

Отзыв официального оппонента

Алфимова Георгия Леонидовича

на диссертацию Расковалова Антона Александровича

«Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. «Теоретическая физика».

Актуальность темы диссертационной работы. Периодические магнитные структуры, такие как полосовые домены (чередующиеся полосы с противоположным направлением намагниченности) и спирали (в которых вектор намагниченности пространственно «закручивается») — являются основным состоянием многих реальных материалов, используемых в технике, от постоянных магнитов до сложных мультиферроиков. В частности, спиральные структуры, стабилизированные взаимодействием Дзялошинского–Мории, обнаружены как в металлах, так и в диэлектриках и полупроводниках. Поэтому понимание физики этих структур является ключевым условием для создания материалов с новыми свойствами, полезными для инженерных приложений.

Динамика намагниченности в магнитных материалах такого типа феноменологически описывается уравнениями Ландау – Лифшица (ЛЛ). Эти уравнения являются существенно нелинейными, что сильно затрудняет их аналитическое исследование. Большинство доступных точных решений получено для идеализированных случаев, например, для бесконечного однородного материала. Это сильно ограничивает возможности предсказывать поведение реальных систем, где присутствует неоднородность.

Известно, что уравнение ЛЛ допускает решения типа солитонов — особых устойчивых локализованных возбуждений, которые ведут себя подобно частицам. В контексте магнетизма, солитоны проявляются как доменные стенки, уединенные домены и пульсирующие волны намагниченности (бризеры). Именно солитоны во многом определяют кинетические, термодинамические и транспортные свойства материалов при сильных внешних воздействиях (например, в мощных магнитных полях или при сверхбыстрых процессах перемагничивания). Таким образом, изучение солитонов — это изучение основных "строительных блоков" и переносчиков энергии в нелинейной магнитной среде.

Из-за указанных аналитических трудностей в последние годы фокус исследований сместился в область численного моделирования. Однако у численных методов есть свои недостатки: они могут показывать *что* происходит, но не всегда дают глубокое понимание того *почему* это происходит. Аналитическое решение, даже для упрощенной модели, раскрывает внутренние связи, скрытые симметрии и позволяет предсказать поведение системы в широком диапазоне параметров без трудоемких расчетов для каждого конкретного случая.

В данной работе предлагаются точные аналитические решения для двух сложных и практически значимых ситуаций, которые до последнего времени оставались слабоизученными:

Во-первых, в работе исследуются солитоны на нелинейном периодическом фоне. Речь идет о солитонах, "встроенных" в уже существующую доменную или спиральную структуру. Это требует решения уравнения ЛЛ с учетом фона, который сам по себе является сложной нелинейной структурой.

Во-вторых, в работе исследуются солитоны в ограниченных системах. Изучение того, как нелинейные возбуждения (солитоны) взаимодействуют с границей материала, критически важно для понимания физики реальных устройств.

Из сказанного следует, что работа, безусловно, является актуальной, при этом она сочетает в себе фундаментальную строгость (получение точных решений) с практической значимостью (описание реальных магнитных систем).

Характеристика содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, а также приложения, в котором описываются некоторые технические детали.

Во введении автор описывает в целом круг задач, которым посвящена его работа, формулирует её цели и задачи, представляет положения, выносимые на защиту, обсуждает теоретическую и практическую значимость исследования, приводит сведения об апробации результатов.

В первой главе диссертант рассматривает задачу о возбуждениях в ферромагнетике с анизотропией типа «легкая ось». Основные результаты главы связаны с построением решений уравнений ЛЛ, которые представляют собой солитоны на периодическом фоне. Для нахождения этих решений автор использует процедуру «одевания» частных решений уравнения ЛЛ с помощью задачи Римана на торе. Анализируются свойства этих решений, в частности, показывается, что взаимодействие солитонов в этой модели является упругим. Кроме того, рассматриваются возможности генерации этих нелинейных объектов.

Во второй главе рассматриваются нелинейные возбуждения, встроенные в доменную структуру, с учетом магнитостатических взаимодействий в рамках более реалистичной модели ферромагнетика с двухосной анизотропией. Здесь также строятся решения соответствующей версии уравнения ЛЛ, описывающие солитоны и диспергирующие волны в физически выделенной доменной структуре.

Если в первых двух главах решения уравнения ЛЛ считались определенными на всей числовой прямой (магнитная среда считалась бесконечной в обе стороны), то **в третьей главе** рассматривается задача об описании солитонов и спиновых волн в полуограниченном ферромагнетике с анизотропией типа «легкая плоскость». Эта

задача представляется существенно более трудной, так как процедура «одевания» предполагает, что решение определено на всей числовой оси. Вместе с тем автору удалось свести данную задачу к задаче о бесконечной магнитной среде, в предположении некоторой симметрии структуры. Таким образом, удалось получить полное аналитическое описание мультисолитонов и диспергирующих волн в полуограниченном хиральном ферромагнетике с легкоплоскостной магнитной анизотропией.

Четвертая глава посвящена рассмотрению нелинейных волн на фоне спиральных структур ферромагнетиков. Предполагается, что спиральная структура, имеющая вид бесконечной цепочки кинков, является бесконечно-протяженной, находится в постоянном магнитном поле, а анизотропия имеет тип «легкая плоскость». Для построения нелинейных структур используется модель синус-Гордона, решения которой также могут быть построены методом «одевания». Построены решения типа кинков (дополнительных, на фоне спиральной структуры), описаны возможные типы их взаимодействия, а также решения бризерного типа. Выявлены возможные способы генерации солитонов (движущихся кинков и неподвижных бризеров) в такой структуре.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность. Все результаты работы получены как точные аналитические решения признанных и фундаментальных моделей теоретической физики (уравнений Ландау-Лифшица и синус-Гордона). Применение строгого метода обратной задачи рассеяния и его модификации – процедуры «одевания» – обеспечивает выводам математическую строгость. Достоверность аналитических результатов обеспечена, в частности, корреляцией с известными пределами (например, переходом к однородному фону). Помимо этого автором проводилось сравнение аналитических результатов с численным счетом.

Практическая значимость исследований. Работа содержит не только абстрактные теоретические построения, но и конкретные рекомендации и предсказания, которые могут быть проверены экспериментально. В частности, предложены способы возбуждения солитонов (например, с помощью импульсного магнитного поля определенной конфигурации), указаны диагностические признаки для обнаружения солитонов (например, расчетный спектр поглощения СВЧ-мощности, смещения доменной структуры, фиксируемые магнитооптическими методами). Таким образом, результаты работы могут быть использованы для планирования реальных экспериментов по исследованию динамики намагниченности и перемангничивания.

Недостатки работы.

1. В главе 4 приведены точные решения модели синус-Гордона (4.33) для комплекса из двух кинков и (4.36) для бризера в спиральной магнитной

структуре. Несмотря на последующий сложный анализ, эти решения на вид кажутся сравнительно простыми. Возникает вопрос, нельзя ли получить приведенные решения простым преобразованием Бэклунда, или все же обязательно использовать метод обратной задачи? Точно ли все приведенные выражения впервые получены диссертантом или какие-то из них, может быть, в частных случаях, уже были известны заранее?

2. В главе 3 получено решение (3.89), описывающее отражение волны поворота от границы легкоплоскостного ферромагнетика. Однако, кажется, что если распространить это решение обратно на всю ось Oz , получатся просто две известных волны поворота, движущиеся навстречу друг другу. Нельзя ли было с самого начала взять две таких волны, подставить их в уравнение Ландау-Лифшица (3.11), наложить в точке $z=0$ добавочное краевое условие (3.10), а потом «отрезать» половину образца? В данном случае, это кажется проще, чем использовать процедуру «одевания» в совокупности с методом изображений.
3. В главах 2, 3 получены интегральные уравнения (2.73), (3.79) для описания диспергирующих волн в доменной структуре двухосного ферромагнетика и в легкоплоскостном ферромагнетике в отсутствие солитонов. В случае малоамплитудных волн они воспроизводят уже известные спиновые волны, представляющие решения линеаризованных уравнений Ландау – Лифшица. Однако, видимые частные случаи этим исчерпываются. Можно ли извлечь из этих уравнений еще какую-нибудь пользу?
4. Материал диссертации воспринимался бы легче, если бы работа была снабжена большим числом рисунков общего характера, изображающих рассматриваемые магнитные структуры. В частности, в главе 2 такие рисунки вообще отсутствуют.
5. Замечание об опечатках: сравнивая текст диссертации с работой автора [A14], оппонент заметил опечатки в редукциях задачи Римана. Кроме того, местами (в нумерованных формулах главы 3) имеются неверные знаки, пропущена матрица σ_3 в экспоненте в формуле (3.74).

Приведенные выше замечания, однако, не носят принципиального характера. Без сомнения, работа представляет собой серьезный вклад в теорию нелинейных волн в магнетиках. Совокупность результатов, полученных в диссертации, безусловно, можно квалифицировать как *научное достижение*. Полученные автором результаты достоверны, основные выводы и заключения обоснованы. Автореферат корректно отражает результаты диссертационного исследования. Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в 21 работах, из которых 21 опубликованы в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых

журналов и индексируемых в Российских и международных базах цитирования, а также многократно представлялись на российских и международных научных конференциях. Содержание работы соответствует заявленной специальности 1.3.3. «Теоретическая физика», а именно, пункту 5 Паспорта этой специальности: «Теория конденсированного состояния. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика. Теория фазовых переходов. Физическая кинетика».

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «*Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой*» полностью соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), а её автор, Расковалов Антон Александрович – стспсни доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (специальность 01.01.02. «Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление», профессор, профессор кафедры «Высшая математика – 1» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Алфимов Георгий Леонидович
17 октября 2025 года



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, тел. +7(499) 720-87-38,

Электронная почта: alfimov@gmail.com

Веб страница: <https://www.miet.ru/person/10310>

Ученый секретарь НИУ МИЭТ, к.т.н.

Козлов Антон Викторович

