

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н.Лебедева

Российской академии наук

Член-корреспондент РАН

/Колачевский Н. Н./

«__» _____ 2016 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

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

В физике бесстолкновительной плазмы имеется целый ряд важных задач, которые могут рассматриваться как различные модификации задачи о распаде начального разрыва заданной величины. На практике конкретные задачи могут быть достаточно разнообразными и возникать, например, при исследованиях плазмы в экспериментальных установках для управляемого термоядерного синтеза, в плазме ионных источников, в лазерной и в газоразрядной плазме, а также в космической плазме. Существенной особенностью возникающих при этом движений является развитие нелинейных явлений.

Целью представленных в диссертации исследований является нахождение аналитических и численных решений ряда задач о течениях бесстолкновительной плазмы, порождаемых разрывом (разрывами) плотности частиц, и выявление на основе полученных решений свойств и закономерностей нелинейных явлений, включая вопросы генерации, эволюции и взаимодействия друг с другом нелинейных структур.

В диссертации изучалась задача о расширении в вакуум двухкомпонентной электрон-ионной плазмы, трёхкомпонентной плазмы с отрицательными ионами и ион-ионной плазмы. Рассматривалась задача о расширении плазмы в плазму меньшей плотности, задача об обтекании плазмой быстро движущегося тела и задача об эволюции сильного возмущения плотности плазмы. Решения сравнивались с экспериментальными данными и с результатами других исследователей.

В **первой главе** рассмотрен ряд общих вопросов, возникающих при изучении задач о движениях плазмы при распадах разрывов плотности, обсуждены исходные уравнения и методы их решений.

Найдено аналитическое решение для простых волн в бесстолкновительной квазинейтральной плазме в случае конечной температуры ионов, выведено линейное уравнение, с помощью которого можно описать произвольное движение квазинейтральной

плазмы и решена задача Гурса в законченном аналитическом виде для случая плазмы с холодными ионами.

Выведена система уравнений стационарного движения в плазме с произвольной температурой ионов и предложен метод её численного решения. Выведено уравнение для определения критических параметров волны в плазме при конечной температуре ионов. Установлено, что критические потенциал, число Маха, плотности электронов и ионов и потоковая скорость последних падают с ростом ионной температуры, а критическая скорость волны изменяется немонотонно.

Во **второй главе** рассматривается ионно-звуковой солитон. Его свойства в ряде случаев оказываются определяющими для рассматриваемых здесь процессов. В главе проведено сравнение точных решений для ионно-звукового солитона с аналитическими решениями для солитонов Кортевега - де Вриза и обсуждено их различие. Характерное для солитонов Кортевега - де Вриза постоянство произведения квадрата ширины на амплитуду не выполняется в ионно-звуковом солитоне. Последний характеризуется разделением зарядов, и пространственный размер области положительного заряда предложено принять за ширину солитона.

Найдено, что доля отражённых от солитона ионов при любом значении температуры ионов резко возрастает в относительно небольшом диапазоне амплитуд вблизи соответствующего критического значения. При этом указанная доля ограничена величиной в 4 процента. Показано, что температура ионов влияет на ионно-звуковой солитон двояким образом. Отражение ионов приводит к торможению волны, а тепловое движение - к уменьшению её амплитуды.

Продemonстрировано, что такие параметры солитона, как ширина и скорость движения, определённые из численных решений, хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными.

В **третьей главе** рассмотрено расширение плазмы в вакуум. Показано, что в течении плазмы можно выделить квазинейтральную область, область неквазинейтральности и область электронного облака. Граница между квазинейтральной и неквазинейтральной областями совпадает с определённой характеристикой системы квазинейтральных уравнений. Область неквазинейтральности отделена от области электронного облака ионным фронтом, движение которого также происходит по определённой характеристике. Со временем область неквазинейтральности смещается в сторону вакуума, а её размер увеличивается пропорционально времени. Представлено аналитическое решение для описания области квазинейтральности при произвольной температуре ионов. Получены формулы, описывающие область неквазинейтральности и ионный фронт. Показано, что на ионном фронте возникает разрыв плотности ионов, а электрическое поле принимает максимальное значение.

Продemonстрировано, что процесс сопровождается развитием автомоделной волны охлаждения в электронной компоненте плазмы. Обмен энергией между электронами и ионами происходит таким образом, что энергия электронов уменьшается в области волны охлаждения, а энергия ионов увеличивается в области волны разрежения.

Выведены формулы для энергетического распределения выходящих из расширяющейся плазмы ускоренных ионов и для зависимостей их полных энергии и числа от координаты точки измерения и времени измерения. Они могут использоваться для диагностических целей.

Четвёртая глава посвящена изучению свойств и закономерностей нелинейных движений плазмы при распаде конечного разрыва плотности. В случае плазмы с холодными ионами установлено, что при расширении плазмы в плазму меньшей плотности можно выделить характерные области движения, представляющие собой волну разрежения, платоподобную область и бесстолкновительную ударную волну. Основные параметры течения могут быть оценены с помощью простой аналитической модели. Найдено критическое значение отношения меньшей начальной плотности к большей начальной

плотности. Показано, что при отношении плотностей меньшем критического значения существенную роль играют отражённые ионы. При очень малом отношении плотностей за счёт отражения ионов фронт волны принимает вид резкого разрыва, за которым следует однородная область. С ростом ионной температуры происходит переход к монотонному распределению потенциала.

Проведено сравнение численных решений с результатами реальных экспериментов в случае одинаковых температур ионов и электронов и показано, что экспериментально наблюдаемые распределения параметров плазмы являются автомоделными и хорошо согласуются с данными численных экспериментов.

В **пятой главе** рассмотрены три важные задачи, каждая из которых характеризуется наличием двух разрывов плотности.

В первой задаче рассматривается расширение в вакуум плоского слоя плазмы. В случае плазмы с холодными ионами найдено аналитическое решение задачи. Продемонстрировано подобие течений, происходящих при разных пространственных размерах слоя. Это позволяет получить универсальное решение для любого размера слоя при заданной температуре ионов.

Во второй задаче исследован след за быстро движущимся в плазме телом. В следе на относительно небольшом расстоянии от тела формируется ламинарная область, характеризующаяся гладкими распределениями параметров и подобием течений, образующихся за телами разных размеров. В более далёкой от тела области следа за счёт взаимодействия встречных потоков ионов развивается неустойчивость, которая приводит к образованию ряда небольших областей пониженной плотности частиц, кавитонов. В результате гладкое возмущение плотности в ламинарной области при переходе в область неустойчивости дробится на кавитоны, которые медленно уходят на периферию, а в центре системы плотность частиц приближается к невозмущённому значению.

В третьей задаче рассматривается эволюция возмущения плотности частиц в виде <<горба>> конечного размера. Возмущение со временем трансформируется в два новых возмущения конечного размера, распространяющихся в противоположных направлениях от центра начального возмущения. В плазме с холодными ионами каждое новое возмущение содержит платоподобную область и бесстолкновительную ударную волну. Последняя с течением времени трансформируется в цепочку упорядоченных в пространстве по амплитуде ионно-звуковых солитонов. С ростом начальной ионной температуры амплитуды ионно-звуковых солитонов уменьшаются, и при больших температурах пространственные распределения величин становятся гладкими.

В **шестой главе** изучены возможные типы движения бесстолкновительной плазмы с отрицательными ионами и показано, что характер движения определяется ионным составом и отношением начальных плотностей отрицательных и положительных ионов. Исследованы основные закономерности расширения такой плазмы в вакуум. Установлено, что расширение плазмы с холодными ионами происходит в виде движущейся в невозмущённую область волны, в которой положительные ионы испытывают разрежение, а отрицательные - сжатие. За фронтом волны образуется осцилляторная структура, представляющая, в среднем, платоподобную область. Волна классифицирована как бесстолкновительная ударная волна разрежения и определены условия её существования, которые подтверждены сравнением с реальным экспериментом. Представлена аналитическая модель для определения основных параметров течения и профиля фронта бесстолкновительной ударной волны разрежения.

Показано, что при расширении плазмы в вакуум в электронной среде развивается волна охлаждения, которая характеризуется возникновением потока тепла и понижением температуры в направлении вакуумной области.

В численных экспериментах обнаружена неустойчивость, которая развивается и постепенно распространяется по осцилляторной области. Неустойчивость порождает коротковолновые осцилляции на фоне движущейся длинноволновой осцилляторной

структуры, и дисперсия ограничивает пространственную область неустойчивости. Подобная неустойчивость наблюдалась экспериментально в индукционном разряде. При высоких ионных температурах неустойчивость не развивается.

Изучено расширение в вакуум плоского слоя плазмы. Рассмотрено возникающее при этом взаимодействие бесстолкновительных ударных волн разрежения. Описано явление опрокидывания, приводящее к образованию областей многопоточного движения с сильной неоднородностью и пиковыми выбросами ионных плотностей, превышающими начальные значения во много раз. Показано, что число областей многопоточности быстро возрастает со временем.

Рассмотрено расширение в вакуум ион-ионной плазмы. Показано, что в ряде случаев процесс может быть описан формулами, полученными для расширяющейся в вакуум системы нейтральных частиц. Найдено, что при расширении такой плазмы возникает автомодельная волна охлаждения, проявляющаяся в постепенном понижении температуры легких ионов по мере увеличения автомодельной переменной.

Краткий итог представленных исследований можно сформулировать следующим образом. В диссертации получены решения ряда конкретных задач физики бесстолкновительной плазмы, а также выявлены и подробно изложены основные свойства и закономерности нелинейных явлений при распадах разрывов плотности. Полученные численные решения в определенных диапазонах параметров плазмы совпадают с соответствующими аналитическими решениями, как найденными ранее другими авторами, так и представленными автором данной работы. Сравнение решений, полученных в разных приближениях, широко используется в работе и подробно обсуждается. Найденные автором численные и аналитические решения сравниваются также с соответствующими экспериментальными результатами других авторов. Проанализированные экспериментальные данные хорошо соответствуют полученным решениям. Указанные факторы свидетельствуют о достоверности представленных результатов и обоснованности сделанных выводов и заключений.

По диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. Очевидно, что ценность теоретической работы тем выше, чем своевременней она используется для интерпретации экспериментов и чем больше число актуальных экспериментов, которые позволяет планировать и объяснять теория. К сожалению, основной экспериментальный материал, использованный автором для сравнения со своими моделями, получен десятки лет назад. Было бы желательно видеть сопоставление с более свежими экспериментальными работами. Такая возможность упущена, например, для такого направления исследований, как разлет и течения плазмы под действием лазерно-нагретых электронов в условиях взаимодействия интенсивных коротких лазерных импульсов со слоистыми мишенями.
2. В диссертации очень эффективно используется прием взаимного сопоставления и дополнения численной кинетической модели бесстолкновительных течений плазмы и аналитической модели бесстолкновительной гидродинамики. Поскольку последняя обладает существенно меньшей полнотой, следовало бы для каждой решенной в работе задачи четко формулировать количественные условия применимости гидродинамического приближения по параметрам плазмы, что почти не прослеживается в диссертации.
3. При прочтении описания разлёта плазмы конечной толщины в вакуум создается впечатление, что развитая теория говорит о волнах разрежения, идущих с границ плазмы внутрь, которые проходят друг через друга после их встречи в центре мишени. Физического доказательства этого в диссертации не просматривается. Не является ли более правильным с физической точки зрения считать, что, наоборот, происходит их отражение в центре. Ответ на этот вопрос могло бы дать изучение

прохождения или непрохождения частиц (из одной половины слоя в другую), формирующих сближающиеся возмущения плотности заряда, как результат нарушения квазинейтральности плазмы.

4. Для упрощения расчетов автор зачастую использует модельное (завышенное) значение отношения массы электрона к массе иона. Поскольку обсуждаются нелинейные эффекты, то неочевидным представляется пересчет пространственно-временных характеристик на реальное отношение масс для ряда решенных в диссертации задач. Следовало бы установить хотя бы оценочные рамки такого пересчета для приближенного количественного описания обсуждаемых эффектов для реальной электронно-ионной плазмы.
5. В задаче об адиабатическом остывании электронов при разлете плазмы в вакуум не дается зависимость темпа охлаждения электронов от параметров плазменного образования, а формула, показывающая линейное уменьшение энергии электронной компоненты со временем, очевидно, имеет ограничение по времени, которое должно обсуждаться. Свои результаты автор не сравнивает с полученными в работах других авторов, например, [82]-[87].

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы, оценивая которую в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует определяющий личный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем.

Актуальность проведенных исследований определяется не только научными, но и практическими приложениями. Эффект ускорения ионов при расширении плазмы в вакуум дал толчок к развитию целого направления в методах ускорения частиц. Исследования в этой области представляют практический интерес и в настоящее время проводятся во многих научных лабораториях. Интерес представляет расширение плазмы не только в вакуум, но и в плазму меньшей плотности. Эволюция локализованного выброса плотности конечного размера может служить качественной моделью лазерной плазменной мишени.

Результаты исследований движений плазмы, вызываемых разрывами плотности, могут быть полезными при объяснении процессов, проходящих в космической плазме. Так, например, интерпретация проводимых с помощью космических аппаратов измерений параметров плазмы вблизи Луны должна учитывать процесс обтекания Луны солнечным ветром. Решения соответствующих задач позволяет объяснить структуру возникающего следа, возбуждение волн и развитие неустойчивости.

Большой интерес представляет изучение плазмы с отрицательными ионами. В частности, расширение такой плазмы, обусловленное градиентом плотности частиц, может происходить во многих лабораторных установках. Литературные источники показывают, что всё возрастающий 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. С помощью этого метода получены новые результаты о движениях ионно-звуковых солитонов и бесстолкновительных ударных волн. 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, изучена область неквазинейтральности и найдено её аналитическое описание в случае плазмы с холодными ионами. 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. Также введено понятие автомоделльной волны охлаждения. Волна развивается в лёгкой компоненте расширяющейся плазмы. Используя это понятие, изучен обмен энергией между электронами и ионами. 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. Продемонстрирована трансформация бесстолкновительной ударной волны в цепочку упорядоченных в пространстве и по амплитуде ионно-звуковых солитонов.

При изучении расширения в вакуум плазмы с отрицательными ионами установлено, что в течении может возникать бесстолкновительная ударная волна разрежения, и определены условия её существования. Найдено, что 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 ионной плазмы и рассмотрено образование волны охлаждения в расширяющейся плазме.

Научная и практическая значимость работы. Значимость проведенных исследований определяется тем, что в диссертации найдены решения ряда важных задач и описаны основные закономерности развития нелинейных явлений. Целесообразность практического использования полученных результатов видна из того, что они хорошо описывают соответствующие эксперименты.

Новый 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. То же самое можно сказать и о предложенном методе определения профиля стационарно движущейся структуры.

Полученные в работе результаты о расширении плазмы в вакуум или в плазму меньшей плотности могут быть полезны для имеющих практическую направленность исследований о сильном ускорении 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. Эти явления надо учитывать при работе с такой плазмой. Изучение нелинейных движений

ион-ионной плазмы не только само по себе представляет интерес, но и может быть полезным для понимания явлений, происходящих в электрон-позитронной плазме. Такая плазма может находиться в некоторых астрофизических объектах.

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 теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша 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, причем большая часть работ опубликована им лично. Вклад автора в совместно написанные работы состоит в следующем.

- 1) Во всех работах автор проводил численные расчёты, включая разработку, отладку и тестирование программ для численного моделирования течений плазмы, проведение конкретных расчетов и обработку результатов
- 2) Автор участвовал в совместных обсуждениях постановок задач и результатов расчётов, а также в подготовке рукописей к публикации.

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.

Аннотация 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 24.09.2013г.

Отзыв составлен доктором физ-мат наук, проф. Бычковым В.Ю. и обсужден на семинаре импульсной высокотемпературной плазмы 26.05.2016 г. Отделения квантовой радиофизики.

Главный научный сотрудник,

Заведующий Сектором лазерно-плазменной физики высоких энергий

д.ф.м.н., проф.



/В.Ю.Бычков/

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Учёного совета Отделения квантовой радиофизики

27 мая 2016 г., протокол № 70

Председатель Ученого совета ОКРФ

д.ф.м.н., профессор



/А.А. Ионин/

Ученый секретарь ОКРФ



/А.Е. Дракин/