

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию М.М. Васильева
«Эволюция открытых диссипативных структур заряженных
макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы**

Диссертация М.М. Васильева посвящена экспериментальному исследованию открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов. 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. В пылевой плазме реализуются условия, позволяющие изучать различные явления, в том числе, процессы самоорганизации и эволюции на кинетическом уровне. Пылевые частицы в плазме могут появляться в результате различных процессов, например, в результате химических реакций или конденсации, либо инжектироваться в плазму преднамеренно. В газоразрядной плазме, макрочастицы приобретают заряды в результате воздействия потоков электронов и ионов на поверхности макрочастиц. Заряды пылевых частиц в плазме не постоянны. Они зависят от локальных условий и флуктуируют.

Наибольший интерес представляют системы заряженных сильно взаимодействующих частиц. Именно такие системы и рассматриваются в диссертационной работе М.М. Васильева, в которой представлены результаты изучения динамических и структурных характеристик, механизмов и условий формирования сильнокоррелированных структур заряженных макрочастиц, в том числе, 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. Таким образом, диссертационная работа Васильева М.М. представляется актуальной и важной с точки зрения приложений.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Ее рукопись занимает 211 страниц текста и включает 111 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 225 наименований.

Во **Введении** автором обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, формулируются цель и задачи работы, отмечаются ее научная новизна и практическая значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** приведено рассмотрение методов диагностики и определения параметров пылевых структур в плазме газового разряда и магнитных ловушках. В этой главе описаны методы диагностики, используемые автором в его работе и основанные на визуализации макрочастиц, а также восстановлении их координат и скоростей. Приведено описание оригинального метода трехмерной диагностики, основанного на принципе бинокулярного зрения и позволяющего восстанавливать в каждый момент времени информацию о трех координатах пылевых макрочастиц. Кроме того, кратко рассмотрен метод определения размеров частиц по рассеянию лазерного излучения на основе теории Ми. Глава состоит из трех разделов, включая выводы.

Во **Второй главе** описаны оригинальные экспериментальные стенды и диагностические комплексы для изучения структур макрочастиц в газовых разрядах низкого давления и магнитных ловушках. Приведено описание стенда для изучения пылевой плазмы тлеющего разряда постоянного тока при различных условиях (при криогенных температурах, при воздействии лазерного излучения, при воздействии внешних магнитных полей),

установки с пылевой плазмой емкостного высокочастотного разряда, стенда для изучения пылевых систем заряженных макрочастиц в неоднородных магнитных полях. Глава состоит из четырех разделов, включая выводы.

В Третьей главе представлено описание методов, используемых в работе для анализа результатов диагностических измерений характеристик пылевой плазмы. Наличие информации о дискретных во времени положениях макрочастиц позволяет решать задачу, связанную с определением их траекторий движения. В главе приведено описание метода восстановления скоростей пылевых частиц и их кинетической температуры. Для определения структурных характеристик системы используются трансляционная (парная) и ориентационная корреляционные функции. Форма парной корреляционной функции, количество пиков на ней, отношение первого минимума к первому максимуму, значение первого максимума и его положение, ширина первого пика могут применяться в качестве критериев того или иного состояния системы, близости к фазовым переходам. Описан используемый в работе метод восстановления параметра неидеальности структур макрочастиц, основанный на интерпретации и применении результатов численного моделирования. Один из разделов главы посвящен описанию метода определения числа топологических дефектов, возникающих в квазидвумерных структурах (свободных дисклинаций и дислокаций, дислокационных пар). Глава состоит из пяти разделов, включая выводы.

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных результатов структурных и динамических свойств пылевых систем в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Приведены данные о формировании плазменно-пылевых структур и их динамики в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии аксиального магнитного поля. Описаны наблюдения вращений и смены направлений вращений пылевых структур в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси разряда при изменении значения индукции аксиального магнитного поля. Представлен анализ динамических и структурных свойств плазменно-пылевых систем в тлеющем разряде

постоянного тока при комнатной температуре. Рассмотрены пылевые структуры с автоколебаниями и вихревым движением. Получены зависимости скоростей макрочастиц от их радиального расположения в вихре. Приведены оценки значения радиуса экранирования и градиента заряда. Представлена интерпретация пылевого вихря как ячейки Бенара. Приведены результаты экспериментальных исследований образования и эволюции пылевых структур в плазме криогенного разряда постоянного тока при различных температурах нейтрального газа. Обнаружено, что при увеличении температуры буферного газа наблюдается уменьшение кинетической энергии отдельных частиц, из которых формируются пылевые цепочки. 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.

В Пятой главе обсуждаются результаты экспериментальных исследований и приводится анализ плазменно-пылевых структур в высокочастотном емкостном разряде. Исследовано воздействие лазерного излучения на формирование течения и степень упорядоченности пылевой структуры, а также на плавление монослойной плазменно-пылевой структуры. Экспериментально подтверждена возможность двухстадийного характера процесса плавления для квазидвумерных плазменно-пылевых систем макрочастиц в ВЧ разряде. На основе анализа асимптотики корреляционных функций и характера возникающих дефектов показано, что процесс плавления может идти с образованием промежуточной гексатической фазы согласно теории Березинского-Костерлица-Таулесса.

В Шестой главе приводятся результаты исследования кулоновских структур в магнитных ловушках в лабораторных условиях и условиях микрогравитации. Описан космический эксперимент «Кулоновский кристалл» на Российском сегменте Международной космической станции и

приводятся его результаты по исследованию динамики заряженных макрочастиц и образованию анизотропных структур. Предложена методика формирования кулоновских ансамблей макрочастиц в неоднородных магнитных полях на основе левитации сверхпроводников в магнитном поле (эффекта Мейснера). Приводятся экспериментальные результаты формирования кулоновских структур из сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в жидком азоте и его парах. Представлен анализ экспериментальных данных о динамике макрочастиц в статических магнитных ловушках при лазерном воздействии, получены оценки значений параметра неидеальности и параметра Линдемана.

Основные результаты и выводы сформулированы автором в **Заключении** диссертации. Полученные результаты являются достоверными и новыми, а выводы – обоснованными.

Новизна и достоверность приведенных автором диссертации результатов не вызывают сомнений. Основной материал диссертации полностью отражен в научных работах автора, опубликованных в печати.

В целом диссертация представляет собой добротное исследование. Полученные в ней результаты важны для понимания процессов, происходящих в пылевой плазме. Вместе с тем, диссертация несвободна от недостатков. Имеются, в частности, следующие замечания:

- 1) Среди выводов диссертации имеется утверждение, согласно которому «Рассмотрены динамические особенности пылевых структур, такие как волны или вихри... Рассмотрена теоретическая модель, показывающая, что формирование вихревой структуры может происходить при наличии 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 структуры экспериментально».

Неустойчивость Бенара (или, как ее еще называют, конвективная неустойчивость) обусловлена нагревом жидкости и поддерживаемым этим нагревом температурным градиентом (см., например, Н. Haken, Synergetics, Springer, Berlin, 1983, p. 249). Важная особенность развития неустойчивости Бенара – формирование упорядоченной конвективной картины, характеризуемой окружностями или шестиугольниками, которые представляют собой конвективные ячейки. Автор диссертации утверждает, что им построена конвективная модель пылевого вихря как ячейки Бенара. В действительности, меньше, чем на половине страницы 91 диссертации приведены оценки критического числа Рэлея, которое, судя по используемым в диссертации параметрам (в частности, коэффициенту теплопроводности, коэффициенту кинематической вязкости и т.д.), рассчитывается в рамках обычной (не модифицированной для условий пылевой плазмы) гидродинамической теории. Вызывает недоумение тот факт, что при этом утверждается (см. стр. 87-88), что формирование вихревого движения обусловлено градиентом **заряда** макрочастиц в структуре (как отмечено выше, об этом же говорится и в выводах диссертации). Таким образом, имеется определенное противоречие. Далее, учитывая уровень описания оценок числа Рэлея в диссертации, нельзя утверждать, что «рассмотрена конвективная модель пылевого вихря, как ячейки Бенара». Можно говорить лишь об интерпретации. Но и к интерпретации возникают вопросы, поскольку механизм формирования ячеек Бенара обусловлен гидродинамическими процессами, а формирование вихрей в пылевой плазме тесным образом связано с формированием градиента заряда макрочастиц в структуре. Автору диссертации следовало бы детально рассмотреть диссипативные процессы в пылевой плазме [часть из которых

описана, например, в работе С.И. Попель, С.Н. Андреев, А.А. Гиско, А.П. Голубь, Т.В. Лосева, «Диссипативные процессы при распространении пылевых ионно-звуковых нелинейных возмущений», Физика плазмы **30**, 314-329 (2004)], на которые, в том числе, влияет и зарядка пылевых частиц, описать с учетом указанных диссипативных процессов параметры, определяющие число Рэлея, и только после этого делать выводы относительно возможности описания вихрей как ячеек Бенара. Кроме того, если автор претендует на построение теоретической модели, характеризующей развитие конвективной неустойчивости в пылевой плазме, ему следует вывести систему гидродинамических уравнений со всеми необходимыми диссипативными слагаемыми и решать ее. Этого в диссертации сделано не было.

- 2) Утверждение автора на стр. 5 диссертации, что «согласно современным представлениям более 99,9 % вещества во Вселенной является плазмой», требует уточнения. В действительности, в настоящее время со ссылкой на данные космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) предлагается следующий состав Вселенной: 74% - темная энергия, 22% - темная материя, 3,6% - межгалактический газ, 0,4% - звезды и пр.
- 3) В тексте диссертации сообщается, что для поддержания чистоты плазмообразующего газа и предотвращения его загрязнения различными примесями, возникающими из-за дегазации стенок разрядной камеры и натекания через уплотнители вакуумной системы, применяется принудительная прокачка камеры чистым буферным газом. При этом обсуждения влияния газового потока на характеристики исследуемых плазменно-пылевых структур не приводится.
- 4) Экспериментальное исследование плавления пылевых структур в плазме ВЧ разряда было представлено еще в работе [H.M. Thomas,

G.E. Morfill, "Melting dynamics of a plasma crystal", Nature **379**, 806–809 (1996)]. Автору диссертационной работы следовало бы привести сравнение результатов сценария фазового перехода, обусловленного лазерным воздействием на плазменно-пылевую структуру, с уже известными результатами, полученными ранее другими авторами.

- 5) Поскольку анализ всех экспериментальных данных основан на определении по видеоданным положений макрочастиц и их скоростей, в диссертации следовало бы более подробно остановиться на данном вопросе.

В целом приведенные выше замечания несколько не умаляют значимости результатов, полученных в диссертации, и не затрагивают основных ее положений, выносимых на защиту. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область экспериментального исследования открытых диссипативных структур сильно взаимодействующих макрочастиц. В целом диссертация М.М. Васильева характеризуется актуальностью проведенных исследований, теоретической и практической значимостью результатов, которые можно квалифицировать как научное достижение.

Результаты, полученные в работе М.М. Васильева, имеют высокую научную ценность и могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением свойств пылевой плазмы, разработкой методов бесконтактной диагностики систем макрообъектов, и различных практических приложений. В работе представлено решение целого спектра актуальных задач, которые представляют самостоятельный интерес и могут быть полезны для постановки новых экспериментов по исследованию открытых диссипативных систем. Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Физическом институте

им. П.Н.Лебедева РАН, Московском энергетическом институте, Санкт-Петербургском государственном университете, Московском физико-техническом институте, Институте химической физики РАН, Московском инженерно-физическом институте, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Диссертационная работа Михаила Михайловича Васильева «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью соответствующую всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Работа удовлетворяет критериям, установленным п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Васильев Михаил Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской Академии
Наук (ИКИ РАН) 117997, Россия, г. Москва, ул.
Профсоюзная 84/32

Заведующий лабораторией
плазменно-пылевых процессов в
космических объектах ИКИ РАН,
доктор физико-математических
наук, профессор
тел.: +7 (916) 625 62 64
e-mail: popel@iki.rssi.ru

С.И. Попель

Подпись С.И. Попеля заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН,
доктор физико-математических
наук
тел.: +7 (495) 333-20-45
e-mail: zakharov@iki.rssi.ru



А.В.Захаров