

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Медведева Юрия Васильевича

«Нелинейные явления при распадах разрывов плотности в бесстолкновительной плазме» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Как лабораторная, так и космическая плазма имеет неоднородное пространственное распределение плотности. Нередко такие неоднородности можно с хорошей точностью рассматривать как разрыв. Часто такие резкие неоднородности развиваются спонтанно в процессе движения или эволюции плазмы. Задачи о коллективном движении плазмы при распаде разрыва плотности представляют интерес для многих приложений. Важной особенностью возникающих движений является развитие разнообразных нелинейных явлений. В диссертации исследуются движения бесстолкновительной плазмы, инициированные распадом разрыва плотности плазмы, и рассматриваются свойства возникающих нелинейных явлений.

В первой главе обсуждаются основные уравнения, а также численные и аналитические методы их решения. Исходной моделью является нерелятивистское кинетическое описание компонент плазмы с помощью уравнения Больцмана-Власова. Взаимодействие частиц плазмы осуществляется только через среднее электростатическое поле. Большая часть диссертации посвящена плазме, состоящей из одного сорта ионов и электронов. Рассмотрено квазинейтральное движение бесстолкновительной плазмы с использованием методов газодинамики. Такое приближение характерно для описания крупномасштабной части течения плазмы. Такое течение описывается автором диссертации с помощью введенных для рассматриваемого случая инвариантов Римана. Путем перехода к переменным, порождаемым инвариантами Римана, получено линейное уравнение, позволяющее описать произвольное движение квазинейтральной плазмы. Найдено аналитическое решение для волны разрежения при любой температуре ионов. Получено аналитическое решение задачи Гурса для важного частного случая.

В главе получено уравнение для определения критических параметров стационарно движущейся волны в плазме с конечной температурой ионов. Критические потенциал, число Маха, плотности частиц и ионная потоковая скорость падают с ростом ионной температуры.

Вторая глава посвящена рассмотрению ионно-звуковых солитонов. Уравнения, описывающие динамику ионно-звуковых солитонов малой амплитуды, сводятся к уравнению Кортевега - де Вриза. В диссертации полные решения для ионно-звуковых солитонов сравниваются соответствующими аналитическими решениями для солитонов Кортевега - де Вриза и обсуждается их различие. Установлено, что произведение квадрата ширины солитона и его амплитуды, принимающее постоянное значение в солитонах Кортевега - де Вриза, быстро падает с ростом амплитуды ионно-звукового солитона. Изучено разделение зарядов в ионно-звуковом солитоне.

В главе рассмотрен важный вопрос о роли отраженных от солитона ионов. Показано, что доля таких ионов резко нарастает в небольшом диапазоне амплитуд вблизи критического значения для данного значения ионной температуры. За счет отражения ионов возникает торможение ионно-звуковых солитонов.

Полученные решения сравниваются с известными экспериментами. Рассчитанные значения ширины и скорости движения ионно-звукового солитона при соответствующей ионной температуре хорошо согласуются с экспериментами.

В **третьей главе** исследовано расширение электрон-ионной плазмы в вакуум. Всю область течения плазмы подразделяется на несколько характерных областей. В невозмущенную область распространяется волна разрежения, в которой плазма квазинейтральна. За этой областью находится область неквазинейтральности, где имеет место разделение зарядов (область положительного пространственного заряда). Область оканчивается ионным фронтом, за которым располагается область, где электронная плотность значительно превосходит плотность ионов (область электронного облака). Установлено, что граница между квазинейтральной и неквазинейтральной областями, а также ионный фронт движутся по определённым характеристикам системы квазинейтральных уравнений. Размер области неквазинейтральности увеличивается пропорционально времени, а сама область движется в сторону вакуума. Для области волны разрежения найдено аналитическое решение при произвольной температуре ионов. Область неквазинейтральности и ионный фронт описываются аналитическими формулами в случае плазмы с холодными ионами. Ионный фронт представляет собой разрыв плотности ионов, на котором электрическое поле принимает максимальное значение.

Из-за слабого нарушения условия квази-стационарности электронной функции распределения в области квазинейтральности возникает введенная в рассмотрение автором диссертации волна охлаждения электронной компоненте плазмы. Она тесно связана с обменом энергии между электронами и ионами, вызванном их взаимодействием через коллективное электрическое поле, и ускорением ионов на переднем фронте расширяющейся области квазинейтральности.

Найдено ряд аналитических зависимостей, описывающих потоки вытекающих из плазмы ионов, которые удобно использовать для диагностики плазмы.

В **четвёртой главе** исследуется расширение плазмы в плазму меньшей плотности. Подробно исследован случай плазмы с холодными ионами, который характеризуется тем, что в течении возникают хорошо определенные области, представляющие собой волну разрежения, платоподобную область и бесстолкновительную ударную волну. Особое внимание уделено процессу отражения ионов от волны большой амплитуды. Амплитуда растет с уменьшением начальной плотности плазмы в области, куда происходит расширение. Существует критическое значение этой плотности. Если она меньше некоей критической относительной плотности, то в течении возникают отраженные ионы. Оказывается, что при очень малой плотности плазмы, куда происходит расширение, форма фронта волны заметно меняется. Он принимает вид резкого разрыва, за которым следует однородная область, то есть течение становится похожим на соответствующее гидродинамическое течение сильно столкновительной плазмы. Причиной этого является появление бесстолкновительной диссипации за счет отражения ионов.

Увеличение начальной ионной температуры приводит к тому, что профиль течения приближается к монотонному распределению. Проведено сравнение данных численных экспериментов с данными двух реальных экспериментов в случае одинаковых температур ионов и электронов. Показано хорошее согласие расчетов с экспериментом.

Задачи с двумя начальными разрывами плотности рассматриваются в **пятой главе**. Первая задача - это задача о расширении в вакуум плоского слоя плазмы. Для этой задачи получено аналитическое решение, когда ионы холодные. Установлено, что течения, происходящие при разных пространственных размерах слоя, подобны. Поэтому решение можно записать в универсальном виде, пригодном для любого размера слоя при заданной температуре ионов. При решении задачи подробно рассмотрено взаимодействие волн разрежения.

Во второй задаче рассмотрено образование следа за быстро движущимся в плазме телом. При определенных условиях такая задача сводится к одномерной задаче заполнения

вакуумной полости в плазме. Именно последняя задача и рассмотрена автором диссертации. Показано, что на относительно небольшом расстоянии от тела течение имеет ламинарный характер с гладкими распределениями параметров и подобием течений, образующихся за телами разных размеров. В течении плазмы имеются встречные потоки ионов. В определенной области возникает двухпотоковая неустойчивость. Численное моделирование этого процесса демонстрирует образование ряда небольших областей пониженной плотности частиц, кавитонов. В результате, при переходе от ламинарной области к области неустойчивости возмущение плотности с гладкими распределениями величин преобразуется в ряд медленно движущихся кавитонов на фоне плазмы, параметры которой приближаются к своим невозмущенным значениям.

Третья задача посвящена изучению эволюции возмущения плотности частиц в виде «горба» конечного размера. Начальное возмущение распадается на два новых возмущения, распространяющихся в противоположных направлениях от центра начального возмущения. Каждое такое возмущения формируется как результат расширения плазмы в плазму меньшей плотности. Поэтому в плазме с холодными ионами по истечении некоторого времени оба возмущения содержат платоподобную область и бесстолкновительную ударную волну. Численное моделирование этой задачи показывает, что с течением времени бесстолкновительная ударная волна распадается на ряд упорядоченных в пространстве по амплитуде ионно-звуковых солитонов.

В **шестой главе** рассматриваются движения бесстолкновительной плазмы с отрицательными ионами. Установлено, что характер движения зависит от ионного состава и отношения начальных плотностей отрицательных и положительных ионов. Изучена задача о расширении такой плазмы в вакуум. В случае плазмы с холодными ионами расширение приводит к образованию волны, движущейся в невозмущенную область плазмы. В волне положительные ионы испытывают разрежение, а отрицательные - сжатие. За фронтом волны располагается платоподобная область с небольшими осцилляциями. В главе определены условия сверхзвукового движения волны, при которых волна может быть классифицирована как бесстолкновительная ударная волна разрежения. Эти условия подтверждены сравнением с реальным экспериментом. Основные параметры течения и профиль фронта бесстолкновительной ударной волны разрежения могут быть найдены из предложенной аналитической модели.

Показано, что в бесстолкновительной ударной волне разрежения возникает встречное движение положительных и отрицательных ионов. В результате в платоподобной области развивается двухпотоковая неустойчивость, которая постепенно распространяется по направлению к фронту волны. Неустойчивость характеризуется коротковолновыми осцилляциями, возникающими на фоне длинноволновой осцилляторной структуры. За счет дисперсии пространственная область неустойчивости ограничена. В результате в течении одновременно сосуществуют область ламинарного течения и область неустойчивости. Такого рода неустойчивость наблюдалась экспериментально в индукционном разряде в плазме с отрицательными ионами.

В главе также рассмотрено расширение в вакуум плоского слоя плазмы с отрицательными ионами. При этом движущиеся навстречу друг другу бесстолкновительные ударные волны разрежения встречаются в центре системы и в дальнейшем начинают взаимодействовать. Важным эффектом такого взаимодействия является опрокидывание фазовых кривых положительных и отрицательных ионов, которое приводит к образованию областей многопотокового движения. В этих областях наблюдается сильная неоднородность и резкие увеличения ионных плотностей. Их начальные значения оказываются превышенными во много раз. Число областей многопотоковости быстро возрастает со временем.

В главе также рассмотрено расширение в вакуум ион-ионной плазмы. Возникающие в таком процессе электрические поля значительно слабее, чем электрические поля в электрон-ионной плазме. Поэтому в ряде случаев процесс может быть описан формулами,

описывающими расширение в вакуум системы нейтральных частиц. В процессе расширения возникает волна охлаждения легких ионов.

В **заключении** представлены основные результаты проведенных исследований. В диссертации найдены решения некоторых важных задач физики бесстолкновительной плазмы, рассмотрены основные свойства нелинейных явлений, возникающих при распадах разрывов плотности плазмы. Решения, полученные с помощью численного моделирования, с хорошей точностью совпадают с соответствующими аналитическими решениями. Полученные решения сравнивались с известными экспериментальными данными, и было показано хорошее соответствие расчета и эксперимента.

Замечания. При самом внимательном чтении диссертации мне не удалось обнаружить недостатки работ автора диссертации, относящиеся к существу их содержания. Это объясняется, скорее всего, тем, что работы автора в данном направлении продолжались в течение почти 40 лет. При этом данная область исследований привлекала в свое время огромное внимание многих исследователей. Разными авторами было выполнено много других работ в этом направлении. Такое внимание к этим вопросам явилось гарантией надежности результатов и методов, рассмотренных в диссертации. Видимо, по этой причине замеченные мною недостатки носят характер только недостатков изложения. Приведу два таких недостатка диссертации.

Модель плазмы, характеризуемая уравнениями (1.2), и используемая автором, описывает огромный круг явлений в плазме. Упомяну тут лишь такие процессы как затухание Ландау для ионного звука, ленгмюровский коллапс, аномальное сопротивление и многое-многое другое. В тексте диссертации я не нашел никаких упоминаний об этом. При этом часть из этих явлений имеет, по крайней мере, косвенное отношение к рассмотренному автором диссертации кругу явлений. Я имею в виду волну охлаждения электронного газа и отражение ионов от ионно-звуковых солитонов. Конечно, в диссертации нельзя объять необъятное. Но какого-то упоминания это заслуживало бы.

Второе замечание такое. Фрагмент текста во втором абзаце раздела 3.1, начинающийся словами «Электроны имеют температуру...», и заканчивающийся словами «... вакуумную область.», содержит на мой взгляд очевидное противоречие. Только в дальнейшем, при более полной формулировке задач этой главы, становится ясным, что этот фрагмент просто очень неудачно написан и реальных противоречий в выборе начальных условий для этих задач нет.

Актуальность проведенных в диссертации исследований следует, в частности, из возможности использовать полученные результаты для практических приложений. Так решение задач о расширении плазмы в вакуум или в плазму меньшей плотности в классической постановке может представлять интерес для проводимых во многих научных центрах исследований ускорения ионов из плазмы, созданной с помощью лазеров. В частности, эволюция «горба» плотности конечного размера может служить удобной моделью лазерной плазмы.

Результаты изучения движений плазмы при распадах разрывов плотности могут быть полезными при интерпретации измерений параметров плазмы вблизи Луны, проводимых с помощью космических аппаратов. Здесь надо учитывать, что солнечный ветер обтекает Луну. Полученные в работе решения позволяют объяснить структуру возникающего следа, возбуждение волн и развитие неустойчивости.

Расширение плазмы с отрицательными ионами может происходить во многих лабораторных установках. Как следует из литературы, в последнее время значительный интерес проявляется к ион-ионной, и особенно, к парно-ионной плазме.

Отмеченные примеры научной и практической важности исследований процессов, происходящих при распадах разрывов плотности, а также возникающих при этом нелинейных явлений подтверждают необходимость изучения рассматриваемых ниже задач и их актуальность.

Научная новизна. В диссертации были предложены новые подходы к решению задач, введены и обоснованы новые определения и понятия, а также получены и обсуждены новые научные результаты.

В работе предложен метод описания движения квазинейтральной плазмы с применением инвариантов Римана. С его помощью получены новые результаты: найдено аналитическое решение для простых волн при любой температуре ионов, выведено линейное уравнение для описания произвольного движения квазинейтральной плазмы, изучена задача Гурса для такой плазмы и найдено её аналитическое решение в случае плазмы с холодными ионами.

Описан метод для определения профиля стационарно движущихся нелинейных структур в плазме с произвольной температурой ионов. Выведено уравнение для определения критических значений величин, характеризующих стационарно движущиеся структуры при конечной температуре ионов, и изучена их зависимость от ионной температуры.

При исследовании расширения плазмы в вакуум получено аналитическое решение задачи в области квазинейтральности при любой температуре ионов. Введено понятие границы области квазинейтральности и уточнено понятие ионного фронта, а также предложены формулы, описывающие их движение во времени, что позволило определить области применимости аналитических решений. Изучена область неквазинейтральности и найдено её аналитическое описание в случае плазмы с холодными ионами. Рассмотрена волна охлаждения, развивающаяся в лёгкой компоненте расширяющейся плазмы. Решена в законченном аналитическом виде задача о расширении в вакуум слоя плазмы с холодными ионами.

Рассмотрен механизм образования небольших областей пониженной плотности, «кавитонов», на нелинейной стадии двухпоточковой неустойчивости, развивающейся в следе за быстро движущимся в плазме телом. Показано, что бесстолкновительная ударная волна со временем трансформируется в цепочку ионно-звуковых солитонов, упорядоченных в пространстве по амплитуде.

При изучении расширения в вакуум плазмы с отрицательными ионами найдено, что в течении может возникать бесстолкновительная ударная волна разрежения, и определены условия её существования. В течении может образовываться ограниченная в пространстве область неустойчивости, определены условия её возникновения. Изучено расширение слоя плазмы, описаны последовательные стадии процесса и явление опрокидывания, приводящее к образованию областей многопоточкового движения с сильной неоднородностью. Впервые изучена задача о расширении в вакуум ион-ионной плазмы и рассмотрено образование волны охлаждения в расширяющейся плазме.

Научная и практическая значимость работы. В диссертации найдены решения ряда важных задач и обсуждены основные закономерности развития нелинейных явлений. Целесообразность практического использования полученных результатов видна из того, что они хорошо описывают соответствующие эксперименты.

Примененный в работе подход к изучению квазинейтрального движения бесстолкновительной плазмы, выведенное линейное уравнение для произвольного движения и полученные решения для простых волн могут быть использованы при изучении других задач. Результаты решения задач о расширении плазмы в вакуум или в плазму меньшей плотности могут найти применение в имеющих практическую направленность исследованиях ускорения ионов в лазерной плазме. Результаты могут использоваться в задачах об обтекании ионосферной плазмой искусственных спутников Земли или солнечным ветром Луны, при изучении таких явлений в космической плазме, как вспышки на Солнце.

Важность задачи о расширении плазмы с отрицательными ионами в вакуум видна, в частности, из того, что при этом трёхкомпонентный состав плазмы может быть нарушен в значительной области пространства, а в другой области может развиваться неустойчивость. Это надо учитывать при работе с такой плазмой. Изучение нелинейных движений ионной плазмы может быть полезным для понимания явлений, происходящих в электрон-позитронной плазме.

В работе предложен и опробован в численном эксперименте метод диагностики плазмы, основанный на измерениях ряда зависимостей для потока выходящих из плазмы ионов при её расширении. Метод не вносит возмущений в плазму и не сложен для практического применения.

С большими градиентами плотности плазмы исследователи имеют дело при изучении инерциального термоядерного синтеза, лазерной плазмы, ионных источников, газоразрядных устройств, некоторых астрофизических явлений. По таким направлениям ведутся работы в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Институте теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Институте космических исследований РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, НИЦ <<Курчатовский институт>>, ГНЦ РФ <<Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований>>, ВНИИ автоматики им. Н. Л. Духова и в других научных институтах. Во многих случаях для анализа и описания исследуемых явлений можно использовать представленные в диссертации результаты.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Всесоюзных, Всероссийских и Международных научных конференциях и на научных семинарах.

Публикации. Материалы диссертации основаны на научных публикациях автора. В список литературы включены работы автора: 1 монография, 25 статей в рецензируемых ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций, а также отдельные препринты и доклады. Всего автором по теме диссертации было опубликовано 7 препринтов (ИАЭ им. И. В. Курчатова, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН) и 32 доклада на Всесоюзных, Всероссийских и Международных научных конференциях.

Личный вклад автора. Диссертация обобщает результаты, изложенные в научных публикациях автора, написанных как в соавторстве с другими авторами, так и без соавторов. Основной вклад автора в совместно написанные работы состоит в том, что автор разработал программу численного моделирования плазмы по методу частиц в ячейке и проводил все численные расчеты для решения представленных задач.

Заключение. Диссертация представляет собой научно-исследовательскую работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты и разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Медведева Ю. В. «Нелинейные явления при распадах разрывов плотности в бесстолкновительной плазме» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор

Медведев Юрий Васильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составил главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (отдел №13), доктор физико-математических наук Сасоров Павел Васильевич. 127045, Москва, Миусская пл., д. 4. (495) 121-11-26. pavel.sasorov@gmail.com.



08/09/2016

/ Ученый секретарь ИПМ РАН кандидат физико-математических наук Маслов А. И., 127045, Москва, Миусская пл., д. 4. (499) 973-25-80, maslov@imamod.ru.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. 127045, Москва, Миусская пл., д. 4. (499) 978-13-14, office@keldysh.ru.