«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной деятельности
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского»
доктор медицинских наук,
профессор А.В. Кубышкин

«23» 04 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Метлова Константина Леонидовича «Топологические солитоны в магнитных наноструктурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа К. Л. Метлова посвящена изучению природы и свойств магнитных состояний в наноструктурированных системах – как искусственных (планарные наноструктуры из магнитомягких материалов), так и естественных (наноструктурированные объемные поликристаллические образцы). Работа представляет собой законченное теоретическое исследование, достоверность результатов которого тщательно проверена с использованием экспериментальных данных, полученных независимо другими авторами.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена появившимися в конце XX века (и постоянно с тех пор совершенствующимися) новыми возможностями для создания магнитных наноструктур. Эти возможности, прежде всего, связаны с совершенствованием методов наномасштабной литографии, нашедших свое применение в современной электронике. Моделирование магнитных состояний наноструктур имеет ключевое значение для всех приложений магнетизма, поскольку с ними напрямую связаны статические, динамические и гистерезисные свойства магнетиков. При этом, состояния планарных нанооствровков, которым посвящена большая часть работы, существенно отличаются от хорошо известных доменных структур тонких пленок, а значит требуют отдельного изучения.

Топологические аспекты магнитных состояний, которые в полной мере проявляются в наноструктурах, имеют важное фундаментальное значение. Можно

провести аналогию между магнитными состояниями и моделями материи в теории поля (в частности, моделью Т. Скирма). Изучение магнитных состояний наноструктур, таким образом, позволяет лучше понять природу элементарных частиц.

Актуальность нейтронографических исследований так же возросла в последнее время. Возросшая доступность исследовательских ядерных реакторов для изучения свойств твердого тела и интерес к наномасштабным объектам обусловили необходимость совершенствования теории малоуглового рассеяния нейтронов наноструктурированными материалами.

Диссертационная работа К. Л. Метлова имеет структуру, соответствующую требованиям ВАК Донецкой Народной Республики, и состоит из Введения, шести оригинальных глав, заключения и списка использованных источников из 269 наименований. Работа изложена на 300 страницах машинописного текста, содержит 55 иллюстраций и 3 таблицы.

Во Введении отмечена актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, аргументирована ее научная новизна. Представлены выносимые на защиту научные положения, показана практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы на научных конференциях.

В первой главе представлен обзор теории магнитных текстур и теории магнитного рассеяния нейтронов. Анализируется вид и влияние на магнитную текстуру стандартных членов магнитного лагранжиана: обменной энергии, энергии магнитной анизотропии, магнитостатической энергии и энергии взаимодействия Дзялошинского-Мория. На основании метода магнитных зарядов получено выражение для магнитостатической энергии периодического распределения намагниченности. Приведен вывод выражений для неполяризованного сечения рассеяния нейтронов в типичных экспериментальных геометриях через квадраты Фурье-образов компонент векторного поля намагниченности.

Во второй главе рассмотрено рассеяние нейтронов на слабонеоднородных объемных наноструктурированных образцах. Используется метод теории возмущений по амплитуде неоднородностей магнитных параметров образца. Известные формулы для сечений рассеяния во втором (основном) порядке теории возмущений дополнены выражениями для параметров одноосной магнитной анизотропии в виде свертки Фурье-образов компонент ее директора. Вводится процедура трехмерного усреднения по направлениям. Обнаружено, что при рассеянии поликристаллическим магнетиком в перпендикулярной геометрии (когда внешнее поле приложено к образцу перпендикулярно потоку падающих на него нейтронов) разница между магнитными сечениям рассеяния в плоскости детектора вдоль направления приложенного к образцу магнитного поля и в перпендикулярном к полю направлении во втором порядке теории возмущений равна нулю. Вычислена ненулевая величина этой разности в следующем, третьем порядке теории возмущений. Получены выражения для сечений рассеяния нейтронов наноструктурированным магнетиком с учетом взаимодействия Дзялошинского-Мория. На основе этих данных, вычислена разность

поляризованных сечений рассеяния, характеризующая невзаимность при прохождении пучка нейтронов через образец. Получены выражения для сечений рассеяния нейтронов наноцилиндром с магнитным вихрем.

В третьей главе построена теория магнитных состояний в планарных наноэлементах цилиндрической формы с произвольной формой торца. Получено семейство пробных функций для векторного поля намагниченности, выражающееся через решение краевой задачи Римана-Гильберта по нахождению аналитической (за исключением набора изолированных особых точек) в области торца цилиндра аналитической функции комплексной переменной без нормальных компонент к границе цилиндра. Эта теория позволяет приближенно выражать магнитные состояния на языке аналитических функций комплексной переменной. Приведены примеры выражений для центрированного и смещенного магнитного вихря в круговом цилиндре, различных вихревых и квазиоднородных состояний в цилиндрах с треугольным и квадратным основанием. Проведено обобщение полученных решений на случай многовихревых конфигураций. Сформулирована модель для доменной границы с перетяжками в тонкой пленке в виде комплексной функции. В рамках единого подхода вычислены равновесные энергии доменной границы с перетяжками, а так же блоховской и неелевской доменных границ. Показано, что в определенном интервале толщин пленки доменная граница с перетяжками имеет самую низкую (среди рассмотренных) равновесную энергию, а значит является основным состоянием доменной границы.

В четвертой главе детально исследуются магнитные структуры цилиндра с круговым основанием, используя одну из полученных ранее пробных функций и ее обобщения. Представлен массивно-параллельный вычислительный проект Magnetism@home, в рамках которого численно построена фазовая диаграмма основных состояний кругового цилиндра. Обнаружено, что в узкой области фазовой диаграммы основным состоянием цилиндра является магнитный вихрь с ядром, доходящим до границы цилиндра (автор называет это состояние «большой магнитный вихрь»). Существование большого магнитного вихря и его область метастабильности подтверждены аналитическим расчетом. Определена область метастабильности больших вихрей и показано, что цилиндры определенных размеров могут содержать либо большие, либо классические вихри. Оба этих состояния в них стабильны. Рассмотрена задача выталкивания магнитного вихря из цилиндра внешним магнитным полем. Проведено обобщение пробной функции для описания квазиоднородных в плоскости основания цилиндра состояний намагниченности. Решена задача об анизотропии четвертого порядка в массиве квазиоднородно намагниченных круговых магнитных наноцилиндров, взаимодействующих магнитостатически. Полученные теоретические результаты находятся в прекрасном согласии с данными независимого эксперимента. Проведено исследование изгибной стабильности квазиоднородных состояний в плоскости основания цилиндра.

Пятая глава посвящена динамике магнитных текстур, представленных в виде функций комплексной переменной. Получено выражение для кинетического

лагранжиана непосредственно в терминах, входящих в эти функции скалярных параметров и их производных по времени. Получены уравнения движения магнитного вихря в круговом цилиндре при его малых отклонениях из центра цилиндра. Эти уравнения описывают прецессию в направлении, заданном поляризацией ядра магнитного вихря. Вычислена частота этой прецессии, которая в предельном случае тонких цилиндров совпадает с известным из литературы выражением, находящимся в превосходном согласии с экспериментальными данными. Учет членов следующего порядка по отклонению приводит к зависимости частоты прецессии от ее амплитуды, которая так же рассмотрена в данной главе.

В шестой главе исследуется роль топологии (в частности, связности наносистемы) на формирующиеся в ней магнитные состояния. Получены общие выражения для магнитных состояний многосвязных областей. Приведены примеры таких состояний в кольце и в трехсвязной области с круговыми границами. Показано, что в многосвязных областях распределения намагниченности подчиняются определенным ограничениям, связывающим положения вихрей и седел в них. Получен явный вид этих ограничений в двухсвязной области. Выполнение этих ограничений проверено на основании данных независимого эксперимента. Исследован и более простой случай топологических ограничений в периодических магнитных текстурах. Показано, что они выполняются для широкого класса различных физических моделей.

В заключении сформулированы перспективы использования и дальнейшего развития полученных в диссертации результатов.

Научная ценность диссертационной работы заключается в том, что развитый автором аналитический подход к описанию магнитных состояний планарных наноструктур в терминах функций комплексной переменной дополняет ряд известных ранее примеров использования комплексного анализа при рассмотрении задач электростатики, гидродинамики, теории упругости, явлений переноса и теплопроводности. Он позволяет классифицировать магнитные состояния планарных наноструктур и получать (пусть и приближенные) решения многих задач микромагнетизма в явном виде. Доменная граница с перетяжками является (наряду с доменными границами Блоха и Нееля) одним из трех возможных основных состояний доменной границы в тонкой изотропной магнитной пленке.

Практическая ценность полученных результатов определяется тем, что магнитные наноструктуры имеют в настоящее время ряд перспективных приложений в области магнитной записи и обработки информации. Для любых таких применений вопрос о равновесных, метастабильных и переходных магнитных текстурах является ключевым. Построенные автором магнитные фазовые диаграммы нашли и находят свое применение при планировании экспериментов и устройств на базе магнитных наноструктур. Состояние типа «большой магнитный вихрь» открывает новые возможности для магнитной записи, основывающейся на переключении между классическими и большими вихрями. Такие переходы имеют место в частицах, находящихся вблизи области однодоменности, а значит построенные на их базе

ячейки хранения информации являлись бы самыми маленькими ячейками с (почти) замкнутым магнитным потоком. Построенная автором теория нелинейной прецессии магнитного вихря позволяет контролировать влияние амплитуды его колебаний на частоту прецессии путем подбора геометрических размеров наноцилиндра. Обнаруженные автором топологические ограничения на положения вихрей и антивихрей могут привести к новым приложениям в области магнитной обработки информации.

Достоверность полученных в работе результатов определяется корректным использованием математических методов, проверкой результатов при помощи серии предельных переходов к ранее известным более простым моделям, сравнением аналитических результатов с численными (проект Magnetism@home) и с данными независимых экспериментов.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в научных организациях, в которых ведутся исследования по сходной тематике: в Институте физики микроструктур РАН, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Крымском федеральном университете имени В. И. Вернадского, Институте радиоэлектроники ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, а так же других ВУЗах и научно исследовательских институтах страны и мира.

По диссертации имеется несколько замечаний:

1.Существует несколько выражений для взаимодействия Дзялошинского-Мория, в том числе и в оригинальных работах, где используются векторы ферромагнетизма и антиферромагнетизма. Почему в работе используется именно выражение в виде скалярного произведения намагниченности на ее ротор?

2.В работе предполагается постоянство длины вектора магнитного момента. Однако, хорошо известно, что это условие справедливо в изотропных, либо приближенно выполняется для слабо анизотропных магнетиков, т.е в случае, когда энергия анизотропии много меньше энергии обменного взаимодействия. В противном случае длина магнитного момента не является константой (эффект квантового сокращения спина). Однако в диссертации нигде не оговариваются соотношения между материальными параметрами системы, такими, например, как константа анизотропии и константа обменного взаимодействия.

3.Во втором разделе диссертации автор пишет «…магнитостатическое (дипольное) взаимодействие в бесконечном магнетике инвариантны относительно общего поворота всех магнитных моментов.». Дипольное взаимодействие можно интерпретировать как анизотропию типа «легкая плоскость», которая инвариантна относительно поворотов в легкой плоскости.

4. Автор в тексте диссертации использует термин «магнитные текстуры», который не является общепринятым в русскоязычной научной литературе, и, как нам кажется - не самый удачный.

Однако, сделанные замечания не имеют принципиального характера и не могут повлиять на общую положительную оценку диссертационной работы, а являются скорее пожеланием к дальнейшим исследованиям.

Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в рецензируемых научных журналах, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на международных конференциях и семинарах. Очень хорошее впечатление оставляет список публикаций, в которых отражены основные результаты диссертации. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Все изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что диссертация содержит результаты, которые в совокупности можно квалифицировать как научное достижение, а также как новое научное направление. Таким образом, диссертационная работа **«Топологические солитоны в магнитных наноструктурах»** соответствует требованиям ВАК Донецкой Народной Республики, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор **Метлов Константин Леонидович** заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара кафедры теоретической физики и физики твердого тела Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского 16 апреля 2019 г., протокол № 4.

Председатель семинара,
заведующий кафедрой теоретической
физики и физики твердого тела
Физико-технического института
Крымского федерального
университета им.В.И.Вернадского,
доктор физико-математических наук,
профессор
тел.: +7(978)755-84-13
e-mail: yuriifridman@gmail.com

Фридман Юрий Анатольевич

Секретарь семинара,
доцент кафедры теоретической
физики и физики твердого тела
Физико-технического института
Крымского федерального
университета им.В.И.Вернадского,
кандидат физико-математических наук,
доцент
тел: +7(978)877-30-74
e-mail: lkosma@list.ru

Космачев Олег Александрович