

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Расковалова Антона Александровича «Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 Теоретическая физика.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Расковалова А.А. посвящена аналитическому описанию распространения нелинейных возбуждений в магнитных системах и периодических структурах, обладающих периодической или спиральной симметрией. Данные виды симметрии достаточно распространены как в ферромагнитных, так и в антиферромагнитных материалах. Диссертация сфокусирована на материалах с полосовыми доменными структурами и хиральных магнетиках. Аналитическое описание спиновых возбуждений в таких материалах сталкивается с большим количеством трудностей в силу значительной нелинейности постановки задач. В последнее время получены численные решения ряда подобных задач с использованием пакетов для микромагнитного моделирования. Однако интегрирование уравнений и получение аналитического решения остается актуальной задачей, так как обладает большей общностью по сравнению с численным.

Одной из особенностей рассматриваемых систем является возможность возникновения солитонов. Исследование солитонов позволяет получить большой набор данных о характеристиках среды, в которых они возникают. Солитоны представляют собой локализованные волны, способные распространяться в конденсированных средах и сохранять свою форму после взаимодействия с другими возбуждениями. Это их свойство активно используется при разработке новых устройств электроники для передачи информации. Энергопотребление таких устройств существенно ниже традиционной электроники.

Распространение солитонов хорошо изучено в однородных средах. Однако реальные магнетики содержат неоднородности. Случайные примеси приводят к рассеиванию солитонов. Тогда как изменения, вносимые периодическими структурами, носят более сложный характер и требуют дополнительных исследований. Также недостаточно исследованными остаются взаимодействия нелинейных возбуждений со свободной поверхностью системы. Данный вопрос актуален в силу ограниченного размера реальных материалов.

Таким образом результаты диссертационной работы актуальны для развития новых направлений электроники и имеют прикладное значение.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертация содержит 241 страницу, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

В первой главе рассмотрены солитонные решения для одномерного случая модели Ландау – Лифшица для легкоосного ферромагнетика с полосовой доменной структурой. Выполнен анализ устойчивости линейных мод. Получен спектр линейных мод полосовой доменной структуры. Решена задача аналитического описания солитонов в полосовой доменной структуре. Для этого применена процедура «одевания» затравочного решения. Получено решение задачи Римана при наличии солитонов в доменной структуре. Рассмотрено взаимодействие солитонов в доменной структуре. Изучено поведение солитонов вблизи границ области их существования.

Во второй главе рассмотрены солитоны и диспергирующие волны в доменной структуре двухосного ферромагнетика. Выписаны основные уравнения и проведен анализ устойчивости доменной структуры в линейном приближении. Предложена процедура интегрирования модели Ландау – Лифшица двухосного ферромагнетика с использованием вспомогательной линейной системы и функции Йоста. Получено односолитонное решение задачи Римана. Рассмотрены асимптотические разложения и законы сохранения. Получено линейное интегральное уравнение для расчета нелинейных диспергирующих волн в отсутствие солитонов. Проведен сравнительный анализ физических характеристик неподвижных и движущихся солитонов. Рассмотрена динамика солитонов вблизи границы спектра бесщелевых мод доменной структуры.

Третья глава посвящена исследованию нелинейной динамики полубесконечного ферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость» и хирального ферромагнетика. Предложен подход к интегрированию модели Ландау – Лифшица для полуограниченного ферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость» методом изображений. Выполнено интегрирование уравнения Ландау – Лифшица для легкоплоскостного ферромагнетика на полуоси. Исследовано взаимодействие солитонов с границей образца. Изучено отражение волн поворота намагниченности от границы. Исследовано взаимодействие бризера с границей образца. Проведено

аналитическое описание солитонов полуограниченного ферромагнетика с геликоидальной структурой.

В четвертой главе рассмотрены бризеры и двухкинковые состояния в спиральной магнитной структуре. Для решения задачи использована модель sine-Gordon для спиральной структуры и процедура, примененная в предыдущих главах. Получен спектр нелинейных возбуждений спиральной структуры. Рассмотрена нелинейная динамика комплекса из двух кинков в магнитной спирали. Проведен анализ бризерного возбуждения. Рассмотрено взаимодействие бризера с отдельной доменной стенкой. Изучено поглощение СВЧ-мощности спиновыми волнами и бризерами. Исследована возможность формирования солитонов в спиральной структуре. Полученные результаты применены для аналитического описания солитонов электрической поляризации в мультиферроиках.

В Заключение обобщены основные результаты диссертационного исследования.

Следует отметить целостность текста диссертации как на уровне постановки задач, так и поиска их аналитических решений. Изложение материала в диссертации математически строгое, все выводы обоснованы.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность основных выводов и положений

Основные положения и выводы работы являются обоснованными, они базируются на физически обоснованных теоретических моделях, с применением метода обратной задачи рассеяния, хорошо зарекомендовавшего себя для подобного вида задач, получением явных решений и сопоставлением их с известными ранее результатами в предельных случаях. Все дифференциальные уравнения и их решения подробно обсуждаются в диссертации и обосновываются с физической точки зрения.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 21 статье в журналах, включенных ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов и индексируемых в Российских и международных базах цитирования, а также в 21 тезисе докладов на Всероссийских и международных конференциях.

Новизна исследований и полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна результатов диссертации состоит в получении ряда результата, наибольший интерес из которых представляют следующие:

1. Получены новые точные решения одной из базовых моделей магнетизма – модели Ландау – Лифшица для ферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось», описывающие солитонные возбуждения на фоне периодического основного состояния – полосовой доменной структуры. Для получения данного решения применен подход, состоящий в формулировке задачи Римана на двулистной римановой поверхности, топологически эквивалентной тору, что позволило получить полное решение задачи в терминах эллиптических функций Якоби.

2. Получен детальный анализ прецессионных солитонов в доменной структуре легкоосного ферромагнетика. Показано, что наличие солитонов приводит к макроскопическим сдвигам структуры.

3. Исследован характер вырождения солитонов в доменной структуре ферромагнетика с анизотропией типа легкой оси вблизи границ области их существования. Выявлено два выделенных случая, в которых солитоны трансформируются в неподвижные апериодические модуляции структуры.

4. Найдены новые точные решения, описывающие отражение движущихся солитонов от границы ферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость». Представлен анализ взаимодействия с границей легкоплоскостного ферромагнетика движущихся волн поворота и бризеров при полном, либо частичном закреплении спинов на границе образца. Показано, что легкоплоскостная анизотропия исключает формирование неподвижных приграничных солитонов.

5. Впервые найдены и проанализированы точные решения модели полубезграничного хирального ферромагнетика, описывающие взаимодействие солитонов с его границей.

6. Проведен анализ бризеров и комплекса из двух кинков, встроенных в периодическую решетку доменных стенок (кинков) геликоидальной магнитной структуры в рамках модели sine-Gordon . Исследовано взаимодействие двух движущихся кинков друг с другом и с доменными стенками структуры в зависимости от соотношения направлений их хиральностей. Выявлен специфический сценарий разрушения бризера при условии, когда скорость движения бризера как целого превышает фазовую скорость распространения его пульсаций.

Научная значимость полученных автором диссертации результатов

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии общей теории интегрирования уравнений нелинейной математической физики и ее применении в исследовании процессов перемангничивания доменной структуры при сильных внешних воздействиях.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы при планировании экспериментов по обнаружению солитоноподобных возбуждений в доменных структурах одноосного и двухосного ферромагнетиков, в геликоидальной структуре магнетиков без центра инверсии и циклоидальной структуре мультиферроиков. Полученные солитонные решения могут применяться в наноустройствах при обработке и хранении информации.

Исследования, проведенные в диссертации поддержаны Фондом «Династия» (2012-2013 гг.), Стипендией Президента РФ для молодых ученых СП-6342.2013.1. (2013-2015 гг.), проектом УрО РАН №15-8-2-7, грантом РФФИ №18-32-00143 (2018-2019 гг.), проектом РНФ 19-72-30028 (2024 г.).

Замечания по работе

1. В главе 1 на странице 56 утверждается, что «При прохождении солитона через каждую доменную стенку структуры проекция поля в его центре меняет знак на противоположный.». Необходимо пояснить как при этом изменяется энергия солитона. Солитон «опрокидывается» не мгновенно. Каков характерный промежуток времени этого изменения?

2. В главе 1 несколько раз утверждается, что солитон может служить зародышем перемангничивания. Необходимо указать точные физические условия, при которых этот процесс происходит.

3. В главе 2 (страница 90) для коэффициентов $w_{1,2,3}$ используется степенное разложение по параметру ε . При этом рассмотрение ограничивается линейными слагаемыми в разложении. Можно ли провести оценку величины квадратичных слагаемых и слагаемых более высоких степеней, учитывая, что дальнейшие вычисления также строятся в виде степенных рядов по этому параметру?

4. На рисунке 2.4 (стр. 108) представлена зависимость скорости солитона от параметра ρ . Необходимо пояснить какими физическими причинами обусловлен резкий рост скорости солитона при приближении параметра к величине K . Из решения следует, что скорость может

увеличиваться до бесконечности. Как это согласуется с законом сохранения энергии?

5. В главе 3 (стр. 146) показано, что отражение от свободной поверхности приводит к продольным колебаниям размера солитона. Необходимо пояснить, в каких пределах изменяются размеры солитона и как это сказывается на его движении.

6. Следует отметить незначительные ошибки в оформлении, связанные с громоздкими формулами.

Заключение

В целом, несмотря на указанные замечания, представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая может рассматриваться как научное достижение, состоящее в существенном вкладе в развитие теории нелинейных волновых явлений в неоднородных средах.

Диссертация Расковалова Антона Александровича «Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой» является законченным научным исследованием, обладающим научной новизной и практической значимостью, что соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 18.03.2023 г), а её автор – Расковалов Антон Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 Теоретическая физика.

Официальный оппонент: Профессор кафедры «Физика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», д.ф.-м.н., профессор

 Сергей Викторович Белим
12.09.25

Рабочий почтовый адрес: 644050, г. Омск, пр. Мира 11

Рабочий телефон: (3812) 65-22-92

e-mail: belimsv@omgtu.ru

Докторская диссертация защищена по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Подпись профессора Белима Сергея Викторовича заверяю
Ученый секретарь ФГАОУ ВО ОмГТУ Немцова А.Ф.

