

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу *Сальникова Михаила Владимировича*

«ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПЛАЗМЫ ВОКРУГ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ И НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ»,

Представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Сальникова М.В. направлена на решение задачи обтекания твердого тела (пылевых частиц) сферической и эллиптической формы слабо ионизированной плазмой. Обтекание происходит в режиме больших чисел Кнудсена с учетом ненулевого заряда тела и процессов резонансной перезарядки ионов. Для плазмы принимаются параметры газового разряда низкого давления.

Поставленная перед диссертантом задача является многопараметрической. Для ее решения диссертант воспользовался методом численного моделирования с созданием собственной параллельной программы для комбинированной модели физики плазмы. В ней интегрируются уравнения для безмассовых электронов и кинетическое уравнение Больцмана для ионов. Нейтральный газ выступает как среда, в которой происходит перезарядка ионов. Они попадают на проводящее тело и самосогласованно меняют его заряд. Этот заряд может в десятки тысяч раз превышать заряд электрона.

Важность и **актуальность** этой задачи в научном и прикладном отношении определяется ее востребованностью в исследованиях процессов появления зарядов на поверхности космических аппаратов, находящихся в ближнем космосе, в проектировании станций на поверхности Луны, в практическом использовании плазмы холодного разряда в медицинских целях, для оптимизации электрофильтров очистки потоков газа от ультрадисперсных частиц и в других приложениях пылевой плазмы.

Научная новизна исследования состоит в использовании для решения комбинированной модели плазмы с учетом: а) столкновений ионов с нейтральными атомами, б) несферической формы тела, в) внешнего электрического поля.

Теоретическая и практическая **значимость результатов** данной диссертации состоит в описании взаимодействия между пылевыми частицами в пылевой плазме в статическом приближении, что является необходимым шагом для понимания причин существования пылевых кристаллов в электрических полях на длительных временах. Имея ясные представления о физике стабильных пылевых кристаллов, можно далее искать возможные причины разрушения кристаллической структуры в конкретных практических приложениях пылевой плазмы.

Достоверность полученных результатов обоснована проделанной методологической работой, отраженной в диссертации. Наиболее убедительно выглядит совпадение полученных в диссертации численных решений для средней дрейфовой скорости ионов в зависимости от напряженности электрического поля с известными литературными данными.

Личный вклад автора состоит в создании вычислительной модели динамики плазмы, проведении большого объема численных экспериментов, в обработке их данных, формулировании выводов и в участии в подготовке публикаций в международных журналах.

Диссертация с изложением основных результатов исследования на 166 страницах включает «Введение», четыре главы, «Заключение», «Список литературы» из 143 ссылок, 62 рисунка. «Введение» состоит из всех обязательных пунктов диссертации, среди которых Основные положения, выносимые на защиту. В первой главе приведен краткий литературный обзор, описание двух расчетных методов частиц-в-ячейке PIC и «линейного отклика» LR, результаты расчетов Patrick L. (2012г.) до- и сверхзвукового обтекания плазмой изолированного тела сферической формы, который демонстрирует формирование локального максимума (вейка) в электрическом потенциале за телом и достоинства каждого метода. В главе 2 описана численная модель частиц-в-ячейке вместе с двумя методами решения уравнения Пуассона через разложение пространственного распределения заряда по полиномам Лежандра и через использование фундаментального решения (функцию Грина). В расчетах найдены распределения потенциала вокруг тела на масштабах дебаевской длины. Полученные данные сведены в безразмерную зависимость дипольного момента ионного облака вокруг заряженного тела от внешнего электрического поля. Свои зависимости от поля получены для характерного значения потенциала в локальном максимуме (в вейке) и для заряда тела (уединенной пылевой частицы) сферической формы. В этой же главе кратко обсуждается применимость для описания плотности электронов распределения Больцмана. Глава заканчивается разделом, в котором приводятся сведения о параллельной версии написанной диссертантом программы. В главе 3 зависимости, аналогичные найденным в главе 2, получены для проводящего эллипсоида. Показано, что геометрические параметры входят в соотношение для дипольного момента в виде комбинации, выражающей емкость эллипсоида. В главе 4 приведены результаты расчётов самосогласованных пространственных распределений объёмного заряда и потенциала плазмы вокруг бесконечной цепочки сферических пылевых частиц. Важным результатом представляется зависимость заряда пылевой частицы от расстояния между пылинками.

Из положительных моментов диссертации Сальникова М.В. следует отметить впечатляющий объем проделанной вычислительной работы, самостоятельность в написании трехмерной по пространству параллельной программы для метода частиц-в-ячейке с двумя способами расчета электрического потенциала и публикационную активность.

Основные научные результаты по теме диссертации изложены в **9 научных статьях**, опубликованных в международных журналах с высоким рейтингом из перечня ВАК, индексируемых в международных базах WoS и Scopus.

По диссертации Сальникова М.В. имеются следующие замечания.

1. На странице 36 приведена нестационарная система уравнений математической модели. В то же время в диссертации решается стационарная задача. Итоговая

формулировка задачи в виде системы дифференциальных уравнений вместе с граничными условиями в диссертации отсутствует.

2. Используемая Сальниковым М.В. комбинированная модель плазмы взята без физического анализа ее применимости для пылевой плазмы. В комбинированной модели электроны описываются как безмассовая среда с распределением Больцмана для концентрации. Для ионов решается кинетическое уравнение. Для этой модели известно, что она работает в случае малых возмущений и солитонов докритической амплитуды (к примеру, Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков, 1979г. – стр.66 и стр.126-132). В статьях Сальникова М.В. с соавторами комбинированная модель использована внутри дебаевской сферы около пылевой частицы. Там потенциал оценивается в температуру электронов ([105], Фортон В.Е. и др. УФН, 2004, стр.498), которая в сотню раз выше температуры ионов. В этом случае для электронов и ионов должно применяться кинетическое уравнение, как это сделано Трубниковым Б.А. (Вопросы теории плазмы, т.1, 1963 год) и позднее другими авторами. На неприменимость модели с распределением электронов по Больцману внутри сферы Дебая около пылевой частицы обращено внимание в цитируемом диссертантом обзоре Фортова В.Е. [105], в разделе 2.2 «Электростатический потенциал вокруг пылевой частицы» (стр.505): «...распределения электронов и ионов в окрестности частицы оказываются неравновесными (небольцмановскими)». Обсуждение результатов расчетов, приведённое на страницах 85-87, больше связано с функцией распределения скоростей электронов. В слабоионизованной плазме разряда она отличается от распределения Максвелла. Поэтому не определена область, где физически обоснованы полученные в расчетах результаты. Однако, поскольку решаемая задача состоит в нахождении стационарных решений, то исключительно для них и на временах, связанных с динамикой ионов, принятое в диссертации описание электронов может оказаться хорошим начальным приближением. Это необходимый очередной этап в изучении пылевой плазмы. Нестационарные задачи с флуктуирующим зарядом пылинки и динамикой электронов могут стать следующими шагами в исследованиях диссертанта.
3. Численным методам «частицы–в-ячейке», широко используемым в задачах физики плазмы, в литературном обзоре уделена фактически одна 16–я страница. В диссертации отсутствует анализ современных работ в этой области. В то же время в Академгородке Новосибирска эти методы развивает вычислительная школа мирового уровня. В настоящее время в этой области продолжают исследования доктора наук Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Дудникова Г.И., Федорук М.П., Снытников А.Влад. и ряд молодых кандидатов наук. Из публикаций школы соискатель указал лишь книгу Григорьева Ю.Н., Вшивкова В.А., Федорука М.П. Численное моделирование методом частиц-в-ячейках, 2004г. В книге Белоцерковского О.М. Давыдова Ю.М., на которую

ссылается соискатель, изучается гидродинамический метод «крупных частиц». При близости названий метод частиц в задачах гидродинамики является принципиально иным численным методом, применяемым для уравнений с другими свойствами.

4. В книге Григорьева Ю.Н с соавторами (стр.42-51), также у Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц, 1987г., можно прочитать про разновидности метода «частицы–в-ячейке». По давно сложившейся классификации используемая Сальниковым М.В. разновидность метода частиц относится к NGP. Эта разновидность метода обладает повышенным уровнем флуктуаций и численных шумов нефизического происхождения. Численные шумы зависят от алгоритма расчета динамики частиц, самосилы, метода решения уравнения Пуассона, ядра и числа частиц, размера сетки и прочих вычислительных параметров. Значения этих параметров в диссертации не приведены, и их влияние не анализируется. Для оценки роли численных эффектов в получаемых диссертантом решениях и их точности полезно решить программой диссертанта тестовый пример. В качестве такого примера часто используется задача распада произвольного разрыва для комбинированной модели плазмы, решения которой приведены в книге Григорьева Ю.Н. с соавторами на стр. 217-227.
5. Для понимания реального быстродействия описанной в диссертации параллельной программы важно иметь решеную с ее помощью тестовую задачу. В качестве такого теста сравнения широко используется указанная выше в 4-м замечании задача. Для приведенных в диссертации на стр 51 параметров пылевой плазмы число частиц в дебаевской сфере оценивается в сто тысяч. Расчеты подобного числа частиц на параллельных компьютерах в настоящее время не вызывает вычислительных трудностей. Так, динамика на порядки большего числа электронов и ионов в полных кинетических моделях с ионизацией рассчитывается современными методами численного моделирования на ионные времена даже в магнитных полях. Как пример, в работе (Е.А. Берендеев, Г.И. Димов, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, М.П. Федорук Моделирование низкотемпературной многокомпонентной плазмы в ловушке-мишени, ДАН, 2015, Т.460, № 5, с.529-531) использовано свыше пяти миллиардов частиц для ионов и электронов.
6. В диссертации трехмерным по пространству кодом решаются в своем большинстве двумерные по пространству задачи. Это качественно увеличивает затраты вычислительных ресурсов и снижает достижимую точность, повышает уровень флуктуаций вычислительного происхождения.
7. Для текста диссертации хотелось бы видеть более тщательное редактирование – к примеру, на странице 2 глава 1 названа «Подходы к изучению плазмы вблизи пылевых частиц». В тексте на странице 11 глава 1 названа «Литературный обзор».

Несмотря на указанные недостатки, в целом диссертационная работа Сальникова Михаила Владимировича «ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПЛАЗМЫ ВОКРУГ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ И НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ», представляет законченное исследование по направлению вычислительное моделирование в физике пылевой плазмы. Тема работы актуальна, результаты работы востребованы для дальнейшего развития в теоретическом плане и в практических приложениях. Научные положения диссертации в своей области применимости достаточно обоснованы, выбранные численные методы адекватны поставленным задачам. Новизна результатов подтверждается их публикацией в ведущих международных журналах. Публикации диссертанта из списка литературы правильно отражают результаты исследований и выводы, изложенные в диссертации. В **Автореферате** правильно изложено основное содержание диссертации, выводы и защищаемые положения.

Таким образом, диссертационная работа Сальникова Михаила Владимировича «ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПЛАЗМЫ ВОКРУГ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ И НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ» соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (п.9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения
Российской академии наук»
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник (доцент)
630090, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д.5
Тел. 8(383) 3269-469, snyt@catalysis.ru

Валерий Николаевич

Снытников
2020 г.

Подпись Снытникова Валерия Николаевича заверяю

Ученый секретар ИК СО РАН, к.х.н.
Казанов М.О.

