

«УТВЕРЖДАЮ»

ВРИО директора Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



/ Гарнов С.В./

« 31 » мая 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Васильева Михаила Михайловича «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертационная работа М.М. Васильева посвящена экспериментальному исследованию эволюции открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц в плазме газовых разрядов и неоднородных магнитных полях. Особое внимание в работе уделено изучению динамических и структурных характеристик, механизмов и условий формирования сильнокоррелированных структур заряженных макрочастиц. В работе описаны экспериментальные стенды для удержания и диагностики ансамблей макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов; результаты экспериментальных исследований динамических и структурных особенностей пылевых структур в широком диапазоне параметров газового разряда и магнитных ловушек; анализ экспериментальных наблюдений поведения макрочастиц в плазме; а также механизмы, объясняющие наблюдаемые в экспериментах явления.

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. В низкотемпературной плазме в силу различных процессов часто формируются аэрозольные



макрочастицы, несущие на себе значительный электрический заряд. Подобные ансамбли оказываются сильно взаимодействующими и их изучению в последнее время уделяется значительное внимание. Исследования ансамблей макрочастиц имеют как важное фундаментальное значение, так и представляют значительный интерес с точки зрения различных приложений. Все вышеуказанное определяет **актуальность данной работы.**

**Структура диссертационной работы.** Диссертационная работа М.М. Васильева 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.

Во **Введении** дается обоснование актуальности темы диссертации, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию методов диагностики и определению параметров структур макрочастиц в газоразрядной плазме. 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 описаны использованные методы диагностики, основанные как на технике визуализации макрочастиц, так и на непосредственном измерении их характеристик. Описан метод трехмерной диагностики на основе принципа бинокулярного зрения, позволяющий восстанавливать в каждый момент времени информацию о трех координатах пылевых макрочастиц. Для его реализации был разработан диагностический комплекс, состоящий из двух синхронизированных видеокамер, расположенных под углом друг к другу. Таким образом определяются пары видеоизображений, относящихся к одной и той же частице, в результате чего восстанавливаются их координаты.

Во **второй главе** представлено описание экспериментальных и диагностических комплексов для изучения кулоновских систем макрочастиц в газовых разрядах низкого давления и магнитных ловушках различного типа, разработанных и использованных в работе 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. Приводится описание стенда для изучения пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока при различных внешних воздействиях: при криогенных температурах, лазерном воздействии, воздействии внешних магнитных полей.



Описан стенд для изучения пылевой плазмы емкостного высокочастотного разряда низкого давления, в т.ч. при лазерном воздействии. Разработан 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.

В **третьей главе** описаны методы, используемые в работе для анализа результатов диагностических измерений характеристик пылевой плазмы. Описан метод восстановления профиля распределения скоростей пылевых частиц и их кинетической температуры. На основе информации о дискретных положениях макрочастиц решается задача, связанная с определением их положения на каждом из кадров видеозаписи и, соответственно, траекторий движения и функций распределения макрочастиц по скоростям. Приведено описание метода определения пространственных корреляционных функций плазменно-пылевых структур, таких как парная и ориентационная корреляционные функции. Приводится определение дефектов, возникающих в плазменно-пылевых структурах: свободной дисклинации и дислокации, дислокационной пары. Дается описание метода определения числа топологических дефектов в квазидвумерных структурах макрочастиц.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным результатам и анализу структурных и динамических свойств пылевых систем в плазме тлеющего разряда постоянного тока низкого давления. Применяются различные внешние воздействия для управления пространственным положением, степенью упорядоченности, а также динамикой плазменно-пылевых структур. Представлены результаты экспериментальных исследований формирования структур макрочастиц и их динамики в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 2500 Гс. 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. Обсуждаются механизмы и результаты экспериментальных исследований формирования цепочечных пылевых структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока с различными плазмообразующими газами, где ионы имеют направленную скорость по отношению к пылевым частицам.



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. 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 для этого в лабораторных условиях достаточно небольшого изменения заряда. Для экспериментально полученной вихревой структуры приведены оценки значения радиуса и градиента заряда. 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.

Представлены результаты экспериментальных исследований образования и эволюции пылевых структур в плазме криогенного разряда постоянного тока в атмосфере инертного газа (гелия) при изменении температуры нейтрального газа  $\sim 4,2\text{--}10$  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.

В **Пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований и анализ динамических и структурных свойств квазидвумерных пылевых образований в плазме высокочастотного емкостного разряд. Изучен эффект воздействия лазерного излучения на степень упорядоченности пылевой структуры, плавление пылевого кристалла при воздействии лазерного излучения. Анализируются экспериментальные результаты формирования пылевых течений в плазменно-пылевых структурах в приэлектродной области ВЧ разряда при воздействии лазерного излучения. Приводятся результаты изучения фазовых переходов в квазидвумерных плазменно-пылевых структурах. 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.

В **Шестой главе** приводятся результаты исследования пространственно-упорядоченных структур заряженных макрочастиц в магнитных ловушках. 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. 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, левитирующих в статической магнитной ловушке. Представлены экспериментальные данные о динамике активных заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках при лазерном воздействии, получены оценки значений параметра неидеальности и параметра Линдемана, характерные для сильнокоррелированных кристаллических или стеклоподобных структур.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны выводы.

**В качестве замечаний** следует отметить следующее:

1) В диссертации инверсия вращения плазменно-пылевой структуры с увеличением аксиального магнитного поля объясняется конкуренцией между двумя механизмами: вращением пылевых частиц вместе с нейтральным газом и вращением пылевых частиц под действием силы ионного увлечения в противоположном направлении (Глава 4, стр.80). В работах профессора В.Ю. Карасева из СПбГУ был предложен еще один механизм, связанный с вращением газа при использовании капиллярной вставки для формирования стратифицированного разряда постоянного тока. К сожалению, данный механизм в работе не рассматривается.



2) Одним из основных параметров, характеризующих систему взаимодействующих частиц, является параметр неидеальности  $\Gamma$ , определяемый как отношение потенциальной энергии взаимодействия между частицами к их кинетической энергии хаотического («теплого») движения. При этом в пылевой плазме при рассмотрении экранированного кулоновского межчастичного взаимодействия учитывают экранировку и вводится т.н. эффективный параметр неидеальности  $\Gamma^* = (1 + \kappa + \kappa^2/2) \exp(-\kappa) \Gamma$ , и именно он восстанавливается в Главе 5 диссертации по форме парной корреляционной функции на основе ее сравнения с результатами моделирования, полученных в работе [Vaulina O., Plas. Phys., 2004]. Это следовало отдельно отметить в работе, поскольку в Главе 6 при оценке параметра неидеальности кулоновского кластера в магнитной ловушке применяется уже классическое определение  $\Gamma$ . Кроме того, по смыслу точнее было бы называть  $\Gamma$  не параметром, а показателем неидеальности.

3) Теория Березинского-Костерлица-Таулесса описывает переход в двумерных системах взаимодействующих частиц, в то время как монослойная пылевая структура является реальным трехмерным физическим объектом. К сожалению, автором приводится анализ структуры только в плоскости монослоя и совершенно оставлено без внимания движение частиц поперек слоя. Возникает вопрос, сохраняется ли монослойность структуры при ее кинетическом разогреве? Как поменяется сценарий фазового перехода при формировании нового слоя?

4) В Главе 6 для формирования кулоновских структур в магнитных ловушках в качестве материала частиц использовался графит, который имеют слоистую структуру и достаточно сильную анизотропию. На стр. 166 указано, что свойства таких частиц вдоль и поперек слоев могут сильно различаться, в некоторых случаях на порядки величины. Чтобы исключить влияние анизотропии, следовало бы использовать частицы стеклоглерода, обладающие коэффициентом анизотропии близким к единице. То же замечание касается и экспериментов по формированию структур из сверхпроводящих частиц иттриевой керамики – выбор металла в качестве материала частиц (Pb, Sn, Ta) позволил бы снять вопрос по влиянию анизотропии частиц на формируемые структуры.

Данные замечания несколько не снижают общую положительную оценку работы, а также важность полученных результатов. Диссертационная работа М.М. Васильева выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область экспериментального исследования открытых диссипативных структур сильновзаимодействующих макрочастиц. Автореферат отражает содержание диссертации правильно и полно. Достоверность результатов диссертации обусловлена



использовавшимися современными диагностическими методами, соответствием с результатами других научных групп, разумным согласованием с имеющимися теориями.

**Научная и практическая значимость работы.** 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. 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, коллоидов и биологических жидкостей.

Результаты исследования пылевой плазмы в магнитном поле могут найти приложения для выявления особенностей поведения высокодисперсной пылевой компоненты, например в установках термоядерного синтеза. Полученные в работе результаты по исследованию динамических плазменно-пылевых структур позволяют глубже понять возникновение и существование различного рода неустойчивостей: автоколебаний, вихревого движения в таких структурах.

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, занимающихся изучением пылевой плазмы, ее свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре "Курчатовском институте", Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском энергетическом институте, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Санкт-Петербургском государственном университете, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском физико-техническом



институте, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической физики РАН, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском инженерно-физическом институте, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Результаты диссертации опубликованы в 25 научных статьях в российских и зарубежных научных журналах из перечня ВАК, докладывались и обсуждались на многочисленных международных и российских конференциях. Автор является высококвалифицированным специалистом в области физики пылевой плазмы, его труды хорошо известны общественности. 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.

В целом диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой получен ряд важных научных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Диссертационная работа «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты» полностью соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Васильев Михаил Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа была заслушана на семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук 28.05.2018 г. Отзыв составлен главным научным сотрудником теоретического отдела ИОФ РАН, доктором физико-математических наук А.М. Игнатовым.

Гл. научный сотрудник теоретического отдела ИОФ РАН  
д.ф.-м.н., проф. Игнатов Александр Михайлович.  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 135-02-47, [aign@fpl.gpi.ru](mailto:aign@fpl.gpi.ru)

Ученый секретарь ИОФ РАН  
д.ф.-м.н., Андреев С.Н.  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 503-83-27, [nauka@gpi.ru](mailto:nauka@gpi.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 135-41-48, [postmaster@kapella.gpi.ru](mailto:postmaster@kapella.gpi.ru)

