

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского  
отделения Российской академии наук



Академик РАН

/Маркович Д.М./

"06"

мая 2024г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертационную работу Трухачёва Фёдора Михайловича  
«Взаимодействие солитонов акустического типа с заряженными частицами в плазме»  
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертационная работа Трухачёва Фёдора Михайловича посвящена теоретическому исследованию процессов взаимодействия нелинейных волн и солитонов акустического типа с заряженными частицами плазмы. Основное внимание уделено анализу электрических токов, индуцируемых солитонами в плазме, а также анализу процессов переноса вещества солитонами акустического типа. Теоретические результаты использовались для интерпретации известных экспериментальных данных. **Актуальность работы** связана с развитием физики нелинейных плазменных волн, в частности, с поиском взаимосвязи плазменных волн и процессов переноса. Развитие методов анализа плазменных волн и плазменной диагностики также является актуальной физической задачей. Результаты работы могут найти применение в современной физике плазмы, теоретической физике, астрофизике, термодинамике, физике конденсированного состояния и др.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Текст диссертации составляет 240 страниц, включая 66 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 311 наименований.

Во **введении** представлен краткий обзор по теме диссертации, обоснованы актуальность, научная новизна, научная и практическая значимость проблем и задач, решение которых изложено в диссертации, сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации содержит описание как традиционных, так и новых теоретических методов, используемых автором. К традиционным подходам относятся гидродинамические методы и одночастичное приближение. При этом, метод анализа пыле-акустических волн, учитывающий самосогласованность заряда пылевых частиц и содержащий только элементарные функции, является новым. В работе также представлен новый бесконтактный метод оценки радиуса Дебая. Описано новое физическое явление – ультрамедленные пыле-акустические солитоны. Полученные результаты легли в основу отдельных защищаемых положений.

**Вторая глава** посвящена исследованию электрических токов, индуцированных классическими (консервативными) солитонами акустического типа в однородной плазме без магнитного поля. Теоретически описано новое свойство солитонов, которое заключается в одностороннем переносе заряженных частиц электрическим полем уединенной волны. Под переносом заряженных частиц подразумевается сдвиг в направлении движения волны на расстояние до пяти радиусов Дебая. Показано, что механизм солитонного переноса вещества аналогичен механизму дрейфа Стокса. Более того, установлено, что солитонный перенос является предельным случаем дрейфа Стокса. Проведен детальный анализ электрических токов, индуцированных солитонами акустического типа в плазме, и показано, что они имеют структуру однополярных импульсов. В рамках модели холодной плазмы раскрыто влияние солитонов акустического типа на функции распределения заряженных частиц плазменного фона.

**Третья глава** диссертации содержит результаты по анализу взаимодействия диссипативных солитонов акустического типа с заряженными частицами плазмы. Главное внимание уделено пыле-акустической моде. В рамках гидродинамической модели плазмы и одночастичного приближения раскрыты свойства слабодиссипативных пыле-акустических солитонов. Установлены особенности динамики заряженных частиц, взаимодействующих с диссипативным солитоном. В частности, наличие диссипации приводит к появлению разнонаправленного движения частиц. Кроме того, в диссипативном случае наблюдалось упорядочивание траекторий частиц. В рамках одночастичного приближения рассчитана работа диссипативных сил, которая пропорциональна величине



производства энтропии при распространении диссипативных солитонов, рассчитана мощность тепловыделения. Полученные результаты позволяют провести оценки энергетического баланса для самовозбуждаемых плазменных волн и колебаний.

Также в третьей главе рассмотрен процесс рассеяния пылевых заряженных частиц плоским пыле-акустическим солитоном. Рассмотрен докритический случай, когда амплитуда солитона не превышает предел опрокидывания. Найдены особенности процесса рассеяния для консервативного и диссипативного случаев. Открыт и детально проанализирован новый колебательный процесс в плазме, индуцируемый диссипативными пыле-акустическими солитонами.

**Четвертая глава** раскрывает прикладные аспекты диссертационной работы. В частности, она содержит примеры интерпретации экспериментов по исследованию плазменных волновых явлений на основе теоретических результатов, изложенных в предыдущих главах. Представлено теоретическое описание экспериментов по исследованию волн в плазменно-пылевых структурах в разрядной плазме. Рассмотрены эксперименты, выполненные при комнатной температуре и в криогенных условиях (вплоть до температур 2К). На основе развитых теоретических методов и моделей рассчитаны ключевые параметры плазмы, такие как радиус Дебая, температура ионной фракции, электрического поля, концентрации заряженных частиц и др.

**В Заключении** диссертации перечислены основные результаты диссертационной работы.

Отметим наиболее важные результаты диссертации, которые имеют **научную значимость**: В диссертационной работе детально исследовано свойство плазменных солитонов акустического типа, которое заключается в одностороннем переносе (смещении) заряженных частиц, причем этим свойством нельзя пренебрегать при малых амплитудах волн. Предложен механизм этого явления. Установленный факт одностороннего переноса вещества солитонами имеет следствия: во-первых, солитоны должны возмущать функции распределения заряженных частиц (которые становятся несимметричными в областях плазмы, населенных солитонами), во-вторых, солитоны должны возбуждать электрические токи в плазме с ненулевой постоянной составляющей (солитонные токи). Таким образом, полученные результаты расширяют существующие представления о волновых плазменных явлениях.

В рамках диссертации представлены исследования, развивающие теорию диссипативных солитонов. В частности, приведены методики расчета величины тепловыделения, динамики заряженных частиц внутри профиля волны. Рассмотрен процесс рассеяния заряженных частиц диссипативным солитоном. Открыт новый тип колебательного процесса, индуцируемого диссипативными солитонами. Указанные результаты подтверждают научную значимость работы.

**Прикладная** значимость работы заключается в развитии методов плазменной диагностики и в интерпретации экспериментальных данных. В частности, в рамках представленных исследований был разработан новый подход для оценки радиуса Дебая в пылевой плазме, проведена интерпретация экспериментальных данных на основе созданных теоретических моделей. Кроме того, полученные результаты могут быть полезны при интерпретации экспериментальных данных, полученных с космических аппаратов из областей активной космической плазмы, в которой возбуждаются коллективные процессы за счет энергии внешних источников.

Материалы диссертации были **представлены** на многочисленных международных и российских научных конференциях и семинарах. По теме работы автор имеет **25 публикаций** в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах, в том числе **23** из перечня ВАК и входящих в перечень международных баз (SCOPUS, Web of Science). **Личный вклад автора** не вызывает сомнения

Представленные результаты исследований затрагивают сразу несколько областей науки, таких как физика плазмы, теоретическая физика, астрофизика, термодинамика. Полученные научные результаты будут полезны широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся созданием новых методов плазменной диагностики, ускорения заряженных частиц, а также исследователям космической и астрофизической плазмы. Представленные в диссертации исследования могут быть полезны для ученых из Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Института космических исследований РАН, Объединенного института высоких температур РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова, МГУ им. М.В. Ломоносова, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Московского физико-технического института и других научных организаций, проводящих исследования в области физики плазменных волн. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.



По тексту диссертации возникли следующие **замечания и вопросы**:

1. В диссертации все разрабатываемые модели и расчеты проведены для одномерного случая или плоской волны. При этом в работе не обсуждаются критерии применимости такого подхода к реальным природным и лабораторным экспериментальным ситуациям. Насколько применим такой подход к исследуемым в работе явлениям и в каких случаях необходимо дальнейшее развитие представленных моделей?
2. В связи с открытым в диссертации явлением переноса вещества солитонами возникают следующие вопросы: откуда берется энергия для переноса вещества, теряет ли солитон свою энергию (амплитуду) при переносе вещества, как происходит сохранение импульса в системе при смещении (центра масс) вещества в пространстве?
3. Помимо полученных аналитических выражений в предельных случаях большая часть диссертационной работы посвящена численным расчетам исследуемых явлений. При этом в тексте диссертации зачастую не приводятся подробности по используемым численным методам, параметрам дискретизации пространства, времени и граничных условий, критериям устойчивости схем и др.
4. При проведении сравнения результатов разработанной пыле-акустической модели и имеющихся экспериментальных данных по волнам в пылевой газоразрядной плазме в диссертации не уделено должного внимания влиянию распределения пылевых частиц по размеру в пылевом облаке, что особенно актуально для экспериментов с криогенной газоразрядной плазмой, описанными в Главе 4, где в пылевом облаке в процессе распыления диэлектрической вставки в разряде образуются частицы размерами несколько нанометров?
5. Как влияет естественный процесс флуктуации заряда пылевой частицы на полученные в диссертации результаты, ведь известно, что для частиц нанометрового размера флуктуация заряда может составлять до 100%.
6. В тексте диссертации присутствуют грамматические ошибки и опечатки, в частности, в Оглавлении в п.1.3.3., п. 4.2, п. 4.2.2. и в других местах.

Все перечисленные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения

ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 25.01.2024 г.), а ее автор Трухачёв Фёдор Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертационная работа была обсуждена и одобрена на заседании Секции 4 «Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук от 16 апреля 2024 г. Отзыв составил ведущий научный сотрудник лаборатории 4.1. Института теплофизики СО РАН, доктор физико-математических наук Сергей Андреевич Новопашин.

Ведущий научный сотрудник лаборатории 4.1. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, тел.: +7 (383) 333-10-95, sanov@itp.nsc.ru

д.ф.-м.н.

Новопашин Сергей Андреевич

«06» мая 2024г.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, д. 1, Тел. +7(383)330-90-40, sci\_it@itp.nsc.ru

к.ф.-м.н.

Макаров Максим Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, д. 1, Тел. +7(383)330-90-40, itp.nsc.ru, director@itp.nsc.ru