

Отзыв официального оппонента
д.ф.-м.н., доц. Орлова Виталия Александровича
на диссертационную работу Магадеева Евгения Борисовича
«Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в
перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с
неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.8.
Физика конденсированного состояния

В настоящее время не ослабевает интерес к исследованиям, как экспериментальным, так и теоретическим магнитных наноразмерных систем с особой структурой намагниченности, представляющей собой вихреподобные магнитные возбуждения. Любопытство исследователей обусловлено несколькими причинами. В частности, не снята острота проблемы увеличения плотности записи и хранения информации на традиционных носителях и/или создание устройств нового поколения с улучшенными качествами по энергосбережению, надежности, скорости обращения и пр. Развиваются идеи применения образцов с вихревой структурой намагниченности в спинтронике, например, в чипах, основанных на новых принципах выполнения логических операций - путем управляемого дрейфа вихрей/скирмионов в магнитной матрице. Обоснованные надежды связаны и с применением сегментированных структур с магнитными вихрями в качестве основы электромагнитных излучателей с уверенно управляемым и широким диапазоном частот.

Толчок к бурному изучению указанных структур был получен вследствие развития технологий их синтеза и методов экспериментального исследования их магнитных состояний. Разумеется, получили развитие и теоретические подходы к описанию магнитных состояний таких систем, что позволило аналитическими методами решить целый спектр задач, посвященных вопросам устойчивости вихрей, характера их эволюции и движения, взаимодействия с магнитными полями и токами и пр. Тем не менее, остается еще более широкий круг задач, и для экспериментаторов, и для теоретиков, требующих разрешения и внятного толкования. В частности, представляет интерес: описание характера и механизмов взаимодействия магнитных вихрей/скирмионов со структурными дефектами разного форм-фактора, законы движения вихрей/скирмионов в градиентных полях (температурных, анизотропии), характер взаимодействия вихрей/скирмионов между собой и многое другое. В этом контексте диссертационная работа Магадеева Е.Б. своевременна и приобретает особую ценность и для прикладных, и для академических исследований.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ и состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Каждая глава описывает одну крупную задачу, как промежуточный этап на пути достижения цели, сформулированной автором, и находящуюся в единой канве развиваемого диссертантом теоретического метода. Общий объем диссертационной работы составляет 312 страниц, в том числе 83 рисунка и 3 таблицы. Перечень цитируемой литературы содержит 284 наименования.

Во введении традиционно обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, защищаемые положения. Так же, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методы исследований.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу основных свойств вихреподобных неоднородностей намагниченности: условиям зарождения и устойчивости, а так же известным на данный момент особенностям взаимодействия

элементов с неоднородной магнитной структурой с электрическими полями различной конфигурации. Во второй главе теоретически решаются статические задачи по поиску распределений намагниченности в легкоплоскостной пленке, соответствующих устойчивым вихревым конфигурациям. Кроме того, в этой главе обсуждается роль дефектов в виде перфораций в формировании устойчивой вихревой структуры.

Третья глава посвящена теоретическим оценкам влияния магнитостатической энергии (размагничивающих полей) на устойчивость и профиль намагниченности вихреподобных структур. Показано, что магнитостатическая энергия способствует стабилизации вихревой структуры.

Четвертая глава, подобно третьей, посвящена вопросам влияния внешнего однородных и неоднородных магнитных полей на характеристики вихревой структуры. Показано, что под воздействием магнитного поля прямых проводников с током возможна потеря устойчивости вихревой структуры, при этом на перфорации возможно рождение и нетривиальное движение нового вихревого объекта. Указывается на потенциальную возможность управления магнитным состоянием вихрей, локализованных на дефектах, с помощью импульсов магнитного поля.

В пятой по седьмую главы включительно представлены расчеты, демонстрирующие влияние неоднородных электрических полей на структуру и эволюцию намагниченности с топологическими неоднородностями: доменными границами, магнитными вихрями в однородном магнетике и в пленках с перфорациями. Продемонстрировано, что оптимальным с точки зрения управления намагниченностью, является электрическое поле с цилиндрической симметрией, например, от длинной заряженной нити. Топологию неоднородностей намагниченности можно менять при помощи электрического поля, при этом наибольшей стабильностью обладают вихри с завихренностью ± 1 . Обсуждается эффект обратный неоднородному магнитоэлектрическому. Показано, что использование обратного эффекта открывает возможность для идентификации магнитного состояния вихреподобных неоднородностей намагниченности.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Материал диссертации изложен достаточно подробно, работа хорошо структурирована, сопровождается достаточным количеством иллюстраций. Текст диссертации написан ясным, понятным языком. Автореферат адекватно отражает содержание, результаты и структуру диссертации.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается внутренней непротиворечивостью моделей, согласием теории и компьютерного эксперимента. В работе приведены достаточные обоснования применимости используемых моделей и методов. Результаты диссертационной работы обладают научной новизной и востребованы научным сообществом, что подтверждается публикациями результатов работы в авторитетных журналах и презентациями на международных конференциях.

Основные научные результаты диссертационной работы изложены в 23 печатных работах, опубликованных в ведущих российских и зарубежных научных журналах, в том числе, входящих в базы данных Scopus, Web of Science и Перечень ВАК РФ. Можно выделить следующие наиболее важные результаты, полученные автором:

1. Исследован механизм зарождения нетривиальных вихревых состояний намагниченности вблизи дефектов образца в виде перфораций, исследованы и сформулированы условия устойчивости этих состояний.
2. Изучено влияние внешнего магнитного поля и полей размагничивания на вихревую структуру намагниченности легкоплоскостных систем.
3. Исследованы статические и динамические свойства вихревой структуры намагниченности в присутствии неоднородного электрического поля. Показано, что процессы зарождения и дрейфа вихревых структур не

инвариантны относительно направления напряженности электрического поля. При определенных условиях перемещение сопровождается “излучением” квазичастицы – нового вихря. При этом процесс подобен распадам с соответствующими законами сохранения.

4. Наличие электрического поля может способствовать устойчивости магнитных вихрей, причем, завихренность в наиболее стабильных структурах с хорошей точностью пропорциональна напряженности поля.
5. Продemonстрирована потенциальная возможность гибкого управления свойствами вихревой структуры с помощью неоднородного магнитоэлектрического эффекта.

Новизна научных положений, выносимых на защиту, не вызывают сомнения. Результаты, представленные в диссертации, практически значимы, будут интересны для исследователей и инженеров, работающих в области физики магнитных явлений, микро-, наноэлектроники, связанных с разработкой устройств спинтроники различного назначения. Результаты исследования будут полезны и востребованы в организациях, занимающихся исследованиями в этих областях, таких как: МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), УрФУ (г. Екатеринбург), УУНиТ (г. Уфа), Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (г. Москва), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск), Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт радиотехники и электроники имени В.Л. Котельникова РАН (г. Москва).

Значимость научных результатов автора диссертационной работы косвенно подтверждается финансовой поддержкой фондов в рамках Государственных заданий.

Не смотря на общий высокий уровень диссертационного исследования, работа не свободна от недостатков, выраженных в замечаниях и ряде вопросов, сформулированных ниже. При ознакомлении с текстом диссертации возник ряд замечаний:

1. Во введении на странице 12 указано на “большие трудности” наблюдений вихревых структур. Вместе с тем, технологии наблюдений достаточно хорошо развиты и активно используются, что показано, например, в цикле работ исследовательских групп из Дальневосточного федерального университета (автор ссылается на одну из этих работ [14]). Кроме того, с начала нулевых годов существует и развивается целая школа в Институте Микроструктур Нижнего Новгорода под руководством В.Л. Миронова, посвященная сканирующей микроскопии (даже выпущены несколько учебных пособий).
2. Обсуждая динамику, нюансы и условия устойчивости вихревых магнитных структур, автор диссертации не упомянул и не прокомментировал ранние значимые исследования. В частности, обделены вниманием оказались:
 - a. К.Л. Метлов (начиная, фактически, с пионерской работы: JMMM. – 2002. – Vol. 242-245. – P. 1015–1017),
 - b. группы под руководством Б.А. Иванова (см. например:
 - i. Ivanov B. A., Wysin G. M. Magnon modes for a circular two-dimensional easy-plane ferromagnet in the cone state // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65. – P. 134434.
 - ii. Галкин А. Ю., Иванов Б. А., Меркулов А.Ю. Основное состояние ограниченных массивов магнитных точек в присутствие внешнего магнитного поля // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 128, № 6. – С. 1260.)
 - iii. Особенно в контексте основной темы исследования интересна статья: Ivanov B. A., Zaspel C. E. Excitation of Spin

Dynamics by Spin-Polarized Current in Vortex State Magnetic Disks // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 99. – P. 247208.

- с. Е.Г. Екомасов с соавторами, в цикле работ которых детально обсуждается динамика вихревых магнитных структур под действием спин-поляризованных токов (например:
 - i. Е. Г. Екомасов, С. В. Степанов и др. Влияние спин-поляризованного тока на динамику и изменение структуры магнитных вихрей в трехслойном проводящем наноцилиндре большого диаметра, ФММ 122(3), 212-220 (2021)
 - ii. К. А. Звездин, Е. Г. Екомасов, Спиновые токи и нелинейная динамика вихревых спинтрансферных осцилляторов, ФММ 123, 219-239 (2022)),
 - d. З.В. Гареева, которой с соавторами принадлежат работы про магнитоэлектрическое взаимодействие (см. например:
 - i. Р. М. Вахитов, З. В. Гареева и др. “Микромагнитные структуры, индуцированные неоднородным электрическим полем, в магнитноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом”, Физика твердого тела, 61:6 (2019), 1120–1127,
 - ii. З. В. Гареева, А. К. Звездин, Н. В. Шульга, Т. Т. Гареев, С. М. Чен, “Механизмы магнитоэлектрических эффектов в оксидных мультиферроиках с прафазой перовскита”, Физика твердого тела, 64:9 (2022), 1338–1344),
 - iii. и цикл работ, посвященный скирмионам в соавторстве с К.Ю. Гуслиенко:
 - 1. З. В. Гареева, К. Ю. Гуслиенко, “Динамика магнитных скирмионов в наноточках”, Физика твердого тела, 60:6 (2018), 1135–1141,
 - 2. Zukhra V Gareeva and Konstantin Y Guslienکو 2018 J. Phys. Commun. 2 035009, ;
 - 3. Gareeva, Z.; Guslienکو, K. Nutation Excitations in the Gyrotropic Vortex Dynamics in a Circular Magnetic Nanodot. Nanomaterials 2023, 13, 461.
3. В параграфе 4.2.2. автор оценочно описывает динамику перемагничивания без учета обменной энергии, фактически полагая, что степень неоднородности в распределении намагниченности не изменяется. Это утверждение представляется избыточно сильным, так как при процесс перемагничивания и зарождения новой квазичастицы может носить флуктуационный характер. Такая флуктуация в плавном распределении намагниченности может внести заметный вклад в свободную энергию системы. Тем более, что в конце параграфа в численном моделировании обменная энергия учтена.
4. В конце параграфа 7.1 автор сравнивает магнитостатические энергии, оцениваемые методом магнитостатических зарядов. Полагая, что намагниченность не выходит из плоскости пленки даже локально (планарное распределение) сделан вывод и о малости вклада энергии “плоскостных” магнитостатических зарядов по сравнению с энергиями объемных зарядов и зарядов на боковой поверхности. Вместе с тем, в равновесном состоянии все виды энергии, которые учитываются в теоретической модели, имеют сравнимый порядок (вследствие решения уравнений Эйлера). Тем более, что малая плотность плоскостных зарядов распределена по площади несравнимо большей, чем боковая поверхность, следовательно, законность

пренебрежения энергией плоскостных зарядов сомнительна.

5. Страдает сравнение теоретически и численно полученных результатов с данными натурных экспериментов. Упоминания и числовые оценки на основе характеристик реальных материалов встречаются лишь эпизодически (например, на стр. 91, 103-104, 175).

Имеются и менее значимые замечания, относящиеся к жаргонизмам, неточностям и техническим особенностям оформления, не влияющие на качество результатов и лишь незначительно затрудняющих ознакомление с текстом, например:

1. На стр. 48 в первом абзаце автор пишет: “размагничивающие поля в рассматриваемом материале значительно меньше обменного взаимодействия”. Складывается впечатление, что сравниваются величина поля (напряженность или индукция) с энергией обмена, что недопустимо. Этот же оборот встречаем и далее, например, на странице 94.
2. На стр. 56 вводится параметр ψ исключительно формально и далее его необходимость и смысл не обосновывается и не обсуждается, хотя далее активно используется.
3. Перпендикулярная к плоскости образца компонента намагниченности задается автором с помощью угла, отсчитываемого от плоскости, хотя разумно и общепринято отсчет вести от перпендикуляра к плоскости.
4. Практически на всех рисунках автор использует цветовую гамму для индикации разных зависимостей. При этом графики не различаются начертанием линий (сплошная, штриховая...) и не пронумерованы цифрами или буквенно. В связи с этим возникает неудобство при чтении текста в черно-белом варианте (а такое возможно). Вместе с тем, в диссертационной работе имеется интересная, весьма наглядная техническая находка, демонстрирующая альтернативный способ представления в иллюстрациях распределения намагниченности вихревых структур – рисунок 6.2.3.
5. Выводы параграфа 3.1.1. завуалированы, и автор фактически предлагает их добыть из таблицы 3.1.1., хотя разумно было бы их просто сформулировать словесно.
6. На стр. 97 мы встречаем параметр r_0 , который ни до, ни после не комментируется и не ясна его необходимость.
7. Рисунки 3.2.1. и 4.1.1. фактически продублированы, можно было бы сослаться на первое упоминание.
8. В параграфе 4.2.2. рассмотрен механизм перемагничивания под действием магнитного поля прямого тока, перпендикулярного плоскости пленки, но указано расположения точки пересечения провода и плоскости. Эта же информация отсутствует и в других разделах. Наличие рисунка сняло бы эту неоднозначность.
9. На стр. 179 расстояние между проводом с током и плоскостью образца автор обозначил символом H , которое ранее использовал для обозначения напряженности магнитного поля. Это не представляется разумным, тем более, что дефицита в символах нет.

Помимо этого, имеются и вопросы:

1. Возникают сомнения в необходимости параграфа 2.3.5, где рассмотрен объект, фактически далекий от модели, которой посвящена диссертация. Что хотел подчеркнуть автор в этом пункте?
2. На странице 142 автор утверждает об эквивалентности пленки конечных размеров и фактически одномерной модели “кренделя”, не приведя

доводов. Это утверждение требует пояснений.

Вышеуказанные замечания не носят сущностного характера, не снижают уровень новизны результатов, выносимых на защиту, и не сказываются на общей положительной оценке диссертационной работы.

Таким образом, диссертационная работа Е.Б. Магадеева «Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Работа содержит новые научные результаты и положения, совокупность которых можно классифицировать как значимое достижение в области физики конденсированного состояния. Автором получен целый ряд важных для науки и техники новых научных результатов. Соискатель в полной мере подтвердил высокую квалификацию, продемонстрировал владение современными методами теоретических исследований.

В целом, диссертационная работа Магадеева Евгения Борисовича «Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием» по своей актуальности, объему решаемых задач, научному уровню отвечает критериям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Содержание диссертации соответствует отрасли физико-математических наук пунктам 2,4,5 паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Считаю, что соискатель Магадеев Евгений Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, по специальности
1.3.12. Физика магнитных явлений, доцент,
Заведующий кафедрой экспериментальной физики и
инновационных технологий СФУ

В.А. Орлов

Подпись заведующего кафедрой
экспериментальной физики и инновационных технологий
ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет,
д.ф.-м.н. В.А. Орлова удостоверяю:

Ученый секретарь

11.11.2025

И.Ю. Макачук

Данные об организации:

ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет,

Адрес: 660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный

Тел: +7 (391) 206-22-22

Сайт: <https://sfu.ru>

Почта: office@sfu-kras.ru