

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Медведева Юрия Васильевича "Нелинейные явления при распадах разрывов плотности в бесстолкновительной плазме", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Актуальность темы диссертации

Актуальность представленных в работе исследований следует из широкой распространенности течений плазмы с большими градиентами плотности. Важнейшими примерами являются лазерная и газоразрядная плазмы, плазма в экспериментальных установках для управляемого термоядерного синтеза. Ее изучение проводится во многих научных лабораториях мира. Главный интерес сосредоточен на возможности получить интенсивные потоки сильно ускоренных ионов, которые могут использоваться, в частности, для ионной имплантации, биологических и медицинских целей.

Эффект ускорения ионов при расширении плазмы в вакуум и в плазму меньшей плотности дал толчок к развитию таких исследований. Движение лазерной плазмы можно смоделировать, например, изучая эволюцию горба плотности конечного размера.

Результаты исследований представляют интерес при анализе динамики и корректном объяснении процессов, проходящих в космической плазме. Примером явлений, приводящих к появлению областей неоднородности с большими изменениями параметров плазмы, могут служить вспышки на Солнце, процессы в оболочках сверхновых. Изучение обтекания плазмой быстро движущегося тела может представлять интерес, в частности, при исследованиях с помощью космических аппаратов окололунного пространства. Плазма с отрицательными ионами представляет практический интерес и широко исследуется. Влияние процессов расширения такой плазмы могут быть существенными для времени ее существования в трехкомпонентном составе. Также большой интерес в настоящее время проявляется к ион-ионной плазме, и особенно, к парно-ионной плазме.

Приведенные примеры подтверждают научную и практическую важность исследований распадов разрывов плотности в бесстолкновительной плазме и возникающих при этом нелинейных явлений, а также необходимость их детального анализа и актуальность этих работ.

Цели и задачи диссертационной работы

Цели и задачи данной диссертационной работы состоят в разработке аналитических и численных моделей для описания течений бесстолкновительной плазмы, обусловленных разрывами плотности частиц, определении закономерностей рассматриваемых процессов с учетом нелинейных эффектов, генерации структур и их взаимодействия. В диссертации рассматривается задача о расширении плазмы в вакуум для случаев двухкомпонентной электрон-ионной плазмы, трёхкомпонентной плазмы с отрицательными ионами и ион-ионной плазмы.

Кроме того, изучались задача о расширении плазмы в плазму меньшей плотности, задача об обтекании плазмой быстро движущегося тела и задача об эволюции сильного возмущения плотности плазмы. Такие задачи возникают 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. Важной особенностью происходящих при этом движений является развитие нелинейных явлений, которые подробно рассмотрены в диссертации. Полученные аналитические и численные решения сравнивались с экспериментальными данными и с результатами работ других исследователей этой проблемы.

Новизна исследований, полученных результатов и выводов из них

Научная новизна. В работе проведены комплексные исследования процессов, происходящих при распадах разрывов плотности в бесстолкновительной плазме, включающие как численное моделирование, так и аналитическое рассмотрение. В ряде случаев численные решения служили основой для нахождения аналитических оценок. В диссертации введены некоторые новые определения и понятия и обосновано их использование, а также получены и обсуждены новые научные результаты.

В диссертации предложен метод описания квазинейтральной плазмы, который может быть использован не только для рассматриваемых задач, но и для других задач о движении квазинейтральной плазмы. На его основе найдено аналитическое решение для простых волн при любой температуре ионов, получено линейное уравнение для описания произвольного движения квазинейтральной плазмы, а также изучена задача Гурса для такой плазмы и изучено её аналитическое решение в случае плазмы с холодными ионами.

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 проанализирована их зависимость от ионной температуры.

Найдено аналитическое решение задачи о расширении плазмы в вакуум в области квазинейтральности для различных температур ионов, исследована область неквазинейтральности плазмы и получено её аналитическое описание в случае плазмы с холодными ионами. С помощью введенного определения границы области квазинейтральности установлена область применимости аналитического описания квазинейтральной области.

В работе показано, что в лёгкой компоненте расширяющейся плазмы развивается волна охлаждения. Используя это понятие, изучен обмен энергией между электронами и ионами. В законченном аналитическом виде решена задача о динамике расширения в вакуум слоя плазмы с холодными ионами.

В следе за быстро движущимся в плазме телом обнаружено образование небольших областей пониженной плотности (кавитонов), возникающих на нелинейной стадии развития двухпоточковой неустойчивости. Рассмотрено преобразование бесстолкновительной ударной волны в цепочку ионно-звуковых солитонов, упорядоченных в пространстве по амплитуде. Продемонстрировано прохождение цепочки солитонов через саму себя при отражении от стенки.

Новизна полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений, а их достоверность подтверждается корректностью поставленных задач, методов их исследования и решения, а также согласием результатов проведенных расчетов с результатами имеющихся экспериментальных данных.

Научная и практическая значимость проведенных в диссертации исследований определяются широким спектром возможных практических приложений в физике лабораторной и космической плазм, биологии, медицине и др.

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена использованием хорошо обоснованных математически методик расчетов, а также их сравнением с экспериментальными данными и результатами численного моделирования. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 1 монографии, 25 статьях в рецензируемых ведущих научных журналах, 7 препринтах и представлены в 32 докладах на Всесоюзных, Всероссийских и Международных научных конференциях по тематике диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация содержит Введение, шесть глав основного материала, заключение и список литературы. Общий объем работы 297 страницы, включая 138 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 255 наименований.

Во **Введении** проведено обсуждение темы исследований, обоснована ее актуальность, научное и практическое значения, определены цели работы, методики анализа нелинейной динамики рассматриваемых процессов, обсуждается новизна проведенных исследований, их научное и практическое значения, выносимые на защиту научные положения. Приведены данные о публикациях автора и его выступлениях на научных конференциях, кратко описано содержание глав.

В **первой главе** рассматриваются основные уравнения и методы их решения. Здесь обсуждается применение методов газодинамики к исследованию квазинейтральных течений, анализируются уравнения и решения, описывающие простые волны, произвольное движение плазмы и задачу Гурса (задачи с данными на характеристиках).

В главе выведено уравнение для описания стационарно движущихся нелинейных структур в плазме с произвольной температурой ионов и предложен метод для его численного решения. Выведено уравнение для определения критических значений величин, характеризующих такие структуры, рассмотрена их зависимость от ионной температуры.

Вторая глава посвящена изложению основных свойств ионно-звукового солитона. Солитонные решения появляются в ряде задач о распаде разрыва плотности плазмы. Здесь подробно изучен ионно-звуковой солитон в плазме с холодными ионами и определены его отличия от солитонов, описываемых уравнением КдВ.

В главе предложено физически обоснованное определение ширины ионно-звукового солитона, учитывающее пространственное разделение зарядов. Кроме того, здесь дана количественная оценка влияния отражённых ионов, определена их максимальная доля и установлены области их влияния на движение ионно-звукового солитона при разных ионных температурах.

Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными зависимостями и показано их хорошее согласие.

В **третьей главе** рассматривается расширение в вакуум двухкомпонентной электрон-ионной плазмы. Получено аналитическое решение задачи в квазинейтральном приближении при произвольной температуре ионов, проведено сравнение этого решения с результатами численного моделирования и установлена область его применимости.

Введено понятие границы области квазинейтральности и обоснован способ её определения. Подробно исследуется область, где квазинейтральность существенно нарушена и существует пространственное разделение зарядов. Описано движение ионного фронта.

Введено понятие волны охлаждения электронов при расширении плазмы в вакуум. Используя это понятие, рассмотрен процесс обмена энергией между электронами и ионами. В главе исследованы также переносы частиц и энергии, и обсуждена возможность использования полученных зависимостей для определения параметров исходной плазмы.

В **четвертой главе** рассматривается задача о расширении плазмы в плазму меньшей плотности. Дано подробное описание этого процесса при разных значениях величины скачка плотности и температуры ионов. В зависимости от этих параметров можно классифицировать возникающие в системе течения.

Исследуется формирование и движение бесстолкновительной ударной волны, а также эволюция осцилляторной структуры за фронтом волны. Для оценки основных параметров течения и расчёта структуры фронта волны предложена аналитическая модель. Показано, что существует критическое значение отношения меньшей начальной плотности к большей начальной плотности. При отношении плотностей меньшем критического значения существенную роль играют отражённые от волны ионы. Если это отношение очень мало, фронт волны за счёт отражения ионов принимает вид резкого разрыва. С ростом ионной температуры происходит переход к монотонным распределениям параметров.

Указано, что полученные для таких течений решения достаточно хорошо описывают известные экспериментальные зависимости.

В пятой главе рассмотрены три задачи, в каждой из которых имеется два начальных разрыва плотности плазмы. В первой задаче изучается расширение в вакуум слоя плазмы конечной ширины. В квазинейтральном приближении в случае плазмы с холодными ионами найдено решение этой задачи в законченном аналитическом виде.

Здесь также представлены результаты численного моделирования и проанализировано влияние ионной температуры на процесс релаксации слоя плазмы. Обсуждено подобие течений при разных значениях ширины слоя. Подобие позволяет получить универсальное решение, из которого нетрудно записать решение для любого размера слоя. Описано взаимодействие волн разрежения.

Во второй задаче рассмотрено затекание следа за быстро движущимся телом в разреженной плазме. Изучено взаимодействие возникающих потоков ионов и развитие неустойчивости, приводящей к образованию таких нелинейных структур, как дыры на фазовой плоскости ионов. Дырам соответствуют области пониженной плотности ионов (кавитоны).

Гладкое возмущение плотности в ламинарной области при переходе в область неустойчивости дробится на кавитоны, которые постепенно уходят на периферию. В центре системы плотность частиц приближается к невозмущенному значению.

В третьей задаче исследуется эволюция возмущения плотности, сосредоточенного в ограниченной области пространства. Показано, что со временем возмущение распадается на два новых возмущения, распространяющихся в противоположных направлениях от центра начального возмущения. Если ионы плазмы холодные, то оба возмущения содержат платоподобную область и бесстолкновительную ударную волну, которая с течением времени превращается в цепочку ионно-звуковых солитонов, упорядоченных в пространстве по амплитуде.

Показано, что с ростом начальной ионной температуры пространственные распределения величин становятся гладкими.

В шестой главе обсуждаются основные уравнения и типы движения плазмы с отрицательными ионами, а также изучается её расширение в вакуум. Расширение плазмы с холодными ионами происходит в виде движущейся в невозмущенную область волны, в которой положительные ионы испытывают разрежение, а отрицательные - сжатие. Волна классифицирована как бесстолкновительная ударная волна разрежения.

Установлены необходимые условия для её существования и проведено сравнение с реальным экспериментом. Выведены формулы, позволяющие оценить основные параметры течения. Показано, что за фронтом волны возникает двухпотоковая неустойчивость, которая порождает коротковолновые осцилляции на фоне движущейся длинноволновой осцилляторной структуры. Дисперсия ограничивает пространственную область неустойчивости. Подобная неустойчивость наблюдалась экспериментально в индукционном разряде. При высоких температурах ионов эта неустойчивость не наблюдается.

Изучено расширение конечного слоя плазмы с отрицательными ионами в вакуум и описано явление опрокидывания, которое приводит к образованию областей многопотокового движения с сильной неоднородностью и пиковыми выбросами ионных плотностей, превышающими начальные значения во много раз. Число областей многопотоковости быстро возрастает со временем.

В главе также рассмотрено расширение ион-ионной плазмы в вакуум. Здесь роль электрического поля заметно снижается, и нередко процесс может быть описан формулами, полученными для расширяющейся в вакуум системы нейтральных частиц.

Обсуждается формирование автомоделной волны охлаждения в среде легких ионов.

В целом, в диссертации изучен ряд важных задач физики бесстолкновительной плазмы, получены аналитические и численные решения, а также подробно рассмотрены основные свойства и закономерности возникающих нелинейных явлений. Численные решения с высокой точностью совпадают с соответствующими аналитическими решениями,

как найденными ранее другими авторами, так и представленными автором данной работы. Нередко результаты численного моделирования служат исходными положениями для аналитического рассмотрения. Полученные при таком комплексном подходе решения сравниваются также с соответствующими экспериментальными результатами других авторов причем экспериментальные данные хорошо соответствуют найденным решениям. Эти факторы свидетельствуют о достоверности представленных результатов и обоснованности сделанных из них выводов и заключений.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, из которых кратко можно выделить следующие.

В диссертации найдены численные и аналитические решения ряда важных задач, возникающих при исследованиях течений в бесстолкновительной плазме. Изучены основные закономерности динамики развития нелинейных явлений и генерации структур. Найденные в диссертации решения хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные. Некоторые представленные в работе результаты, такие как метод описания движения квазинейтральной плазмы или данные о влиянии температуры ионов и отраженных ионов на стационарное движение нелинейных структур, могут быть использованы при изучении других задач. Так решение задач о расширении плазмы в вакуум или в плазму меньшей плотности могут представлять интерес для исследования ускорения ионов в лазерной плазме. Результаты диссертации могут использоваться при изучении обтекания ионосферной плазмой искусственных спутников Земли или солнечным ветром Луны, а также при рассмотрении таких явлений в космической плазме, как вспышки на Солнце, нелинейные процессы в оболочках сверхновых и т.д.

В последнее время значительное внимание исследователей привлекает плазма с отрицательными ионами. Полученные в диссертации данные о движении такой плазмы с образованием бесстолкновительной ударной волны разрежения и данные о возможности развития неустойчивости 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. Последнюю можно моделировать с помощью ион-ионной плазмы.

В диссертации рассмотрена возможность диагностики плазмы, основанная на измерениях ряда зависимостей, характеризующих поток выходящих из плазмы ионов. Метод не вносит возмущений в плазму и не сложен для практического применения.

С большими градиентами плотности плазмы обычно имеют дело при изучении инерциального термоядерного синтеза, лазерной плазмы, ионных источников, газоразрядных устройств, некоторых астрофизических явлений. Исследования по таким направлениям проводятся в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институте космических исследований РАН, Институте теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша 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 в них явлений можно использовать представленные в диссертации результаты и методики расчетов.

В качестве **замечания** по диссертации можно указать на ряд грамматических погрешностей по ее тексту, которые однако не меняют общей положительной оценки данной работы.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты, полученные в научных публикациях автора, написанных как в соавторстве с другими авторами, так и без соавторов. В работах, написанных с соавторами, автор проводил все численные расчёты и участвовал в совместных обсуждениях постановок задач и результатов расчётов.

Выводы.

Диссертация представляет собой законченную 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 вполне обоснованы. Результаты диссертации прошли надежную апробацию на Всероссийских и Международных конференциях и семинарах. Они опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях мирового уровня. Имеется целый ряд возможных научных практических приложений результатов диссертации в физике лабораторной плазмы, в биологии, медицине, космической плазме, генерации потоков ускоренных ионов с требуемыми параметрами, обработке материалов и др.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Исходя из изложенного выше считаю, что диссертация "Нелинейные явления при распадах разрывов плотности в бесстолкновительной плазме", представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы, является законченной научно-квалификационной работой, 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 безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом федерального государственного
бюджетного учреждения науки Российской академии наук
Институт космических исследований РАН



Ерохин
Николай Сергеевич

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
Тел. 8-(495) 333-41-00
Моб. +7-(963)-925-14-64
e-mail: nerokhin@yandex.ru

Подпись Н.С. Ерохина заверяю, ученый секретарь
ИКИ РАН, д.ф.м.н.
8-(495) 333-20-45, zakharov@iki.rssi.ru



Захаров
Александр Валентинович