

В диссертационный совет Д 003.053.01
при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН.
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации **САЛЬНИКОВА Михаила Владимировича** «Исследование анизотропии плазмы вокруг пылевых частиц сферической и несферической формы», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости газа и плазмы.

Пылевая плазма, которая проявляет себя в космическом пространстве, в промышленных плазмохимических генераторах и в лабораторных установках газового разряда уже достаточно давно является предметом изучения специалистов в области физики плазмы. Следует отметить, что ежегодно публикуются монографии, сборники, большое количество статей, ежегодно проводятся международные конференции, посвящённые эффектам, возникающим в этих многофазных средах. В частности, на этих конференциях обсуждаются вопросы зарядки и самоорганизации пылевых частиц, формирования пылевых жидкостей и кристаллов, возникновение фазовых переходов между этими состояниями, а также волновые явления. В настоящее время исследования пылевой плазмы при криогенных температурах, а также в условиях микрогравитации показали, что при определенных условиях образуются чрезвычайно плотные плазменно-пылевые кулоновские структуры, в которых расстояния между заряженными частицами становятся соизмеримы с радиусом Дебая-Хюккеля. Еще одним важным свойством плотных плазменно-пылевых структур при криогенных температурах является новый механизм их построения, при котором они могут быть построены не только из отдельных заряженных частиц, но также и из кластеров, т.е. микрообразований из нескольких заряженных частиц в виде цепочек или других, более сложных образований. Исследования пылевых структур при криогенных температурах расширяются, в том числе планируются и исследования в космических условиях. Для исчерпывающего анализа причин этих явлений необходимы надёжные данные о взаимодействии пылевых частиц между собой. Другой важный фактор – это технологические применения плазмы с

микрочастицами, которые во многих случаях можно осуществить только при криогенных температурах. Поскольку экспериментальные исследования не могут дать ответы на многие вопросы, то необходимо проводить исследования и с помощью численных методов. В свете этих задач актуальность и практическая значимость проведенных в диссертационной работе исследований не вызывает сомнений.

Указанные выше обстоятельства обозначили тему диссертационной работы Михаила Владимировича Сальникова. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и выводов. Полный объём диссертации составляет 166 страницы с 62 рисунками. Список цитируемой литературы содержит 143 наименования.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы; сформулирована цель работы; перечислены задачи, решенные в диссертации; приведены основные положения, выносимые на защиту; определен личный вклад автора; приведен список основных публикаций по теме диссертации.

В первой главе проведён анализ литературы по теме диссертации. Перед автором стояла сложная задача достаточно кратко изложить современное состояние моделирования в сложной плазменно-пылевой структуре. Наиболее широко применяемыми из них являются метод линейного отклика и метода «частицы-В-ячейке». Однако если в первом методе невозможно учесть геометрию пылевых частиц, то второй зачастую оказывается слишком требовательным к вычислительным ресурсам. Представленный обзор свидетельствует о хорошем знании работ других авторов, и достаточно полно отражает современное состояние исследуемых вопросов. Выполненный анализ позволил четко сформулировать задачи и цели диссертационной работы.

Во второй главе диссертации соискателем Михаилом Владимировичем Сальниковым был проведен детальный анализ возможных методов и создана итерационная численная модель, основанная на приближении среднего поля, где траектории каждого иона рассчитывались отдельно и независимо от других носителей зарядов. Среднее поле, при этом, рассчитывалось как суперпозиция от потенциала отрицательно заряженной пылевой частицы, облака ионов и электронов, захваченных около неё, и внешнего постоянного электрического поля. Кроме того, в этой модели учитывались столкновения ионов с нейтральными атомами двух типов: резонансные столкновения перезарядки и упругие столкновения. Созданная модель является модульной и состоит из трёх частей: модуля, ответственного за расчёт траекторий ионов вблизи изолированных заряженных сферических частиц, изолированных эллипсоидальных частиц и бесконечных цепочек заряженных сферических частиц. Основные результаты численного моделирования изложены в главах 2-4. На основании

полученных результатов численного моделирования, построены аппроксимации для величины вейка, возникающего за пылевой частицей в потоке плазмы, и дипольного момента облака ионов и электронов, вытягивающегося относительно пылевой частицы во внешнем поле. Эти функции зависят от средней длины свободного пробега ионов, напряжённости внешнего поля и ёмкости проводящей пылевой частицы и с хорошей точностью описывают большой массив результатов, полученный разработанной методикой. Отдельно стоит отметить исследование поведения плазмы вблизи цепочек пылевых частиц, где продемонстрировано уменьшение величины заряда каждой отдельной пылевой частицы при уменьшении межчастичного расстояния, что на качественном уровне согласуется с экспериментами.

В Заключение приведены основные выводы диссертации.

Основные результаты диссертационной работы М.В. Сальникова сводятся к следующему:

1. Создана новая численная модель, позволяющая моделировать траектории ионов в приближении среднего поля для трёх случаев: изолированной заряженной сферической пылевой частицы, изолированной эллипсоидальной пылевой частицы и бесконечной цепочки заряженных сферических частиц. Моделирование может производиться для разных типов столкновений ионов с нейтральными атомами и для разных размеров пылевых частиц.
2. Получены эмпирические функции, которые с хорошей точностью аппроксимируют характеристики ионного следа, возникающего в плазме за пылевой частицей, как результат ионной фокусировки.
3. Численными расчётами получена зависимость заряда проводящей пылевой частицы от её геометрии и длины свободного пробега ионов. Показано, что в случае разреженной плазмы этот заряд зависит только от электрической ёмкости пылевой частицы.
4. Изучена устойчивость ориентации двух взаимодействующих заряженных пылевых частиц в форме дисков во внешнем электрическом поле. Показано, что устойчивой ориентацией является та, в которой диски лежат в плоскости внешнего поля.
5. Изучен критерий изолированности пылевой частицы в бесконечной цепочке. Показано, что пылевые частицы не влияют на зарядку друг друга, если расстояние между ними достигает нескольких длин Дебая. Получена зависимость заряда сферической пылевой частицы от расстояния между пылевыми частицами в цепочке.

Выводы, как к каждой отдельной главе, так и общие, приведенные в конце диссертационной работы, сделаны обосновано, а полученные результаты о поведении

заряда пылевой частицы и характеристик плазменного следа в системе согласуются с данными, которые есть в научной литературе.

Достоверность численных расчётов работы Михаила Владимировича Сальникова не вызывает сомнений: соискателем проведено широкое сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, зарядов частиц пыли и дрейфовой скорости ионов, и результатами численных расчётов, в которых использованы вышеупомянутые модели линейного отклика и «частицы-в-ячейке».

В ходе выполнения диссертационной работы Михаил Владимирович Сальников проявил себя как высококвалифицированным научным сотрудником, который для решения поставленной физической задачи способен создать численную модель, проанализировать полученные результаты и сделать выводы о возможных механизмах и явлениях. Личный вклад автора состоял в создании численных моделей, проведении расчётов, обработке, анализе и интерпретации результатов, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов для представления работы на конференциях.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В литературном обзоре данной работе приводится описание двух методов: PIC и LR. Позднее, во второй главе приводятся сравнения параметров плазменного возмущения, полученными тремя методами. Однако автором так и не представлены достоинства и недостатки разработанной модели, в сравнении с методами PIC и LR
2. Из текста диссертационной работы остаётся неясным, какие значения зарядов задаются пылевым частицам в начале расчёта. Равен ли начальный заряд тому, что рассчитывается из приближения OML для случая бесстолкновительной плазмы или берётся какое-то другое значение?
3. Насколько обоснованным является ограничение для вычисления дипольного момента системы из интеграла анизотропной гармоник p_1 , где расчёт производится до первого нуля функции?
4. Известно, что в цепочке пылевых частиц, положение каждой частицы определяется из взаимодействия пылевых зёрен друг с другом, которое в основном зависит от заряда. Однако в данной работе в качестве параметра задаётся межчастичное расстояние, которое принято постоянным.

Сделанные замечания не влияют на сделанные выводы и положения, выносимые на защиту, не снижают ценность полученных результатов и не снижают общий уровень диссертации.

Представленная диссертация является завершенным научным исследованием, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство.

Основные материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК и индексируемых в системах цитирования *Web of Science* и *Scopus*, а также обсуждались на российских и международных конференциях. Статьи правильно представляют основное содержание диссертации.

Автореферат отражает содержание диссертации и даёт полное представление о ней.

Диссертация «Исследование анизотропии плазмы вокруг пылевых частиц сферической и несферической формы» является научно-квалификационной работой высокого уровня и соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Михаил Владимирович Сальников, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник лаборатории 17.1 – плазменно-пылевых процессов ОИВТ РАН, эл. почта vasilyak@ihed.ras.ru, тел. +79168134438,
доктор физико-математических наук по специальности 01.01.08 – "Физика плазмы",
профессор



Василяк Леонид Михайлович

28.09.2020 г.

Подпись г.н.с., д.ф.-м.н., профессора Василяка Л.М. заверяю:

Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.,



Р.Х. Амиров

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Объединенный институт высоких температур Российской академии наук" (ОИВТ РАН), 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2. website: <http://jiht.ru/>; (495) 485-90-09, amirovravil@yandex.ru.