

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАФИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ**

заседание диссертационного совета Д 002.110.02  
при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук  
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук  
от 27 июня 2018 г. (протокол № 12)

Повестка дня:

Защита диссертации Васильева Михаила Михайловича  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
на тему  
«Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц:  
методы диагностики и экспериментальные результаты»

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Москва – 2018

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02  
при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук  
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук  
Протокол № 12 от 27 июня 2018 г.

**Председатель** – Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02 д.ф.-м.н.,  
профессор Андреев Н.Е.

**Секретарь** – Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02 д.ф.-м.н.,  
профессор Василяк Л.М.

### **Председатель:**

Уважаемые члены Совета, кворум имеется. Совет утверждён в составе **31** человека.  
На заседании присутствуют 23 члена совета, из них докторов наук по профилю  
рассматриваемой диссертации – 12.

1. Фортов В.Е.	академик	01.04.08	отсутствует
2. Канель Г.И.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
3. Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
4. Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
5. Агранат М.Б.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	отсутствует
6. Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	присутствует
7. Баженова Т.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
8. Вараксин А.Ю.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
9. Васильев М.М.	к.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	отсутствует
10. Васильев М.Н.	д.т.н., профессор	01.04.14	присутствует
11. Воробьев В.С.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
12. Голуб В.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
13. Гордон Е.Б.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	отсутствует
14. Грязнов В.К.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	присутствует
15. Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	присутствует
16. Зейгарник Ю.А.	д.т.н., с.н.с.	01.04.14	присутствует
17. Еремин А.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
18. Иванов М.Ф.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	отсутствует
19. Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
20. Кириллин А.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
21. Лагарьков А.Н.	академик	01.04.08	присутствует
22. Ломоносов И.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	отсутствует
23. Медин С.А.	д.т.н., профессор	01.04.14	присутствует
24. Норман Г.Э.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
25. Петров О.Ф.	академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
26. Полежаев Ю.В.	чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	отсутствует
27. Савватимский А.И.	д.т.н.	01.04.14	присутствует
28. Сон Э.Е.	академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
29. Старостин А.Н.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	присутствует
30. Храпак А.Г.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	присутствует
31. Якубов И.Т.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	отсутствует

## **ПОВЕСТКА ДНЯ**

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) Васильева Михаила Михайловича на тему «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы. Диссертация выполнена в лаб. №1.2.1.2 – диагностики пылевой плазмы ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2, <http://jiht.ru>).

### **Научный консультант:**

**Петров Олег Федорович**, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

1. **Филиппов Анатолий Васильевич** - гражданин РФ, доктор физико-математических наук, первый заместитель директора отделения - начальник отдела, Акционерное общество «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (улица Пушкиновых, владение 12, Троицк, Московская область, 142092);
2. **Попель Сергей Игоревич** – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32);
3. **Карасев Виктор Юрьевич** – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, Санкт-Петербургский государственный университет (Университетская набережная 7-9, Санкт-Петербург, 199034).

### **Ведущая организация:**

**Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук** (119991, Москва, ул. Вавилова, 38).

На заседании присутствуют: официальный оппонент д.ф.-м.н. Филиппов Анатолий Васильевич, д.ф.-м.н. Попель Сергей Игоревич, д.ф.-м.н. Карасев Виктор Юрьевич; научный консультант Васильева Михаила Михайловича д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, Петров Олег Федорович.

## СТЕНОГРАММА

**Председатель:** Уважаемые коллеги, добрый день! Напоминаю, что на основании приказа № 28 от 19.04.2018 на период с 19.04.2018 по 01.08.2018 временно исполняющими обязанности ученого секретаря является д.ф.-м.н., профессор Василяк Леонид Михайлович. Сегодня у нас на повестке дня защита. Васильев Михаил Михайлович будет защищать докторскую диссертацию «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты».

### **Ученый секретарь:**

*Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Минобрнауки РФ.*

### **Председатель:**

Есть ли вопросы по документам? Нет. Михаил Михайлович, пожалуйста, вам слово.

### **Васильев М.М.:**

*Докладывает диссертационную работу (выступление не стенографируется, доклад Васильева М.М. прилагается).*

### **Председатель:**

Спасибо, Михаил Михайлович. Есть ли вопросы?

### **Иосилевский И.Л.:**

В той части тематики, которую вы рассказывали про изучение переходов из кристаллического состояния в жидкоподобное, у меня вопрос такой: изучали ли вы (и если да, то каковы результаты) процессы которые можно назвать стеклованием, т.е. затвердеванием жидкоподобной структуры с выпадением диффузии и падением энтропии?

### **Васильев М.М.:**

К сожалению, эти эксперименты выполнены не были в данных работах. Нам известны работы, в которых были предприняты попытки пронаблюдать процесс стеклования в таких системах, но дальше результатов численного моделирования эти работы, на сколько мне известно, не продвинулись.

### **Храпак А.Г.:**

Скажите, пожалуйста, кроме вас использовал кто-нибудь методику бинокулярного зрения для анализа такого рода структур?

### **Васильев М.М.:**

Уже после нашей появились работы, где использовалось три видеокамеры для восстановления трехмерных координат. Я полагаю, что эта методика близка по своей сути к бинокулярной, т.е. уже не бинокулярная, а, наверное, правильно ее назвать

тринокулярная. Такой подход применялся. На наш взгляд использование трех видеокамер значительно усложняет как технику эксперимента (их синхронизацию, расположение вокруг наблюдаемого объекта), так и последующий анализ изображений. При этом не сильно помогает увеличить точность определения пространственных координат. Поэтому мы остановились именно на методике бинокулярного зрения.

#### **Сон Э.Е.:**

Михаил Михайлович у меня вопрос такой, используя ваш опыт - дело в том, что с точки зрения теории хорошо бы знать функции распределения: по пространству обычному и пространству скоростей. Эта теория может быть основана, если вы умеете измерять для каждой частицы три координаты и одновременно три компоненты скорости, т.е. измерить их для каждой частицы, потом по ансамблю усреднить, и получить те величины, которыми можно уже будет оперировать, строить динамические модели и так далее. Там есть проблема: если вы фотографируете один раз, второй раз то вы получаете изображения частиц и становится вопрос где та частица, которую вы сфотографировали на первом кадре, где она на втором кадре, куда она переместилась?

#### **Васильев М.М.:**

Это основная проблема не только в трехмерной диагностике пылевых структур, но даже в двумерной диагностике. Потому что, когда у вас есть последовательность видеокадров, точное соответствие положения одной частицы на видеокадре ее положению на другом видеокадре. Это решается, в том числе, вероятностным методом, определяется как менялась скорость и вектор скорости частицы на предыдущих кадрах и сопоставляется по наибольшему правдоподобию ее положение и вектор скорости на последующих кадрах. Конечно, когда мы имеем дело с трехмерной диагностикой, эта проблема становится более существенной, тем не менее, для небольших структур, состоящих из сотен частиц, эта проблема решается и, действительно, в каждый момент времени мы знаем не только координаты пылевых макрочастиц но и составляющие их скорости.

#### **Амиров Р.Х.:**

Вот вы когда представляли результаты по фазовым переходам, указывали значения параметра неидеальности, причем точные значения: 55, 85, 140. Как вы его определяли?

#### **Васильев М.М.:**

В основе определения параметра неидеальности лежит метод восстановления  $G$ , основанный на анализе формы парной корреляционной функции нашей исследуемой системы при этих условиях. По значению первого максимума парной корреляционной функции, а также по отношению первого максимума к первому минимуму можно восстановить параметр неидеальности и это работа Ваулиной Ольги Станиславовны 2005

года в ЖЭТФ, в которой на основе фитирования результатов численного моделирования и результатов эксперимента позволяет дать точное соответствие этим критериям (отношение первого максимума к первому минимуму и значению первого максимума парной корфункции) параметру неидеальности.

### **Вараксин А.Ю.:**

Михаил Михайлович, на сколько я понял, вы использовали разные виды разрядов и мой вопрос касается свойства частиц. Свойств таких как: плотность материалов (полистирол, формальдегид); размеры частиц (где то был диапазон 5 микрометров, где то 30-60 мкм) без указания отклонений от сферичности; такие свойства как теплопроводность; электропроводность (в конце вашего доклада прозвучало что частицы графита электропроводные) Для вашего каждого эксперимента вы подбирали и использовали конкретные частицы. Вопрос касается критерия, то что вы говорили заряд к массе это понятно, что еще? Развить это. Потому как если частицы будут другие, то. по всей видимости, и выводы и результаты будут другие. Поэтому объясните этот момент, пожалуйста.

### **Васильев М.М.:**

Если задача ставилась исследовать фазовый переход, например, в двумерной пылевой системе, начну с этого, то естественно для формирования кристаллической упорядоченной пылевой структуры мы брали монодисперсные сферические пылевые частицы, для того чтобы получить монослой, чтобы межчастинные расстояния были одни и те же, чтобы получить порядок в системе. И уже потом переводили эту систему в разупорядоченное состояние. В случае если идет речь про эксперименты с лазерным воздействием, с хаотизацией пылевой структуры, то конечно влияет и свойство поверхности пылевых частиц, т.е. есть там металлической покрытие, нет покрытия, его сплошность – это влияет на характер движения макрочастиц и выбирались такие макрочастицы. В случае удержания частиц в магнитных ловушках, я обосновывал в своем докладе, почему мы брали частицы графита, потому что они имеют наибольшую удельную магнитную восприимчивость и такие частицы могут удерживаться в неоднородных магнитных полях. В случае, когда мы проводили эксперименты со сверхпроводящей левитацией, безусловно, частицы должны были иметь критическую точку перехода в сверхпроводящее состояние, в разумных пределах температур, которые достижимы в наших экспериментальных установках. Но в любом случае любая экспериментальная работа, это поисковая работа и варьирование условия, в том числе и варьирование материала, формы, размера частиц осуществляется. И в каждом конкретном случае оно зависит от постановки задачи.

**Председатель:**

Еще, пожалуйста, вопросы?

**Васильев М.Н.:**

Михаил Михайлович, (9.00) Вы сказали, что заряд частиц, которые первоначально находились на стенках ампулы, потом после встряхивания они переходили в объем ампулы, и потом подавался потенциал на зонд. Так? Но в каком-то другом эпизоде вашего доклада прозвучали такие слова, что при нулевом потенциале на зонде все равно образовывалась плазменная структура. Это действительно так? То есть когда на зонде ноль, все равно удается получить структуру?

**Васильев М.М.:**

Когда потенциал на центральном зонде был равен нулю, мы наблюдали формирование незаряженного кластера, представляющего собой агломерат в форме сплюснутого эллипсоида вращения.

**Васильев М.Н.:**

За счет чего?

**Васильев М.М.:**

За счет того, что диамагнитные частицы выталкиваются в область минимума магнитного поля, которое находится в центральной части ампулы. После подачи потенциала на заряжающий зонд, мы наблюдаем интенсивный разлет частиц.

**Васильев М.Н.:**

То есть изначально структура формируется просто в магнитном поле?

**Васильев М.М.:**

Да.

**Председатель:**

Еще есть вопросы? Михаил Михайлович, можно я от себя тогда задам вопрос образовательного характера? Понятно, что кроме того что существует много примеров, где есть пылевая плазма, пылевая плазма еще и хороший инструмент для изучения фундаментальных процессов. И один из таких процессов (вы показали на мой взгляд один из наиболее интересных результатов) касается перехода из кристаллической структуры через промежуточную в жидкую фазу. А вот то, что касается экспериментов в космосе. Там какой-нибудь фундаментальный физический механизм изучался? Собственно, для чего это делалось, какой наиболее яркий результат?

**Васильев М.М.:**

Ответ и сложный и простой одновременно. Формирование анизотропных структур, которое наблюдалось в космических экспериментах, на мой взгляд, является примером

самоорганизации частиц (имеется ввиду образование нитей), и на мой взгляд, это является весьма впечатляющим результатом, и требует дополнительных исследований. Что касается, если можно немного в сторону, не фундаментального, а практического значения эксперимента, то результаты легли в основу новой методики формирования и биопечати органов (органных конструкторов), из диаманитных живых сфер (клеточных сфероидов), и у нас сейчас готовится эксперимент нашими коллегами на борту МКС, чтобы пронаблюдать формирование живых систем из клеточных сфероидов, их васкуляризацию и так далее (там уже идет речь о незаряженных структурах), то есть результаты легли в основу технологии трехмерной биопечати.

**Председатель:**

Спасибо. Больше вопросов нет? Нет. Тогда слово предоставляется научному консультанту.

**Петров О.Ф.:**

*Зачитывает отзыв (выступление не стенографируется, письменный отзыв имеется в деле)*

**Председатель:**

Спасибо. Слово предоставляется ученому секретарю Василяку Л.М. для ознакомления членов диссертационного совета с отзывами, поступившими на автореферат и отзывом ведущей организации.

**Ученый секретарь:**

В наш совет поступило пять отзывов на автореферат диссертации Васильева Михаила Михайловича. Все отзывы положительные. Есть замечания.

1. **Казахский национальный университет им. аль-Фараби г. Алматы, Казахстан** (зав. отделом физики плазмы НИИ экспериментальной и теоретической физики (НИИЭТФ), академик Национальной Академии наук Республики Казахстан, д.ф.-м.н., профессор Рамазанов Т.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Как правило, размеры частиц в плазменно-пылевых экспериментах меняются, что делает малоэффективным применение теории Ми для определения их характеристик. Обсуждается ли данная проблема в диссертации и какое решение предлагает автор?

- Из текста автореферата не всегда понятно, какие именно механизмы и процессы приводят к тем или иным наблюдаемым эффектам в пылевой плазме. Например, сказано, что вращение пылевых структур во внешнем магнитном поле объясняется вращением пылевых частиц вместе с нейтральным газом, а также вращением пылевых частиц под действием силы ионного увлечения в противоположном направлении. Однако, не



объяснены первопричины, вызвавшие вращение как нейтрального газа, так и ионной компоненты.

2. **Филиал института энергетических проблем химической физики РАН им. В.Л. Тальрозе, г. Черноголовка** (в.н.с. лаборатории физико-химических воздействий д.х.н. Василец В.Н.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Института ядерных реакторов НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва** (начальник Отдела высокотемпературных реакторных материалов и наноструктур д.ф.-м.н., профессор Иванов А.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- На странице 20 автореферата указано, что параметр неидеальности может быть восстановлен по форме парной корреляционной функции, при этом не уточняется каким образом. Как определялся параметр неидеальности пылевой системы, приведенный на графиках рис.9 стр.28? Следовало бы подробнее остановиться на данном вопросе.

- В пятой главе делается вывод о том, что процесс плавления двумерной пылевой структуры идет согласно БКТ теории. Существуют ли условия, при которых сценарий фазового перехода для пылевого монослоя будет соответствовать GVI теории?

4. **Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь** (зав. кафедрой физики д.ф.-м.н., Хомченко А.В.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В работе говорится о том, что «кинетические свойства ионного потока играют важную роль в формировании пылевых структур в плазме газового разряда. Таким образом, выбор газовой смеси может существенно влиять на свойства таких структур». Возникает резонный вопрос, как влияют примеси, возникающие в результате дегазации стенок разрядной камеры, эрозии поверхности пылевых частиц и/или электродов на разряд и свойства формирующихся пылевых структур;

- Положения, выносимые на защиту, носят общий, неконкретный характер и не оценены в сравнении с другими известными решениями.

5. **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск** (зав. лабораторией Разреженных газов д.ф.-м.н. Новопашин С.А.) – отзыв положительный, без замечаний.

Имеется положительный отзыв от ведущей организации – Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, (зачитывает отзыв ведущей организации). В отзыве имеются следующие замечания:

- 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.

Указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы.

**Председатель:**

Спасибо, Леонид Михайлович. Слово предоставляется Васильеву Михаилу Михайловичу для ответа на замечания.

**Васильев М.М.:**

С вашего позволения я начну с ответов на замечания ведущей организации.

По первому вопросу: Действительно в работах Виктора Юрьевича среди факторов, с которыми связано вращение пылевой структуры рассмотрено наличие вставки в газоразрядной трубке, используемой для стабилизации страты и регулирования ее положения, и соответственно, положения структуры в разрядной трубке. Вблизи вставки может возникать вращение газа, которое будет увлекать пылевые частицы. Однако в нашей работе мы не использовали вставку для позиционирования структуры, вместо этого применялась перископическая система, позволяющая смещать область наблюдения вслед за изменением вертикального положения пылевой структуры. Таким образом, учет этого фактора в работе не приводится.

По второму вопросу: Действительно следовало дать более четкое определение параметра неидельности который используется в работе для плазменно-пылевых систем. С этим замечанием согласен, хотя по ссылке в диссертации на метод определения  $\Gamma$  оно дано. В 6 Главе диссертации действительно используется уже классическое определение  $\Gamma$  и его определение в тексте есть. Что касается названия параметра (а не показателя) неидеальности, то это сложившаяся терминология, широко применяемая в отечественной и зарубежной научной литературе.

Что касается анализа движения макрочастиц и их покидания плоскости монослоя, то для контроля монослойности структуры использовалась видеокамера, которая располагалась в горизонтальной плоскости, поэтому можно с уверенностью утверждать что в представленных экспериментах монослойность сохранялась. Схему эксперимента я показывал на своей презентации, и она есть в диссертации. Как поменяется сценарий фазового перехода при формировании нового слоя - вопрос закономерный и безусловно интересный. Его можно обобщить дальше, начиная с какого количества слоев БКТ сценарий фазового перехода перестанет реализовываться. Для ответа на этот вопрос нужно отдельное большое исследование, которым занимается сейчас моя аспирантка. И я думаю, через пару лет мы сможем дать ответ на данный вопрос, подкрепленные результатами экспериментов.

По четвертому вопросу: Согласен с замечанием, и в экспериментах, которые должны были выполняться на МКС нами было предусмотрено использования сменных кассет со стеклоуглеродными сферическими макрочастицами. К сожалению, транспортно грузовой корабль Прогресс, который доставлял нашу аппаратуру для этих экспериментов,

не смог выйти на расчетную орбиту и разрушился в плотных слоях атмосферы в 2015 г. Что касается экспериментов с металлическими частицами, они значительно сложнее, поскольку требуют температур на два порядка ниже, чем в представленных экспериментах, и мы планируем такие эксперименты в ближайшее время в нашей лаборатории.

Теперь, что касается отзывов на автореферат.

По замечаниям профессора Рамазанова Т.С. из КазНУ:

Действительно, как я упоминал в своем выступлении, масса частицы может меняться в ходе эксперимента: как уменьшаться в результате, например, ионного травления так и формироваться покрытие на поверхности частицы в результате осаждения атомов и кластеров на ее поверхности из газовой фазы. Это значительно затрудняет применение метода Ми для решения обратной задачи и восстановлении размера макрочастиц. Потому что в априорную информация для решения обратной задачи нужно закладывать форму частицы, ее коэффициент преломления, длину волны. А если форма частицы перестает быть сферической (либо изначально отлична от сферической из-за дефекта на поверхности макрочастицы) или у нее меняется поверхность, например, становится поглощающей, то аппроксимация измерений распределения интенсивности углового рассеяния с результатами расчетов будет давать значительную ошибку.

По вопросу о механизме вращения я уже говорил во время моей презентации. И его подробное описание приведено в тексте диссертации и не попало в автореферат в виду ограничения его объема.

По замечаниям Иванова А.С. из Курчатовского института:

Действительно в автореферате дается ссылка на работу Ваулиной О.С. 2004 года в физике плазмы и говорится о том, что на основе анализа формы парной корреляционной функции, по ее первому максимуму и отношению первого максимума к первому минимуму можно восстановить  $\Gamma$ . Более подробное описание приведено в тексте диссертации.

К вопросу о существовании условий, при которых сценарий фазового перехода для пылевого монослоя будет соответствовать GBI теории. Все зависит от способа, которым осуществляется воздействие и кинетический разогрев пылевой структуры, например в работе Кпарек в PRL 2008 года, на структуру осуществлялось импульсное воздействие со стороны электрического поля, а потом наблюдалась релаксация такой системы и там реализовывался GBI сценарий, поэтому GBI теорию для квазидвумерных систем совсем отвергать будет не правильно.

По замечаниям Хомченко А.В. из Белорусско-Российского университета:

Действительно эрозия электродов может существенно влиять на свойства газового разряда. Текст диссертации имеет раздел, посвященный этому. Ввиду того что потенциал ионизации металла существенно ниже потенциала ионизации инертного газа в ионном составе разряда могут появляться металлические ионы. Для поддержания чистоты плазмообразующего газа и предотвращения его загрязнения примесями в экспериментах применялась принудительная прокачка разрядной камеры чистым буферным газом.

В комментарии об общих формулировках положений, выносимых на защиту, и их сравнение с другими известными решениями - вопрос не поставлен. А с комментарием я могу, наверное, согласиться лишь частично. На мой взгляд, формулировки достаточно точны, а представленные результаты являются пионерскими.

**Председатель:**

Спасибо ответы получены. Переходим к отзывам официальных оппонентов, первый оппонент Филиппов Анатолий Васильевич, из Троицкого института инновационных и термоядерных исследований. Анатолий Васильевич просим, вам слово.

**Филиппов А.В.:**

*(Зачитывает положительный отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

**Председатель:**

Есть ли у членов совета вопросы? Нет. Михаил Михайлович, пожалуйста.

**Васильев М.М.:**

Спасибо за вопросы.

По первому вопросу о выборе угла в методе бинокулярного зрения. С точки зрения удобства и простоты восстановления координат значение угла практически не важно. Вычисление тригонометрических функций происходит автоматически в программном коде. А в эксперименте геометрия оптических окон в газоразрядных камерах не всегда позволяет расположить видеокамеры под прямым углом, хотя, такое расположение действительно напрашивается. Поэтому предлагаемый подход описан в общем виде.

По поводу сильно отличных индикатрис рассеяния для частиц из окиси алюминия диаметром в 10 мкм на рис. 1.8. Спасибо, я думаю, что это не единственная опечатка в представленной работе. Форма индикатрисы рассеяния для частиц зависит от их размера, формы, материала. На рисунке в качестве примера приведены индикатрисы рассеяния для частиц, на самом деле, разного размера 0,1; 1; и 10 мкм из работы Петрова О.Ф. 1990 г., а не только 10 микронного размера и с этим связано отличие их формы. Ссылка на эту работу в тексте и подрисуночной подписи диссертации приводится.

По поводу двух разных размеров пылевых частиц, нанесенных на графике на рис. 1.10. К сожалению, в печатной версии диссертации этот график не достаточно четко

пропечатался. Плохо видна вторая серая кривая, приведенная для второго размера. Она нанесена для того чтобы показать, что даже отличие в 0,05 мкм по диаметру для макрочастиц, методом Ми хорошо регистрируется. Поскольку исходные образцы монодисперсных частиц всегда содержат некоторое количество частиц с близким, но отличным размером от основного. Экспериментально реализовывалась ситуация, когда в страте газового разряда захватывались именно те частицы, размеры которых отличны от основного.

По поводу утверждения, что «функция  $E/p$  ( $pR$ ) в тлеющем разряде постоянного тока в области малых значений  $pR$  быстро уменьшается». В тексте диссертации делается другое утверждение, что в области сужения разрядной вставки (капилляра) есть скачек потенциала, и это верно. А вот в обосновании этого действительно имеет место описка и напряженность поля и соответственно,  $E/p$  действительно растет. Спасибо оппоненту за это замечание.

По поводу источника, откуда взята система уравнений (4.1) и как она получена. Уравнения взяты из работы О.С. Ваулиной 2005 г в ЖЭТФ, где на основе результатов численного моделирования процессов эволюции массопереноса были предложены эмпирические аппроксимации численных данных, связывающих параметр неидеальности в плазменно-пылевой системе со значением максимума функции  $D(t)$ .

**Председатель:**

Спасибо Михаил Михайлович. Анатолий Васильевич вы удовлетворены ответами?

**Филиппов А.В.:**

Да вполне, спасибо.

**Председатель:**

Переходим к отзыву второго оппонента, Попель Сергей Игоревич, из Института космических исследований РАН. Прошу.

**Попель С.И.:**

*(Зачитывает положительный отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

**Председатель:**

Есть ли у членов совета вопросы? Нет. Михаил Михайлович, пожалуйста, ваш ответ на замечания.

**Васильев М.М.:**

Касательно замечания о построении теоретической модели, характеризующей развитие конвективной неустойчивости в пылевой плазме. Здесь следует отметить, что автор не претендует на построение теоретической модели, речь идет исключительно о простой интерпретации. Возникновение движения нагретой жидкости в экспериментах

Бенара и формирование вихрей обусловлено конвективным движением более нагретых слоев жидкости из нижней части объема в более холодные области в верхней части, где они остывают и начинают снова двигаться вниз. Аналогия прослеживается в том, что наличие градиента заряда приводит к тому, что частицы с большим зарядом в электрическом поле стратифицированного разряда начинают двигаться вверх структуры, где разряжаются и в результате этого начинают возвращаться вниз, формируя, таким образом, вихрь. В тексте диссертации и автореферата нигде не говорится о построении теоретической модели, характеризующей развитие конвективной неустойчивости. Сделаны простые оценки.

По поводу утверждения, что согласно современным представлениям более 99,9 % вещества во Вселенной является плазмой. Я заранее соглашаюсь с мнением уважаемого оппонента, который является специалистом в данной области, при этом мне кажется, что этот вопрос частично находится в плоскости терминологии. Следует ли считать, например, темную энергию веществом. Но для корректности формулировки, конечно, следовало бы добавить пояснение «в наблюдаемой форме»

По поводу влияния газового потока на характеристики исследуемых плазменно-пылевых структур. При формировании прокачки газоразрядной камеры скорость газового потока была подобрана таким образом, чтобы не оказывать влияния на пылевые частицы, и составляла в экспериментах от десятых до единиц кубического сантиметра в минуту. Экспериментально было определено, что влияние на характер движения пылевых частиц начинается с величин скорости газового потока на порядок выше.

К вопросу о сравнении результатов сценария фазового перехода, обусловленного лазерным воздействием на плазменно-пылевую структуру, с уже известными результатами. Как я уже говорил в своем докладе, другие авторы, исследовавшие плавление структур в пылевой плазме для хаотизации структуры изменяли давление буферного газа и/или мощность разряда. Поэтому в плазменно-пылевой системе менялось все: концентрации электронов и ионов, заряд пылевых частиц, длина экранирования, потенциал взаимодействия, диссипация. Работа Thomas в Nature 1996 года не исключение. В этом заключается причина, почему я счел некорректным сравнение наших экспериментов с данными работами.

К замечанию о методе анализа экспериментальных данных. Действительно анализ всех экспериментальных данных основан на определении по видеоданным положений макрочастиц, однако в работе использовались готовые программные средства определения положений и скоростей макрочастиц, поэтому на данном вопросе в диссертации не делалось акцента. Хотя возможно это стоило сделать.

**Председатель:**

Спасибо Михаил Михайлович. Сергей Игоревич вы удовлетворены ответами?

**Попель И.С.:**

Да, спасибо.

**Председатель:**

Переходим к отзыву третьего оппонента, профессор Карасев Виктор Юрьевич, из Санкт-Петербургского государственного университета.

**Карасев В.Ю.:**

*(Зачитывает положительный отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

**Председатель:**

Есть ли у членов совета вопросы? Нет. Михаил Михайлович, пожалуйста.

**Васильев М.М.:**

По поводу подхода к плавлению, основанного на GBI теории. GBI теория, и системы, для которых такой сценарий реализуется, конечно, существуют. Я уже упоминал работу Кпарек в PRL 2008 года, где реализовывался GBI сценарий перехода. Справедлив он будет, по-видимому, и для многослойных систем. Возможно для систем с другим потенциалом взаимодействия. Этот вопрос требует дополнительного исследования. И сейчас моя аспирантка как раз занимается этим вопросом. Надеюсь в ближайшие пару лет мы сможем ответить на данный вопрос со ссылкой на наш эксперимент.

К вопросу о векторе Бюргерса. Вектор Бюргерса эффективен, в том числе и для плазменно-пылевых систем. Вместе с тем в монослойных пылевых структурах возможно возникновение дефектов, которые не будут разрушать порядок в кристаллической системе – пара связанных дислокаций или дислокационная пара. Они могут возникать и исчезать из-за тепловых флуктуаций, при этом не оказывая влияния на порядок в системе и не вызывая фазового перехода. В отличие от свободных дислокаций или дисклинаций, которые по БКТ теории нарастают в области фазовых переходов кристалл-гексатика, гексатика-жидкость соответственно, и там вектор Бюргерса будет отличен от нуля и будет фиксировать нарушение порядка в системе.

К замечанию о сравнении результатов характеристик плазменно-пылевых систем в магнитном поле со случаем отсутствия магнитного поля, которое в этом диапазоне может вызывать не монотонные зависимости. Уважаемый оппонент прав в данном вопросе. Сравнение результатов со случаем отсутствия магнитного поля следовало бы сделать. К сожалению, в работе мы оказались в таких параметрах разряда, что без магнитного поля в структуре наблюдалась неустойчивость, проявляющаяся в виде колебаний, что не позволило провести корректные измерения и сделать сравнение результатов.

По поводу вопроса о разрядной вставки, вблизи которой возникает вращение газа, увлекающее пылевые образования во вращение с положительной проекцией угловой скорости на направление магнитного поля. Нам хорошо известны работы коллег из



СПбГУ и в ответе к замечаниям ведущей организации мною уже упоминалось, что методика постановки нашего эксперимента не включала использования разрядной вставки. Поэтому этот механизм оказался не рассмотренным в работе. Согласен с оппонентом, что стоило дать более подробное описание и ссылки по данному вопросу.

К вопросу об использовании в оптической схеме фильтров для подавления фоновой засветки из разряда. В наших экспериментах, фоновая засветка от разряда практически не влияла на качество видеозаписи. Наибольшую проблему вызывают блики подсвечивающего лазерного излучения от стенок камеры, в этом случае использовались щелевые фильтры в комбинации с подбором правильного расположения лазерного пучка относительно видеокамер, чтобы уменьшить количество формирующихся бликов.

**Председатель:**

Спасибо Михаил Михайлович. Виктор Юрьевич вы удовлетворены ответами?

**Карасев В.Ю.:**

Да, конечно.

**Председатель:**

Спасибо. Тогда мы переходим к заключительной стадии: дискуссии. Кто хочет высказаться?

**Сон Э.Е.:**

Я начну с одного замечания, которое возникло на самом деле вчера. Оно не только для членов диссертационного совета, но и многим покажется интересным. Дело в том, что вчера с Игорем Львовичем Иосилевским мы хоронили выдающегося ученого Баренблатта, с которым 20 лет проработали на Физтехе. На Физтехе он работал на нашем факультете. На втором курсе Христианович читал лекции по газодинамике, на третьем курсе читал Баренблатт динамику вязкой жидкости, а на четвертом курсе сначала Шейндлин, потом я читаю лекции уже по физической механике, физике плазмы и т.д. Так вот история была такая, что Баренблатт был долгое время невыездным, поскольку с Зельдовичем занимался ядерными проблемами и так далее. Так вот потом, когда его выпустили, его пригласили поработать в Тейлоровской лаборатории в Кембридже. Он согласился и поехал туда, проработал там до 65 лет, когда по английским законам нельзя больше работать, он вышел на пенсию. И после этого его пригласил Александр Чорин (это человек, который много сделал для динамики вязкой жидкости и ее численного моделирования) в Калтех в Америку, где он там был профессором. Так вот вчера на похоронах была высказана такая мысль: когда Баренблатт приехал в Америку, он конечно стал посещать там научные семинары и он полностью изменил сам подход и структуру семинара. До этого, когда люди приезжали на семинар, рассказывали свою научную работу, автору доклада три раза хлопали. Вопросы задавались из серии: «Что по осям?». Когда приезжал Баренблатт, он

начал задавать серьезные вопросы. А дальше Чорин написал, что семинары американские отличаются от советских тем, что советские семинары являются конфронтационными.

Я напомним, что я учился и работал на Физтехе, а докторскую диссертацию защищал на ученом совете ИВТАНа, а проходил семинар в теор.отделе под руководством Бибермана. Так вот на этом семинаре, на котором проходила предзащита моей диссертации, мне столько вопросов задали, что потом мне Биберман сказал: «Вы половину своей диссертации выкиньте, потому что она одни вопросы вызывает, а этого не надо». А дальше произошло следующее: когда я пришел на защиту, Демирчян открывает заседание и просит Бибермана провести заседание. Он выходит и начинает вести себя так, будто видит меня впервые в жизни, то есть он мне задал 20 отличных вопросов. На мою защиту приехал мой отец, заслуженный учитель Казахстана, который очень переживал, что меня там так пытаются. Поэтому я хотел сказать, что вот эта конфронтационность была воспитана еще на семинарах Ландау, его ученика Александра Михайловича Дыхне, и других. То есть не было такого, что человек просто ушел, все согласились, что задача решена, там все было серьезно. Вот этот стиль семинаров сохранился у нас. Виталий Михайлович Иевлев, мой научный руководитель, при всей его корректности и доброжелательности всегда поддерживал, когда задавали действительно серьезные вопросы. Я помню, когда я был аспирантом, и мне поручили прорецензировать работу Собельникова, я встал и сказал что докторская работа неправильная. Так как в результате постановки уравнений для турбулентной диффузии, было получено уравнение, которое имеет отрицательный коэффициент диффузии. А это означает, что в задаче есть неустойчивость Адамара, это означает, что малые возмущения приводят к большому нарастанию, и другие следствия. Виталий Михайлович послушал и сказал: «Замечания совершенно правильные, но в этой работа так много сделано, что я предлагаю эту работу поддержать и защитить». Когда выступает аспирант, и есть утверждения, от которых режет ухо, то я тоже не могу смолчать.

Так вот здесь вопросы касались изучения конвективных течений в пылевой плазме. Два года назад была конференция в Jet Propulsion Lab, где я выступил с критикой работ американцев и немцев, касающихся всех видов неустойчивостей. А причина в следующем. Все неустойчивости, на которые они ссылаются, имеют гидродинамическую структуру. А значит, нужно решать уравнения гидродинамики. Шейндлин сформулировал очень простой принцип: если у вас сила уменьшается в направлении ее действия, возникает конвективная неустойчивость. Когда рассматривается пылевая плазма, то гидродинамическое приближение не работает, потому что длина свободного пробега сравнима с размерами системы. То есть не работает основное условие

гидродинамического приближения. А, значит, вопрос надо поставить так: нужно все те же неустойчивости рассмотреть с точки зрения кинетического приближения, то есть на основе кинетического уравнения Больцмана. Поэтому результаты качественно правильные, но подход и методы решения уже будут совершенно другие. С этой точки зрения, первое: Михаил Михайлович – воспитанник российской школы, он через всю эту систему семинаров, на которой принято критиковать, прошел. Те, кто прошли такую школу семинаров, что-то стоят. Второе, критика, которая содержалась в рецензиях оппонентов, по поводу конвективных неустойчивостей, не та. Я рассуждаю так, что основные результаты правильные, а для точного решения задачи требуется решение совсем других уравнений, но это уже надо делать с экспериментаторами, потому что многие параметры не определены. Поэтому, с точки зрения обоснованности подхода и полученных результатов, я эту работу полностью поддерживаю.

**Иосилевский И.Л.:**

Эдуард Евгеньевич, Вы рекомендуете Михаил Михайловичу не использовать гидродинамические термины, типа ячеек Бенара и прочее, когда у него не тепло «гоняет» вещество туда-сюда, а электрические силы?

**Сон Э.Е.:**

Использование в граничных приближениях ячеек Бенара можно, но это находится вне экстраполяции уравнений гидродинамики. То есть это за пределами применимости. А так, там работает то же самое. Но эти задачи еще не решены.

**Попель И.С.:**

А можно здесь пару слов вставить? Начну с тезиса, что плазму нельзя описывать гидродинамически, а бесстолкновительную плазму тогда можно так описывать?

**Сон Э.Е.:**

Можно, объясню почему. Многие люди, которые занимаются бесстолкновительной плазмой, часто используют ту же формулировку, что и для сплошных сред. Я приведу простой пример. Начиная с работ Кадомцева, было такое понятие «турбулентность высокотемпературной плазмы». Я в этом году специально делал доклад в Звенигороде на конференции по высокотемпературной плазме, и в этом докладе я сделал утверждение что турбулентности высокотемпературной плазмы не существует, а в низкотемпературной плазме существует. И объяснил почему. Пульсации, например, тока (т.е. случайные возмущения) на порядок превышают свое основное состояние. Это нелинейный процесс, нестационарный, в котором случайная компонента превышает основную. А что такое турбулентность: точность определения турбулентного коэффициента трения в трубе на поверхности составляет доли процента. Т.е. это случайное явление, но статистика

настолько хорошо описана, что точность такова. Поэтому турбулентность в низкотемпературной плазме существует, а в высокотемпературной плазме нет.

**Председатель:**

Хотел бы напомнить, что в бесстолкновительной плазме уравнения Власова первые три момента дают уравнения гидродинамики, а столкновения, которые там есть – это столкновения с флуктуационными полями, которые тоже описываются в рамках турбулентности бесстолкновительной плазмы. Поэтому это тривиальная вещь, хорошо известная.

**Попель И.С.:**

У меня был вопрос, а в чем проблема именно в моем первом замечании? Потому что реально основная претензия к соискателю состояла в том, что он утверждает, что он создал модель, а там приведены некие оценки, и это просто не уровень модели, и все. В целом, я не против интерпретации, единственно что, там нужно решать более сложные уравнения.

**Председатель:**

Давайте вернемся к основному вопросу нашего сегодняшнего заседания – к защите Михаила Михайловича.

**Василяк Л.М.:**

Я бы хотел сказать свое мнение с точки зрения человека, который много занимается экспериментом. Поскольку мы тоже занимались пылевой плазмой, мне естественно приходилось смотреть и читать работы Михаила Михайловича, и более того, когда была предзащита, то меня попросили выступить формальным рецензентом. У меня были свои замечания и исправления, Михаил Михайлович их исправил. Я должен сказать, что это очень хорошо и добротная сделанная докторская диссертация. Все те измерения, которые были сделаны, и полученные результаты достоверны, что немаловажно в условиях космоса; и для довольно сложных структур, в которых количество частиц не очень большое, и можно трактовать и в ту, и другую сторону. Поэтому с этой точки зрения, те экспериментальные результаты и их трактовка сделаны очень корректно, результаты получены новые, поэтому я считаю, что это хорошая докторская диссертация, я буду голосовать «за», и считаю, что членам диссертационного совета тоже правильно сделают, если проголосуют «за».

**Председатель:**

Спасибо, Леонид Михайлович. Еще кто-то хочет высказаться? Нет. Мне тоже представляется, что основной посыл Эдуарда Евгеньевича, что результаты правильные. Мы должны выбрать счетную комиссию.

**Председатель:**

Спасибо. Выбираем счетную комиссию. Мы просим поучаствовать д.ф.-м.н., профессора Иосилевского Игоря Львовича, д.ф.-м.н., профессора Нормана Генри Эдгаровича и д.т.н., профессора Васильева Михаила Николаевича. Никто не возражает? Нет. Давайте голосовать. Все проголосовали «за» состав комиссии. Тогда приступаем к голосованию.

*(Проводится процедура тайного голосования).*

**Председатель:**

Слово для оглашения результатов тайного голосования предоставляется председателю счетной комиссии – д.ф.-м.н., профессору Норману Г.Э.

**Норман Г.Э.:**

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 31 членов, на заседании присутствуют 23 члена совета, из них 12 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации. Роздано 23 бюллетеней, остались не розданными 8. В урне оказалось 23 бюллетеня.

Результаты голосования:

За присуждение ученой степени доктора физико-математических наук Васильеву Михаилу Михайловичу проголосовало 23 члена диссертационного совета, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

**Председатель:**

Предлагается утвердить протокол счетной комиссии. Прошу голосовать. *(Протокол счетной комиссии утверждается единогласно)*. Диссертационный совет должен принять заключение по диссертации Васильева М.М. и утвердить его. Проект заключения роздан. У кого есть замечания или дополнения?

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).*

Предлагается принять заключение с обсужденными нами изменениями. Прошу голосовать. *(Утверждается единогласно открытым голосованием)*. Заседание диссертационного совета объявляется закрытым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02, СОЗДАННОГО НА  
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 27.06.2018г. № 12

О присуждении Васильеву Михаилу Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Эволюция открытых диссипативных структур заряженных макрочастиц: методы диагностики и экспериментальные результаты» по специальности 01.04.08 – физика плазмы принята к защите 21.03.2018г., (протокол заседания № 4) диссертационным совет Д 002.110.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Васильев Михаил Михайлович 1981 года рождения, в 2004 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (Государственный университет)». В 2007 году окончил аспирантуру Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (Государственный университет)».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Динамика плазменно-пылевых структур при воздействии магнитного поля» по специальности 01.04.08 – физика плазмы, защитил в 14 ноября 2007 года (протокол заседания № 13) в диссертационном совете Д 002.110.02, созданном на базе Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru).

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории № 1.2.1.2. – диагностики пылевой плазмы НИЦ-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.2.1.2. – диагностики пылевой плазмы НИЦ-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный консультант академик, доктор физико-математических наук, профессор, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Петров Олег Федорович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, первый заместитель директора отделения – начальник отдела физики неидеальной плазмы отделения Центр теоретической физики и вычислительной математики Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» Филиппов Анатолий Васильевич;

- доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук Попель Сергей Игоревич;

- доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета Карасев Виктор Юрьевич

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном г.н.с. теоретического отдела д.ф.-м.н., проф. Игнатовым (утвержденном 28.05.2018 г. ВРИО директора чл.-корр. РАН Гарновым С.В) указала, что 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 Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре "Курчатовском институте", 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.

Соискатель имеет всего 121 опубликованную работу, в том числе 40 в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертации, из них по теме диссертации опубликовано 25 работ, получен 1 патент:

1. Р.Е. Болтнев, М.М. Васильев, Е.А. Кононов, О.Ф. Петров, 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. М.И. Мясников, Л.Г. Дьячков, О.Ф. Петров, М.М. Васильев, В.Е. Фортов, С.Ф. Савин, Е.О. Серова, 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. S.N. Antipov, L.P.T. Schepers, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, 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. M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, K.B. Statsenko, 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. О.Ф. Петров, О.С. Ваулина, М.М. Васильев, Е.А. Лисин, М.И. Мясников, С.Н. Антипов, В.М. Чепелев, К.Г. Косс, Й. Тун и В.Е.Фортов, Кулоновские системы сильновоздействующих 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. S.N. Antipov, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, Non-Ideal Dust Structures in Cryogenic Complex Plasmas // Contributions to Plasma Physics, V.52, I.3, pp. 203-206, 2012.

17. S.N. Antipov, M.M. Vasiliev, M.M. Alyapyshev, O.F. Petrov, V.E. Fortov, 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, А.Ю. Калери, А.И. Борисенко, Г.Е. Морфилл, 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. M.M. Vasiliev, M.M. Alyapyshev, S.N. Antipov, O.F. Petrov, V.E. Fortov, 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. М.М. Васильев, Л.Г. Дьячков, С.Н. Антипов, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов, Плазменно-пылевые структуры в магнитных полях в разряде постоянного тока // *Письма в ЖЭТФ*, Т.86, Вып. 5-6, стр. 414-419, 2007.

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

- С.Н. Антипов, М.М. Васильев, И.Б. Быхало, О.Ф. Петров, Р.Е. Болтнев, И.Н. Крушинская, А.А. Пельменёв, Реверсивный термомеханический насос для сверхтекучего гелия // Патент RU 2 521 520 C1 от 27.06.2014.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Филиал института энергетических проблем химической физики РАН им. В.Л. Тальрозе, г. Черноголовка** (в.н.с. лаборатории физико-химических воздействий д.х.н. Василец В.Н.) – отзыв положительный, без замечаний.

2. **Казахский национальный университет им. аль-Фараби г. Алматы, Казахстан** (зав. отделом физики плазмы НИИ экспериментальной и теоретической физики (НИИЭТФ), академик Национальной Академии наук Республики Казахстан, д.ф.-м.н., профессор Рамазанов Т.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Как правило, размеры частиц в плазменно-пылевых экспериментах меняются, что делает малоэффективным применение теории Ми для определения их характеристик. Обсуждается ли данная проблема в диссертации и какое решение предлагает автор?

- Из текста автореферата не всегда понятно, какие именно механизмы и процессы приводят к тем или иным наблюдаемым эффектам в пылевой плазме. Например, сказано, что вращение пылевых структур во внешнем магнитном поле объясняется вращением пылевых частиц вместе с нейтральным газом, а также вращением пылевых частиц под действием силы ионного увлечения в противоположном направлении. Однако, не объяснены первопричины, вызвавшие вращение как нейтрального газа, так и ионной компоненты.

3. **Института ядерных реакторов НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва** (начальник Отдела высокотемпературных реакторных материалов и наноструктур д.ф.-м.н., профессор Иванов А.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- На странице 20 автореферата указано, что параметр неидеальности может быть восстановлен по форме парной корреляционной функции, при этом не уточняется каким образом. Как определялся параметр неидеальности пылевой системы, приведенный на графиках рис.9 стр.28? Следовало бы подробнее остановиться на данном вопросе.

- В пятой главе делается вывод о том, что процесс плавления двумерной пылевой структуры идет согласно БКТ теории. Существуют ли условия, при которых сценарий фазового перехода для пылевого монослоя будет соответствовать GBI теории?

4. **Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь** (зав. кафедрой физики д.ф.-м.н., Хомченко А.В.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В работе говорится о том, что «кинетические свойства ионного потока играют важную роль в формировании пылевых структур в плазме газового разряда. Таким образом, выбор газовой смеси может существенно влиять на свойства таких структур». Возникает резонный вопрос, как влияют примеси, возникающие в результате дегазации

стенок разрядной камеры, эрозии поверхности пылевых частиц и/или электродов на разряд и свойства формирующихся пылевых структур;

• Положения, выносимые на защиту, носят общий, неконкретный характер и не оценены в сравнении с другими известными решениями.

**5. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск** (зав. лабораторией Разреженных газов д.ф.-м.н. Новопашин С.А.) – отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н. Филиппов А.В. является известным физиком-теоретиком в области теоретического исследования плазменно-пылевых процессов и автором более 100 научных работ, в том числе:

1. А.В. Филиппов, Н.А. Дятко, А.С. Костенко. Исследование зарядки пылевых частиц в слабоионизованных инертных газах с учетом нелокальности функции распределения электронов по энергии // ЖЭТФ, т.146, вып.11, с. 1122-1134, 2014;

2. И.Н. Дербенев, А.В. Филиппов. Экранирование заряда пылевой частицы в плазме сухого воздуха, создаваемой внешним источником ионизации // ЖЭТФ, т.148, №2 (8), с. 391-406, 2015;

3. А.В. Филиппов, В.Н. Бабичев, А. Ф. Паль, А. Н. Старостин, В.Е. Черковец, В.К. Рерих, М.Д. Таран. Формирование пылевой ловушки в несамостоятельном разряде с внешним источником ионизации газа // Физика плазмы, т.41, №11, с. 969-978, 2015.

- д.ф.-м.н., профессор Попель С.И. является известным физиком в области пылевой ионосферной и космической плазмы, автор более 100 научных работ, в том числе:

1. С.И. Попель, С.И. Копнин, А.П. Голубь, Г.Г. Дольников, А.В. Захаров, Л.М. Зеленый, Ю.Н. Извекова, Пылевая плазма у поверхности луны // Астрономический вестник, т. 47, № 6, стр. 455, 2013;

2. S. Popel, A. Golub', L. Zelenyi, Photoelectron distribution function over the illuminated part of the Moon // European physical journal D, V. 68, Issue 9 Article Number 245, 2014;

3. S.I. Popel; L.M. Zelenyi, Dusty plasmas over the Moon // Journal of plasma physics, V. 80, Special issue SI, PP. 885-893, part 6, 2014.

- д.ф.-м.н., профессор Карасев В.Ю. является признанным специалистом в области экспериментального изучения пылевой плазмы и автором более 100 научных работ, в том числе:

1. Yu. Golubovskii, V. Karasev, A. Kartasheva Dust particle charging in a stratified glow discharge considering nonlocal electron kinetics // Plasma sources science & technology, V.26, Issue 11, Article Number115003, 2017;

2. В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, А.П. Горбенко, И.Ч. Машек, В.А. Полищук, И.И. Миронова, Изменение текстуры поверхности полимерных материалов в пылевой плазме // Журнал технической физики, Т. 87, № 3, С. 473-475, 2017.

3. S.I. Pavlov, E.S. Dzlieva, V.Yu. Karasev, M.A. Ermolenko, L.A. Novikov, S.A. Maiorov, Method of Control of Ion Drag Force in Complex Plasmas // Contributions to plasma physics, V. 56, Issue 3-4, Special issue SI, PP. 221-227, 2016.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук является одним из ведущих институтов, занимающихся исследованиями в области неидеальной плазмы, в том числе пылевой плазмы, сотрудниками института опубликовано более 100 научных работ в области физики пылевой плазмы, в том числе:

1. Н.Н. Скворцова, Д.В. Малахов, В.Д. Степахин и др., Инициация пылевых структур в цепных реакциях под воздействием излучения гиротрона на смесь порошков металла и диэлектрика с открытой границей // Письма ЖЭТФ, т. 106, № 4, стр. 240, 2017;

2. В.Н. Цытович, Н.Г. Гусейн-заде, А.М. Игнатов, Нелинейная экранировка пылевых частиц и структуризация пылевой плазмы. II. Образование и устойчивость структур // Физика плазмы, v. 43, № 10, PP 812-836, 2017;

3. С.А. Майоров, Computational of temperatures and pressure fluctuations in the Coulomb System // Теплофизика высоких температур, т. 52, № 4, стр. 640 – 642, 2014.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

разработан комплекс экспериментальных стендов для изучения структур макрочастиц в магнитных ловушках и плазме газовых разрядов при комнатной и криогенных температурах, воздействии сильных магнитных полей в лабораторных условиях и условиях микрогравитации;

предложена методика трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур на основе принципа бинокулярного зрения для нахождения пространственных координат, скоростей и траекторий частиц;

предложена методика кинетического разогрева пылевых макрочастиц на основе фотофореза в плазме газового разряда при воздействии лазерного излучения;

предложена методика формирования кулоновских структур сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в криогенных жидкостях, а также их парах.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

установлен эффект и предложено объяснение инверсии вращения пылевой структуры в плазме тлеющего разряда постоянного тока низкого давления в аксиальном однородном магнитном поле с индукцией до 700 Гс;

изучена эволюция плазменно-пылевых структур и экспериментально обнаружено образование и рост пылевых цепочек в криогенном газовом разряде постоянного тока при изменении температуры нейтрального газа от 4 до 10 К;

экспериментально подтвержден двухстадийный характер процесса плавления для квазидвумерных плазменно-пылевых систем макрочастиц в плазме емкостного высокочастотного разряда. На основе анализа асимптотики корреляционных функций, а также анализа характера возникающих дефектов и изменения их взаимной концентрации показано, что процесс плавления происходит с образованием промежуточной гексатической фазы согласно теории Березинского-Костерлица-Таулесса;

изучено формирование протяженных кулоновских структур в статических магнитных ловушках в лабораторных условиях и в условиях микрогравитации. Получены данные о динамике активных заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках в криогенных жидкостях и их парах при лазерном воздействии.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что: разработана методика трехмерной диагностики плазменно-пылевых структур на основе принципа бинокулярного зрения для нахождения пространственных координат, скоростей и траекторий частиц; разработана методика формирования кулоновских структур сверхпроводящих макрочастиц в статических магнитных ловушках в криогенных жидкостях, а также их парах; разработана методика кинетического разогрева пылевых макрочастиц на основе фотофореза в плазме газового разряда при воздействии лазерного излучения; представлены результаты экспериментального исследования фазового перехода в квазидвумерной плазменно-пылевой системе макрочастиц в плазме емкостного высокочастотного разряда и с помощью анализа асимптотики корреляционных функций, а также анализа характера возникающих дефектов и изменения их взаимной концентрации показано, что процесс плавления происходит с образованием промежуточной гексатической фазы; на основе результатов космического эксперимента «Кулоновский кристалл» по исследованию формирования пространственно-упорядоченных структур диамагнитных частиц разработан новый метод для формативной трехмерной биопечати тканевых конструкций, осуществляемой методом самосборки живых тканей и органов в неоднородном магнитном поле.

Результаты, представленные в диссертации, могут найти применение в исследованиях широкого спектра специалистов, в т.ч. занимающихся изучением пылевой плазмы, ее свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, НИЦ "Курчатовском институте", 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.

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила, что достоверность полученных результатов основывается на научной обоснованности постановки задач, на использовании апробированных современных методов диагностики и на сравнении результатов экспериментов с выводами численных и теоретических исследований других авторов, опубликованных в научной литературе.

**Личный вклад** соискателя является определяющим и состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в постановке научных задач; все экспериментальные установки, используемые в диссертационной работе, разработаны и созданы либо лично автором, либо совместно с коллегами при определяющем участии автора; результаты, изложенные в диссертационной работе, получены в проведенных автором экспериментах; а на основании проведенных исследований и теоретического анализа полученных результатов были сформулированы и обоснованы выводы и положения, вошедшие в диссертацию.

Апробация результатов исследования проводилась на более 50 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики плазмы и физики фазовых переходов. Она соответствует всем критериям, установленным п. 9, Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (в редакции от 28.08.20017).

На заседании от 27.06.2018г. диссертационный совет принял решение присудить Васильеву Михаилу Михайловичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника», участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 23, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

ВРИО ученого секретаря диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор

Василяк Л.М.

27.06.2018г.

