

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

Плазма, лабораторная или космическая, как правило, имеет неоднородное пространственное распределение параметров. Вблизи ее границ градиенты параметров плазмы могут быть достаточно большими. Большой градиент той или иной величины нередко с хорошей точностью можно рассматривать как ее разрыв. Конкретные задачи о движении плазмы, инициированном разрывом, достаточно разнообразны и возникают, 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. Практически всегда эволюция разрыва сопровождается развитием нелинейных явлений. Диссертация посвящена исследованию движений бесстолкновительной плазмы, вызванных распадом одного или двух разрывов плотности плазмы, и рассмотрению свойств и закономерностей возникающих нелинейных явлений.

В **первой главе** рассмотрены основные уравнения и методы их решения. Обсуждено применение методов газодинамики к изучению квазинейтрального движения бесстолкновительной плазмы. Получено аналитическое решение для волны разрежения при конечной температуре ионов, выведено линейное уравнение для произвольного движения и представлено его аналитическое решение для важного частного случая.

Во **второй главе** излагаются основные свойства ионно-звукового солитона, поскольку именно они в ряде случаев оказываются определяющими для рассматриваемых в диссертации процессов. Проводится сравнение точных решений для ионно-звукового солитона с аналитическими решениями для солитонов Кортевега - де Вриза и обсуждается их различие. Постоянство произведения квадрата ширины на амплитуду, характерное для солитонов Кортевега – де Вриза, не имеет места в ионно-звуковом солитоне. Показано, что в ионно-звуковом солитоне возникает разделение зарядов. Пространственный размер области положительного заряда можно принять за ширину солитона.

Рассмотрено влияние на движение ионно-звукового солитона отраженных ионов. Установлено, что доля отраженных от солитона ионов при любом значении температуры ионов не превышает четырех процентов и резко возрастает в относительно небольшом диапазоне амплитуд вблизи соответствующего критического значения. Отражение ионов тормозит волну.

Проведено сравнение полученных решений с известными экспериментами. Определенные в диссертации такие параметры солитона, как ширина и скорость движения, хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными.

В **третьей главе** исследовано расширение плазмы в вакуум. Представлено аналитическое решение для описания области квазинейтральности при произвольной температуре ионов. В случае плазмы с холодными ионами получены формулы, описывающие область неквазинейтральности и ионный фронт. На ионном фронте возникает разрыв плотности ионов, а электрическое поле принимает максимальное значение.

Установлено, что при расширении плазмы в вакуум в электронной компоненте развивается автомоделная волна охлаждения. Используя ее характеристики, можно

рассмотреть обмен энергией между электронами и ионами. Энергия электронов передается ионам. При этом энергия электронов уменьшается в области волны охлаждения, а энергия ионов увеличивается в области волны разрежения.

Исследовано энергетическое распределение выходящих из расширяющейся плазмы ускоренных ионов и определены зависимости полной энергии и числа этих ионов от координаты и времени. Эти зависимости можно использовать для диагностики плазмы.

В **четвёртой главе** изучается распад конечного разрыва плотности. Установлено, что существует критическое значение отношения меньшей начальной плотности к большей начальной плотности. Если отношение начальных плотностей меньше критического, то на движение плазмы существенное влияние оказывают ионы, отражённые от фронта бесстолкновительной ударной волны. При очень малом отношении плотностей доля отраженных ионов может быть достаточна для того, чтобы форма фронта волны заметно изменилась. В этом случае фронт принимает вид резкого разрыва, за которым следует однородная область.

При увеличении ионной температуры профиль течения приближается к монотонному распределению. Для случая одинаковых температур ионов и электронов имеются известные в литературе экспериментальные данные. Сравнение с этими данными результатов проведенных численных экспериментов показало хорошее согласие расчетов и реальных экспериментов.

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

В первой задаче изучается расширение в вакуум слоя плазмы конечной толщины. На начальном этапе в невозмущенную плазму с двух сторон движутся навстречу друг другу две волны разрежения. В дальнейшем происходит взаимодействие волн, которое в случае плазмы с холодными ионами может быть описано аналитически. Течение носит квазинейтральный характер и характеризуется одним пространственным размером – толщиной слоя. В таких условиях имеет место подобие течений, происходящих при разных пространственных размерах слоя. Используя это обстоятельство, можно найти универсальное решение задачи при любом размере слоя.

Во второй задаче изучается расширение плазмы с двух сторон в вакуумную полость. Такая задача возникает при рассмотрении обтекания плазмой быстро движущегося тела, например, искусственного спутника в ионосфере. Установлено, что в следе на относительно небольшом расстоянии от тела образуется ламинарная область с гладкими распределениями параметров. Здесь также наблюдается подобие течений, образующихся за телами разных размеров. Однако в далёкой от тела области за счет взаимодействия встречных потоков ионов развивается неустойчивость, приводящая к образованию ряда небольших областей пониженной плотности частиц, кавитонов. В результате гладкое возмущение плотности в ламинарной области при удалении от тела трансформируется в набор кавитонов. Параметры плазмы вне кавитонов оказываются близкими к невозмущенным значениям.

В третьей задаче изучается движение плазмы, инициированное начальным возмущением плотности частиц на фоне однородно распределенной плазмы. Плазма большей плотности в возмущении расширяется в фоновую плазму меньшей плотности в обе стороны. Со временем плотность плазмы в центре приближается к невозмущенному значению, то есть начальное возмущение распадается на два новых возмущения конечного размера, распространяющихся в противоположных направлениях. В плазме с холодными ионами каждое новое возмущение состоит из платоподобной области и бесстолкновительной ударной волны, которая постепенно трансформируется в цепочку упорядоченных в пространстве по амплитуде ионно-звуковых солитонов. С ростом начальной ионной температуры амплитуды ионно-звуковых солитонов уменьшаются, и пространственные распределения величин сглаживаются.

Шестая глава посвящена бесстолкновительной плазме с отрицательными ионами. Рассмотрены возможные типы движений. Характер движения зависит от ионного состава и

отношения начальных плотностей отрицательных и положительных ионов. Исследовано расширение такой плазмы в вакуум. Показано, что в случае плазмы с холодными ионами в невозмущенную область движется волна, в которой положительные ионы испытывают разрежение, а отрицательные - сжатие. За фронтом волны образуется платоподобная область с осцилляциями. Волна может быть названа бесстолкновительной ударной волной разрежения. В главе определены условия существования такой волны. Эти условия подтверждаются сравнением с реальным экспериментом. Здесь также представлена аналитическая модель, с помощью которой можно определить основные параметры течения и рассчитать профиль фронта волны.

В области плато с осцилляциями возникают встречные потоки положительных и отрицательных ионов, что приводит к развитию двухпотоковой неустойчивости. В результате возникают коротковолновые осцилляции в области, занятой быстро движущимися длинноволновыми осцилляциями. За счет дисперсии область неустойчивости оказывается ограниченной в пространстве. Такая же неустойчивость была обнаружена экспериментально в индукционном разряде.

Решена задача о расширении в вакуум плоского слоя плазмы с отрицательными ионами. Распространяющиеся в невозмущенную область слоя с обеих сторон бесстолкновительные ударные волны разрежения сталкиваются и взаимодействуют друг с другом. Возникает явление опрокидывания ионных фазовых кривых, в результате чего образуются области многопотокового движения с сильной неоднородностью. В узких областях ионные плотности достигают значений, во много раз превышающих начальные значения. Число областей многопотоковости быстро возрастает со временем.

Изучена задача о расширении в вакуум ион-ионной плазмы. Возникающие при этом электрические поля значительно меньше, чем электрические поля при расширении электрон-ионной плазмы. Поэтому в ряде случаев процесс может быть описан формулами, полученными для расширяющейся в вакуум системы нейтральных частиц. Описана автомодельная волна охлаждения, появляющаяся в среде более легких ионов, независимо от того, положительные это ионы или отрицательные.

В представленной **диссертации** даны решения ряда конкретных задач физики бесстолкновительной плазмы. Рассмотрены основные свойства и закономерности нелинейных явлений при распадах разрывов плотности. Полученные численные решения с высокой точностью совпадают с соответствующими аналитическими решениями, как найденными другими авторами, так и полученными автором. Сравнение решений, полученных в разных приближениях, широко используется в работе и подробно обсуждается. Численные и аналитические решения сравниваются с соответствующими экспериментальными результатами других авторов. Все экспериментальные данные хорошо соответствуют найденным решениям. Все это свидетельствует о достоверности представленных результатов и обоснованности сделанных выводов и заключений.

Актуальность представленных исследований видна из возможности их применения для практических приложений. В частности, результаты изучения процессов, происходящих при расширении плазмы в вакуум или в плазму меньшей плотности, могут быть использованы при исследованиях ускорения ионов в лазерной плазме. Такие исследования послужили развитию целого направления в методах ускорения частиц, представляют большой практический интерес и в настоящее время проводятся во многих научных лабораториях.

Закономерности движений плазмы, вызываемых разрывами плотности, могут представлять интерес при интерпретации проводимых с помощью космических аппаратов измерений параметров плазмы вблизи Луны. Здесь необходимо учитывать процесс обтекания Луны солнечным ветром. Полученные решения описывают структуру возникающего следа, возбуждение волн и развитие неустойчивости.

В настоящее время активно исследуются плазма с отрицательными ионами, ион-ионная плазма и парно-ионная плазма. В экспериментальных условиях практически всегда возникают области больших градиентов плотности. Их эволюция существенно влияет на распределение параметров плазмы. Для учета этого обстоятельства могут быть полезны результаты представленных исследований.

В целом, практическая важность рассматриваемых в диссертации задач о процессах, происходящих при распадах разрывов плотности, свидетельствует о необходимости их изучения и об их актуальности.

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

В работе рассматривается новый метод описания движения квазинейтральной плазмы. Этим методом получены следующие новые результаты: найдено аналитическое решение для простых волн при любой температуре ионов, выведено линейное уравнение произвольного движения квазинейтральной плазмы, исследована задача Гурса и получено её решение в законченном аналитическом виде в случае плазмы с холодными ионами.

Предложен метод расчета профиля стационарно движущейся волны в плазме с произвольной температурой ионов. 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. Предложено определение границы области квазинейтральности и уточнено определение ионного фронта, а также найдены формулы, описывающие их движение во времени. Исследована область положительного пространственного заряда и получено ее аналитическое описание в случае холодных ионов. Описана автомодельная волна охлаждения, развивающаяся в лёгкой компоненте расширяющейся плазмы. Используя это понятие, изучен обмен энергией между электронами и ионами. Впервые в законченном аналитическом виде решена задача о расширении в вакуум слоя плазмы с холодными ионами.

Изучено образование на нелинейной стадии двухпоточковой неустойчивости <<кавитонов>>, небольших областей пониженной плотности, в следе за быстро движущимся в плазме телом. Продемонстрирована трансформация бесстолкновительной ударной волны в цепочку упорядоченных в пространстве по амплитуде ионно-звуковых солитонов.

Показано, что при расширении в вакуум плазмы с отрицательными ионами в течении может возникать бесстолкновительная ударная волна разрежения, и определены условия её существования. Найдено, что в течении может образовываться ограниченная в пространстве область неустойчивости, установлены условия её возникновения. Изучено расширение в вакуум слоя плазмы с отрицательными ионами, 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 работе представлены решения ряда важных задач и описаны основные закономерности развития нелинейных явлений. Полученные результаты хорошо описывают соответствующие эксперименты.

Используемый в диссертации подход к изучению квазинейтрального движения бесстолкновительной плазмы, выведенное линейное уравнение для произвольного

движения, полученные решения для простых волн и задачи Гурса могут быть использованы при рассмотрении других задач.

Полученные в работе результаты могут быть полезны для имеющих практическую направленность исследований о генерации интенсивных потоков ионов из лазерной плазмы. Результаты могут представлять интерес для исследований обтекания ионосферной плазмой искусственных спутников Земли или солнечным ветром Луны, а также при изучении других явлений в космической плазме, например таких, как вспышки на Солнце.

Важность задачи о расширении плазмы с отрицательными ионами в вакуум видна, например, из того, что при расширении трёхкомпонентный состав плазмы может быть нарушен в значительной области пространства, а в другой области может развиваться неустойчивость. Такие явления надо учитывать при работе с плазмой с отрицательными ионами. Изучение нелинейных движений ион-ионной плазмы важно не только само по себе, но и может быть полезным для понимания явлений, происходящих в электрон-позитронной плазме.

В работе предложен простой метод диагностики плазмы, основанный на измерениях ряда зависимостей для потока выходящих из плазмы ионов при её расширении.

Большие градиенты плотности плазмы возникают 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, Объединённом институте высоких температур РАН, НИЦ <<Курчатовский институт>>, ГИЦ 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 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 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 во всех работах автор проводил численные расчёты, включая разработку, отладку и тестирование программ для численного моделирования течений плазмы, проведение конкретных расчетов и обработку результатов.

У меня есть замечание по главе 2, посвященной описанию ионно-звукового солитона в плазме. Автор показывает, что численное решение для солитона заметно отличается от известного аналитического решения уравнения Кортевега – де Вриза. Делается вывод, что влияние теплового движения ионов проявляется в постепенном уменьшении амплитуды солитона со временем и замедлении его движения. Кроме того, позади волны возникает осцилляторная структура. Этот вывод наводит на аналогию с распространением слабой ударной волны. Фронт ударной волны описывается обобщенным уравнением Бюргерса, учитывающим как нелинейность, так и дисперсию и затухание из-за вязкости среды.

Впереди идет солитон, а замыкает фронт осцилляторная линейная волна. Картина распространения описывается простыми аналитическими формулами. Эта аналогия наводит на мысль, что и задачу распространения ионно-звукового солитона, обсуждаемую автором диссертации, можно свести к аналитически решаемому обобщенному уравнению Бюргерса. Наконец, на фронте ударной волны между главным солитоном и осцилляторной волной имеются более слабые солитоны. Может быть, они есть и в ионном звуке?

Указанное замечание не влияет на общую положительную оценку диссертационной работы.

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.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н., профессор кафедры
теоретической физики МФТИ



Крайнов Владимир
Павлович

141700, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д.9
8(495)408-75-90, vpkrainov@mail.ru

Ученый секретарь МФТИ

141700, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д.9
8(495)408-45-54, info@mipt.ru



Скалько Юрий Иванович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ)

141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9
8(495)408-45-54, info@mipt.ru