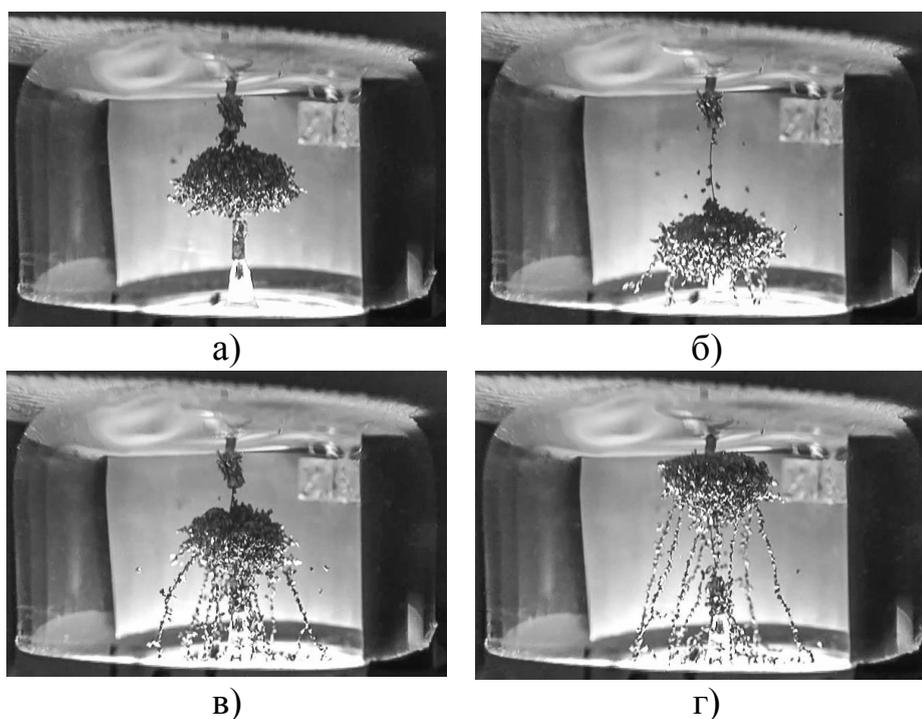


Рис. 12 – Формирование цепочечных структур графитовыми частицами диаметром 300 мкм.

Отмечено, что находясь в неоднородном электрическом поле, проводящие частицы графита, в результате поляризации, могут формировать устойчивые линейные структуры. При этом пространственное изменение положения магнитной «ямы» не приводит к разрушению образовавшихся цепочек.

В п. 6.3 приводятся экспериментальные результаты по формированию кулоновских структур сверхпроводящих частиц в статических магнитных ловушках при криогенных температурах. Для формирования ансамбля

заряженных частиц, которые могут нести заряд как положительного, так и отрицательного знака, в нашей была предложена методика удержания частиц, основанная на хорошо известном эффекте Мейснера вытеснения магнитного поля из области сверхпроводящей фазы и магнитной левитации сверхпроводников. Представлены результаты наблюдения формирования пылевых структур в статических магнитных ловушках в жидком азоте и его парах. Приведены результаты экспериментального наблюдения ансамблей состоящих из $\sim 10^3$ заряженных макрочастиц высокотемпературной сверхпроводящей иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_7$ диаметром 30 - 60 мкм, левитирующих в статической магнитной ловушке (Рисунок 13) в жидком азоте и в его парах.

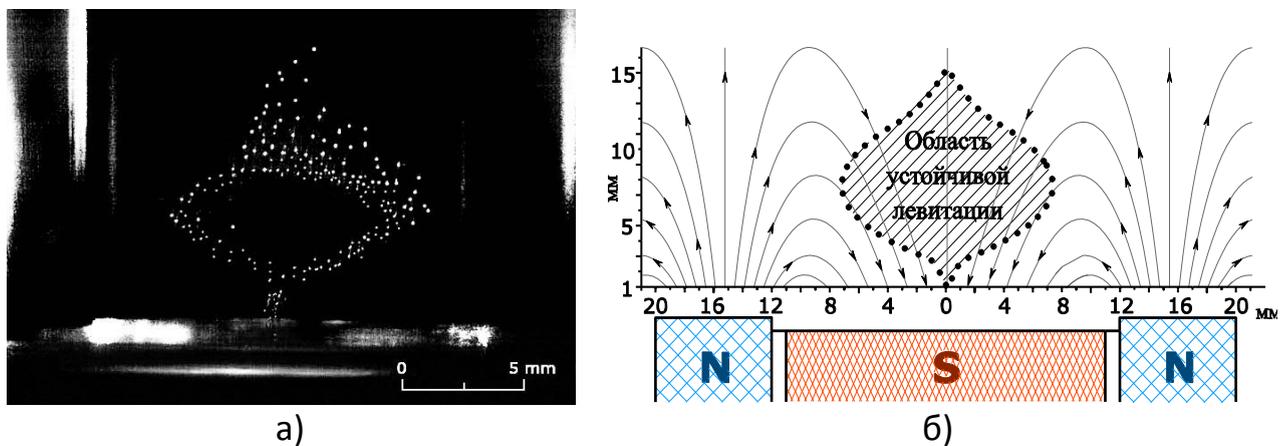


Рис. 13 – Структура заряженных сверхпроводящих макрочастиц керамики $YBa_2Cu_3O_7$ (а), и силовые линии магнитного поля (б) с областью устойчивой левитации кулоновских структур в магнитной ловушке.

Среднее межчастичное расстояние в структуре составило 475 мкм. Получены оценки значений параметра неидеальности Γ ($\sim 10^3$) и параметра Линдемана (~ 0.03), характерные для сильнокоррелированных кристаллических или стеклоподобных структур. Представлены экспериментальные результаты динамики активных заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках при лазерном воздействии.

В п. 6.4 содержится заключение и выводы к Главе 4.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. Разработан, создан и отлажен комплекс из экспериментальных стандов для изучения структур макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов в составе:

- Стенд для изучения пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока при различных внешних воздействиях: при криогенных температурах,

лазерном воздействии, воздействии внешних магнитных полей.

- Стенд для изучения пылевой плазмы емкостного высокочастотного разряда низкого давления, в т.ч. при лазерном воздействии.

- Стенд для изучения пылевых систем заряженных макрочастиц в неоднородных магнитных полях.

Принцип действия экспериментальных стендов основан на формировании электростатической или магнитной ловушек для макрочастиц, их инжекции в область наблюдения, визуализации и дальнейшего анализа с использованием оригинальных программных средств.

2. Представлены полученные нами результаты экспериментальных исследований формирования структур макрочастиц и их динамики в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 2500 Гс. Наблюдалось вращение пылевых структур в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси симметрии разряда. Предложено объяснение изменения направления вращения плазменно-пылевых структур и уход пылевых частиц из приосевой области разряда в пристеночную область в замагниченной газоразрядной плазме. Инверсия вращения плазменно-пылевой структуры с увеличением аксиального магнитного поля объяснена конкуренцией между двумя механизмами: вращением пылевых частиц вместе с нейтральным газом; и вращением пылевых частиц под действием силы ионного увлечения в противоположном направлении. При дальнейшем увеличении B область инверсии диффузионного потока расширяется, исчезает потенциальная ловушка в приосевой области, и пылевая структура разлетается, что наблюдается при $B \approx 700$ Гс. При этом ловушка, как показывают результаты эксперимента, не пропадает совсем, а смещается в периферийную область разряда.

3. Представлены полученные нами результаты экспериментальных исследований образования и эволюции пылевых структур в плазме криогенного разряда постоянного тока в атмосфере инертного газа (гелия) при изменении температуры нейтрального газа $\sim 4,2 - 10$ К. Изучено формирование пылевых облаков в стоячих стратах газового разряда в атмосфере гелия при криогенных температурах. Исследовано влияние температуры буферного газа и параметров разряда на количество и размеры удерживаемых пылевых частиц, на структурные и динамические свойства пылевых образований. Обнаружено, что при увеличении температуры буферного газа наблюдается уменьшение кинетической энергии отдельных частиц, из которых формируются пылевые цепочки. Путем обработки видеоданных получены профили распределения пылевых частиц по их скоростям и сделаны оценки кинетической температуры для пылевых частиц

двух сортов: совершающих быстрое движение по всей области ловушки (страты) и формирующих цепочечные структуры.

4. Исследованы и проанализированы динамические и структурные свойства пылевых образований в плазме тлеющего разряда постоянного тока в лабораторных условиях при комнатной температуре. Рассмотрены динамические особенности пылевых структур, такие как волны и вихри. Предложена методика диагностики пылевых структур и восстановления информации о пространственном положении макрочастиц, траекторий и скорости их движения на основе метода бинокулярного зрения. Получены зависимости скоростей макрочастиц от их радиального расположения в вихре. Рассмотрена теоретическая модель, показывающая, что формирование вихревой структуры может происходить при наличии градиента заряда, ортогонального неэлектростатической силе, и что в лабораторных условиях достаточно небольшого изменения заряда. Для экспериментально полученной вихревой структуры приведены оценки значения радиуса экранирования $\lambda \approx 0,5$ мм и градиента заряда, который составил несколько процентов. Рассмотрена конвективная модель пылевого вихря как ячейки Бенара. Число Рэлея, показывающее отношение силы, создающей неустойчивость, к диссипативным силам для плазменно-пылевой жидкости, было оценено как 10^2 , и именно при этих условиях удалось наблюдать вихревые пылевые структуры экспериментально.

5. Представлена методика кинетического разогрева пылевых макрочастиц на основе фотофореза в плазме газового разряда при воздействии лазерного излучения. Изучен эффект воздействия лазерного излучения на степень упорядоченности пылевой структуры, плавление пылевого кристалла при воздействии лазерного излучения. Получены результаты экспериментальных исследований формирования структур макрочастиц с пылевым течением в плазме емкостного высокочастотного разряда низкого давления при воздействии лазерного излучения и выполнен их анализ.

6. Экспериментально был подтвержден двухстадийный характер процесса плавления для квазидвумерных плазменно-пылевых систем макрочастиц в плазме емкостного высокочастотного разряда. С помощью анализа асимптотики корреляционных функций, а также анализа характера возникающих дефектов и изменения их взаимной концентрации было показано, что процесс плавления происходит с образованием промежуточной гексатической фазы. Это полностью согласуется с теорией Березинского-Костерлица-Таулесса и результатами численного моделирования.

7. Представлено описание космического эксперимента «Кулоновский кристалл» на Международной космической станции и его результаты

исследования динамики заряженных макрочастиц и образования анизотропных (цепочечных) структур в условиях микрогравитации.

8. Предложена методика удержания пылевых макрочастиц на основе эффекта Мейснера - вытеснения магнитного поля из области сверхпроводящей фазы и магнитной левитации сверхпроводников. Исследовано формирование кулоновских структур из сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в жидком азоте и его парах. Приведены результаты экспериментального наблюдения ансамблей состоящих из $\sim 10^3$ заряженных макрочастиц высокотемпературной сверхпроводящей иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_7$, диаметром 30 - 60 мкм, левитирующих в статической магнитной ловушке. Среднее межчастичное расстояние составило $\sim 0,5$ мм. Представлены экспериментальные данные о динамике активных заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках при лазерном воздействии, получены оценки значений параметра неидеальности $\Gamma \sim 10^3$ и параметра Линдемана ~ 0.03 , характерные для сильнокоррелированных кристаллических или стеклоподобных структур.

Основные результаты диссертации представлены в 121 печатной работе, включая 1 патент и 25 статей в рецензируемых ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации докторских диссертаций:

1. Болтнев Р.Е., Васильев М.М., Кононов Е.А., Петров О.Ф., Явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме: формирование пылевого облака наночастиц и плазменно-пылевых волн // ЖЭТФ, Т.153, Вып. 4, стр. 679–684, 2018.

2. G.I. Sukhinin, A.V. Fedoseev, M.V. Salnikov, A. Rostom, M.M. Vasiliev and O.F. Petrov, Plasma anisotropy around a dust particle placed in an external electric field // PHYSICAL REVIEW E, V.95, pp. 063207, 2017.

3. Мясников М.И., Дьячков Л.Г., Петров О.Ф., Васильев М.М., Фортков В.Е., Савин С.Ф., Серова Е.О., Кулоновский разлет диамагнитных пылевых частиц в антипробкотронной магнитной ловушке в условиях микрогравитации // ЖЭТФ, Т. 151, Вып. 2, стр. 372–378, 2017.

4. T.S. Ramazanov, L.G. D'yachkov, K.N. Dzhumagulova, M.T. Gabdullin, M.K. Dosbolayev, Y.A. Ussenov, Zh.A. Moldabekov, O.F. Petrov, M.M. Vasiliev, M.I. Myasnikov, V.E. Fortov, S.F. Savin, Zh.Sh. Zhantayev, A.A. Aimbetov, Experimental investigations of strongly coupled Coulomb systems of diamagnetic dust particles in a magnetic trap under microgravity conditions // EPL, V. 116, pp. 45001, 2016.

5. Antipov S.N., Schepers L.P.T., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Dynamic Behavior of Polydisperse Dust System in Cryogenic Gas Discharge Complex Plasmas // Contributions to Plasma Physics, V.56, I. 3-4, pp. 296-301, 2016.

6. К.Г. Косс, О.Ф. Петров, М.И. Мясников, К.Б. Стаценко, М.М.

Васильев, Фазовые переходы и динамическая энтропия в малых двумерных системах: эксперимент и численное моделирование // ЖЭТФ, Том 123, Вып.1, стр. 98-107, 2016.

7. О.Ф. Петров, М.М. Васильев, Й. Тун, К.Б. Стаценко, О.С. Ваулина, Е.В. Васильева, В.Е. Фортов, Двумерный фазовый переход в сильнонеидеальной пылевой плазме // ЖЭТФ, Том 147, вып.2, стр. 372-378, 2015.

8. М. М. Васильев, О. Ф. Петров, К. Б. Стаценко, Кулоновские структуры из заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках при криогенных температурах // Письма в ЖЭТФ, Т.102, Вып.11, стр. 881–885, 2015.

9. S.N. Antipov, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, Dust structures in cryogenic dc discharge: Some suggestions for future research // J. Phys. Conf. Ser, V.653, p. 012134, 2015.

10. O.F. Petrov, M.M. Vasiliev, O.S. Vaulina, Stacenko K.B., Vasilieva E.V., Lisin E.A., Tun Y., Fortov V.E., Solid-hexatic-liquid transition in a two-dimensional system of charged dust particles // EPL, V. 111 (4), pp. 45002, 2015.

11. X.G. Koss, O.F. Petrov, M.I. Myasnikov, K.B. Statsenko and M.M. Vasiliev, Melting of small clusters with Yukawa interaction potential research // J. Phys. Conf. Ser, V.653, p. 012135, 2015.

12. Vasiliev M.M., Petrov O.F., Statsenko K.B., Clusters of the Charged Dust Particles in a Magnetic Trap at Cryogenic Temperatures // J. Phys. Conf. Ser, V.653, p.012133, 2015.

13. S.N. Antipov, M.M. Vasiliev, M.M. Alyapyshev, O.F. Petrov, V.E. Fortov, Dense dust structures in cryogenic complex plasma // J. Phys. Conf. Ser, V.511, p. 012008, 2014.

14. Петров О.Ф., Ваулина О.С., Васильев М.М., Е.А. Лисин, М.И. Мясников, С.Н. Антипов, В.М. Чепелев, К.Г. Косс, Й. Тун и В.Е.Фортов, Кулоновские системы сильновзаимодействующих пылевых частиц: эксперименты в лаборатории и условиях микрогравитации // Автометрия, Т.5, стр. 19-36, 2014.

15. O. F. Petrov, M. I. Myasnikov, L. G. D'yachkov, M. M. Vasiliev, Fortov V.E., Savin S.F., Kaleri A.Y., Borisenko A.I., Morfill G.E., Coulomb clusters of dust particles in a cusp magnetic trap under microgravity conditions // PHYSICAL REVIEW E, V.86, p.036404, 2012.

16. Antipov S. N., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Non-Ideal Dust Structures in Cryogenic Complex Plasmas // Contributions to Plasma Physics, V.52, I.3, pp. 203-206, 2012.

17. Antipov S.N., Vasiliev M.M., Alyapyshev M.M, Petrov O. F., Fortov V.E., Compact Globular Structures in Cryogenic Complex Plasmas // Dusty/complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research, V.1397, I.1, p. 295, 2011.

18. С. Ф. Савин, Л. Г. Дьячков, М. И. Мясников, О. Ф. Петров, М. М.

Васильев, Калери А.Ю., Борисенко А.И., Морфилл Г.Е., Кулоновский ансамбль заряженных диамагнитных макрочастиц в неоднородном магнитном поле в условиях микрогравитации // Письма в ЖЭТФ, Т.94, Вып. 7, стр. 548-552, 2011.

19. С.Н. Антипов, М.М. Васильев, С.А. Майоров, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов, Плазменно-пылевые структуры в He-Kr тлеющем разряде постоянного тока // ЖЭТФ, Т.139, Вып. 3, стр. 554-567, 2011.

20. M.M. Vasiliev, L.G. D'yachkov, S.N. Antipov, R. Huijink, O. F. Petrov and V. E. Fortov Dynamics of dust structures in a dc discharge under action of axial magnetic field // EPL, V.93, p. 15001, 2011.

21. Vasiliev M.M., Alyapyshev M.M., Antipov S.N., Petrov O. F., Fortov V.E., Evolution of Dusty Plasma Instabilities in Cryogenic DC Discharge, Dusty/complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research, V.1397, I.1, p. 399, 2011.

22. S.F. Savin, L.G. D'yachkov, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, V.E. Fortov, Clusters of charged diamagnetic particles levitating in nonuniform magnetic field // EPL, V.88, p.64002, 2009.

23. С.Ф. Савин, Л.Г. Дьячков, М.М. Васильев, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов, Формирование кулоновских кластеров заряженными диамагнитными макрочастицами в неоднородном магнитном поле // Письма в ЖТФ, Т.35, Вып. 24, стр. 42-51, 2009.

24. Васильев М.М., Дьячков Л.Г., Антипов С.Н., Петров О.Ф., Фортов В.Е., Плазменно-пылевые структуры в магнитных полях в разряде постоянного тока // Письма в ЖЭТФ, Т.86, Вып. 5-6, стр. 414-419, 2007.

25. Vasiliev M.M., Antipov S.N., Petrov O.F., Large-scale vortices in DC glow discharge dusty plasmas // Journal of Physics A: Mathematical and General, V.39, p.4539-4543, 2006.

Ключевые публикации в трудах конференций:

- Antipov S.N., Fortov V.E., Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M., Levchenko V.D., Vortices in DC discharge dusty plasmas: one mechanism and 3D diagnostics // EPS 2006 - Europhysics Conference Abstracts, pp.2426-2429, 2006.

- Стаценко К.Б., Васильев М.М., Антипов С.Н., Левченко В.Д., Петров О.Ф., Вихревые пылевые структуры в стратах тлеющего разряда постоянного тока: трехмерная диагностика и конвективная модель // Научно-координационная сессия "Исследования неидеальной плазмы", стр. 38, 2006.

- М.М. Васильев, С.Н. Антипов, К.Б. Стаценко, Ю.В. Хрусталева, В.Д. Левченко, О.Ф. Петров, Трехмерная диагностика плазменно-пылевых структур // Сборник статей Физика экстремальных состояний вещества, стр. 302-305, 2007.

- Борисенко А.М., Калери А.Ю., Марков А.В., Савин С.Ф., Чурило КВ., Васильев М.М., Мясников М.И., Петров О.Ф., Фортов В.Е., Емельянов Г.А., Левтов В.Л., Романов ВВ. Космический эксперимент «Кулоновский кристалл»

на МКС // В сб. «Космический форум 2011, 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина», Звёздный городок, 2011.

Патент:

- Антипов С.Н., Васильев М.М., Быхало И.Б., Петров О.Ф., Болтнев Р.Е., Крушинская И.Н., Пельменёв А.А., Реверсивный термомеханический насос для сверхтекучего гелия // Патент RU 2 521 520 С1 от 27.06.2014.

ВАСИЛЬЕВ Михаил Михайлович

**ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР
ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОЧАСТИЦ: МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Автореферат

Подписано в печать 21.03.18

Формат 60x84/16

Печать офсетная

Уч. – изд.л. 2,0

Усл.-печ.л. 2,0

Тираж 130 экз.

Заказ № 61

Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2