

Ахметова Айгуль Альфредовна

Устойчивые состояния вихреподобных неоднородностей в одноосных ферромагнитных пленках с модулированными материальными параметрами

1.3.8. Физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Уфа–2026

Работа выполнена на кафедре теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель:

**Вахитов Роберт Миннисламович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Официальные оппоненты:

**Логунов Михаил Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук  
**Тааев Таа Абдуллаевич**,

кандидат физико-математических, научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет».

Ведущая организация:

Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 при ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001 г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета и на сайте <https://www.csu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.431.01,  
кандидат физ.-мат. наук,

Матюнина М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

За последние 15 лет, после обнаружения в пленках MnSi устойчивых состояний магнитных скирмионов [1], лавинообразно возросли масштабы исследований их структуры, свойств, влияния на них различных факторов, магнитных материалов, в которых они стабилизируются и т.д. [2,3]. Такой всплеск интереса был обусловлен их уникальными свойствами (топологическая защищенность, наноразмеры, высокая подвижность, простота манипулирования при помощи электрического тока малой плотности и другие спин-электронные свойства [4]), которые создали предпосылки их возможного применения в различных устройствах спинтроники и магнитной памяти нового поколения. Исследования показали, что стабилизация магнитных скирмионов в этих пленках обусловлена наличием в них взаимодействия Дзялошинского-Мория (ВДМ), которое характерно для нецентросимметричных магнетиков (его принято называть объемным ВДМ). В то же время присутствие ВДМ было выявлено и в многослойных пленках типа Co/Pt [5], а также в магнитных пленках, эпитаксиально выращенных на подложках из тяжелых металлов [6] (в них имеет место межфазное ВДМ [6], стабилизирующее магнитные скирмионы при комнатных температурах). Однако, впоследствии выяснилось наличие определенных трудностей, связанных с устойчивостью скирмионов при столь малых толщинах пленок ( $D \sim 1$  нм). Это привело к поиску магнитных материалов, в которых при отсутствии в них ВДМ (некиральные магнетики), могли бы существовать устойчивые состояния магнитных скирмионов. Такой тип материалов был предложен в работах [7,8] и реализован в [9] посредством локального облучения ионами  $He^+$  поверхности наноразмерных одноосных пленок Co/Pt. В результате в местах облучения пленок образовывались области цилиндрической формы с пониженным значением константы одноосной анизотропии [10] (дефекты типа «потенциальная яма»). Экспериментальные

исследования подобных плёнок показали [9], что на дефектах такого вида могут зарождаться не только магнитные скирмионы, но и другие вихреподобные неоднородности, в частности, нетопологический солитон (0–скирмион). Однако идентификация наблюдаемых неоднородностей в силу малости их размеров ( $\sim 10$  нм) вызвала определенные сложности, связанные с технологическими возможностями экспериментальных установок, а также отсутствием каких–либо теоретических исследований в этой области. Поэтому возникла насущная необходимость в теоретическом анализе распределения намагниченности в магнитных неоднородностях, образующихся в ферромагнитных плёнках с колумнарными дефектами типа «потенциальная яма», а также в изучении их поведения в продольном и поперечном магнитных полях.

**Целью** настоящей работы является исследование возможных типов микромагнитных неоднородностей, образующихся в магнитных пленках с пространственно модулированными параметрами (с аксиальной симметрией), изучение их структуры и свойств, а также их поведения в магнитном поле.

**В задачи** диссертационной работы входят:

1. Численный расчет распределения намагниченности вихреподобных неоднородностей, возникающих на колумнарных дефектах (дефектах цилиндрической формы) типа «потенциальная яма» в одноосных ферромагнитных пленках, определение их устойчивых состояний в зависимости от параметров образца и характеристик дефекта, выявление основных параметров материала, наиболее существенно влияющие на возникновение вихреподобных неоднородностей (магнитные скирмионы и нетопологические солитоны), их структурные особенности и зависимости их характерных размеров от параметров образца и характеристик дефекта.

2. Исследование влияния магнитного поля на структуру и устойчивость вихреподобных неоднородностей в рассматриваемых пленках. Выявление возможных сценариев перемагничивания этих пленок, в которых

реализуется тот или иной тип неоднородностей, в зависимости от направления магнитного поля относительно нормали к поверхности пленки.

**Научная новизна** заключается в том, что

1. Впервые теоретически было показано, что магнитные скирмионы блоховского типа могут существовать как устойчивые структуры в некиральных магнетиках, в частности, в одноосных ферромагнитных пленках с пространственно модулированными параметрами.

2. Установлено, что на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» могут образоваться четыре вида вихреподобных неоднородностей с блоховским распределением намагниченности, два из которых представляют вырожденные состояния магнитного скирмиона, а два других – нетопологического солитона (0-градусного скирмиона). Выявлено, что магнитные скирмионы являются энергетически более выгодными образованиями, чем нетопологические солитоны во всей области изменения материальных параметров образца и характеристик дефекта.

3. Найдено, что зарождение на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» вихреподобных неоднородностей носит пороговый характер, так как существуют критические значения радиуса дефекта, глубины потенциальной ямы и фактора качества, ниже которых эти неоднородности не образуются.

4. Определены основные этапы перемагничивания исследуемых пленок, на дефектах которых образуются вихреподобные неоднородности, в перпендикулярном и планарном магнитных полях, и выявлены характерные качественные изменения структуры неоднородностей в данных полях.

5. Показано, что при действии перпендикулярного поля на магнитный скирмион, полярность кора которого направлена противоположно полю, при определенном его значении, магнитный скирмион превращается в нетопологический солитон, который при дальнейшем возрастании поля уменьшается в размерах и исчезает. Таким образом, выявлено, что нетопологический солитон становится устойчивым образованием на

определенном этапе перемагничивания магнитного скирмиона.

6. Установлено, что при малых значениях фактора качества  $Q \leq 1$  магнитные скирмионы могут зарождаться на колумнарном дефекте в перпендикулярном магнитном поле.

7. Выявлено, что под действием плоскостного магнитного поля магнитный скирмион перемещается как единое целое без изменения его топологии в направлении, перпендикулярном приложенному полю. По направлению перемещения скирмионы можно однозначно определить его киральность.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные результаты расширяют наши представления о магнитных материалах, в которых могут быть стабилизированы магнитные скирмионы, о возможных видах вихреподобных неоднородностей, особенностях их структуры и свойств, а также с новых позиций объясняют некоторые известные эксперименты, не получившие ранее адекватной интерпретации. Полученные результаты имеют и прикладной характер, так как они могут быть использованы при разработке логических и запоминающих устройств нового поколения.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В одноосных ферромагнитных пленках, содержащих колумнарные дефекты типа «потенциальная яма», возможно образование вихреподобных неоднородностей четырех типов, различающихся ориентацией намагниченности в центре кора (полярность) и направлением намагниченности на периферии; из них 2 типа неоднородностей идентичны нетопологическим солитонам, а 2 других типа – скирмионам.
2. Тип образовавшейся вихреподобной неоднородности, а также её структура зависят от материальных параметров плёнки и дефекта. Стабильность состояний вихреподобных неоднородностей определяется диаграммами устойчивости в переменных «фактор качества – размер дефекта», «фактор качества – магнитное поле» и т.д.

3. В зависимости от направления приложенного внешнего магнитного поля реализуются 2 различных сценария перемагничивания скирмиона. В случае направленного магнитного поля вдоль нормали к поверхности плёнки скирмион претерпевает серию трансформаций: от скирмиона к нетопологическому солитону и в финальной стадии в однородно намагниченное состояние плёнки. В случае планарного внешнего поля магнитный скирмион, не изменяя своей топологии, перемещается в направлении перпендикулярном приложенному полю. Установлено, что по направлению перемещения скирмиона можно однозначно определить его киральность.

**Достоверность результатов** обеспечивается корректностью нахождения уравнений, описывающих распределение намагниченности в дефекте и в основном образце, использованием хорошо апробированных численных методов для решения соответствующих уравнений, непротиворечивостью полученных результатов общефизическим закономерностям, их совпадением в предельных случаях с известными результатами, а также согласием с экспериментальными данными. Кроме того, исследование поведения вихреподобных неоднородностей в продольном магнитном поле в рассматриваемой пленке, проведенные двумя методами: численным интегрированием уравнений Эйлера-Лагранжа и микромагнитным моделированием на основе пакета программ открытого кода показывает, что они дают идентичные результаты.

#### **Апробация результатов работы.**

Полученные результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Всероссийская научная молодежная конференция (Уфа –2015, Уфа –2016), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow–2017); V Всероссийская научная молодёжная конференция с международным участием «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (Уфа – 2018); Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-24: Томск –2018, ВНКСФ-26: Екатеринбург – 2022); Всероссийская

конференция «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах» (Уфа – 2019); Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа» ( Уфа – 2021; Уфа – 2022; Уфа – 2023); Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG, Красноярск – 2016; Екатеринбург– 2019, Казань – 2023); Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала – 2021); XXIV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва – 2024), Samarkand International Symposium on Magnetism (Самарканд – 2023).

**Личный вклад автора.** В ходе выполнения работы автор принимал активное участие в формулировке целей и задач исследования, проводил численное моделирование, обработку и анализ полученных данных. Для анализа систем с нарушенной аксиальной симметрией им было использовано микромагнитное моделирование на основе пакетов программ открытого кода OOMMF [11] и Ubermag [12].

**Благодарности от автора.** Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, доктору физико–математических наук Р.М. Вахитову, за руководство, ценные советы и замечания при подготовке рукописи диссертационной работы, а также кандидату физико–математических наук Р. В. Солонецкому за помощь при написании и отладке программы численных расчетов структуры и свойств скирмионов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, входящих в системы цитирования Scopus, Web of Science, РИНЦ, приравненных к рекомендованным ВАК Минобрнауки РФ. Также написано 11 тезисов докладов.

**Структура и объем и диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 124 страниц, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 202 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, описана степень разработанности темы, изложена краткая история исследований магнитных скирмионов, приведены потенциальные способы применения магнитных скирмионов в технических устройствах, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая значимость работы, а также достоверность полученных результатов.

**В первой главе** кратко описаны основные этапы развития представлений о вихреподобных магнитных неоднородностях, результатом которых стало открытие магнитных скирмионов в киральных магнетиках, рассмотрены структура, свойства, условия их образования и возможные применения на практике, а также некоторые проблемы устойчивости скирмионов возникающие в многослойных магнитных плёнках при наличии в них ВДМ, и возможные пути их применения. Рассмотрены также альтернативные методы стабилизации магнитных скирмионов в некиральных магнетиках. Кроме того, в первой главе содержится обзор литературных источников, в которых рассматриваются различные виды дефектов, имеющих место в магнитных материалах, их влияние на возможные типы магнитных неоднородностей, образующихся на них, на их структуру и свойства, на спин-переориентационные фазовые переходы, на процессы намагничивания и перемагничивания магнитных материалов, а также на их коэрцитивную силу, на подвижность и на другие их характеристики.

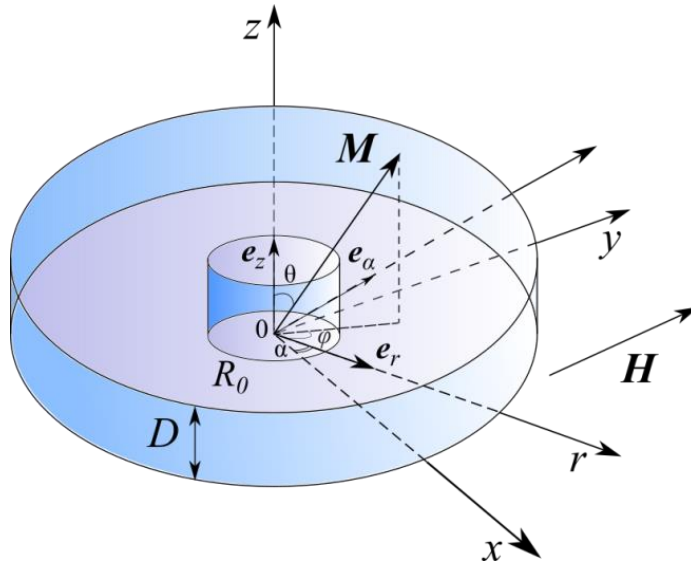


Рисунок 1– Геометрия магнитоодноосной плёнки. Здесь представлены декартова  $(x, y, z)$  и цилиндрическая  $(r, \alpha, z)$  системы координат

**Во второй главе** приведены результаты исследований структуры и свойств вихреподобных неоднородностей, образующихся на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» в одноосной ферромагнитной плёнке толщиной  $D$  (рисунок 1). Энергия таких неоднородностей в цилиндрической системе координат  $(r, \alpha, z)$  берется в виде:

$$E = 2\pi D \int_0^{+\infty} \left\{ A(r) \left[ \left( \frac{d\theta(r)}{dr} \right)^2 + \frac{\sin^2\theta(r)}{r^2} \right] + K(r) \sin^2\theta(r) + \frac{2M_S(r)}{D} \cos\theta(r) \int_0^{+\infty} M_S(r') \cos\theta(r') \left[ k_0 K(k_0) - kK(k) \right] \sqrt{\frac{r'}{r}} dr' \right\} r dr \quad (1)$$

где  $\theta$  и  $\varphi$  – полярный и азимутальный углы единичного вектора намагниченности  $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_S$ ,  $A$  – обменный параметр,  $K$  – константа одноосной анизотропии,  $M_S$  – намагниченность насыщения. Здесь последнее слагаемое в (1), содержащее двойной интеграл, представляет собой энергию размагничивающих полей для магнитных неоднородностей блоховского типа:

$$k_0 = \frac{2\sqrt{rr'}}{r+r'}, k = \frac{2\sqrt{rr'}}{\sqrt{(r+r')^2 + D^2}}, K(s) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-s^2\sin^2\varphi}} - \text{эллиптический интеграл 1-го рода, } s - \text{его модуль.}$$

Наличие колумнарного дефекта (радиуса  $R_0$ ) в пленке учитывается зависимостью параметров материала  $P = (A, K_u, M_S)$  от радиальной переменной  $r$  следующим образом:

$$P = \begin{cases} P_1, r > R_0 \\ P_2, r \leq R_0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $P_i$  – значения параметров материала вне ( $i = 1$ ) и внутри ( $i = 2$ ) дефекта, при этом  $K_{u2} < 0$  (дефект типа «потенциальная яма»).

Структура магнитных неоднородностей, возможных в рассматриваемой плёнке, находится из решений уравнения Эйлера–Лагранжа, соответствующих минимуму (1) при учете (2). В ходе их решения использовались безразмерные величины: все параметры, имеющие размерность длины, были приведены к характерной ширине материала  $\Delta_0 = \sqrt{A_1/K_{u1}}$ ,  $Q = K_{u1}/2\pi M_S^2$  – фактор качества материала.

Численный анализ этих уравнений, показал, что при определенных значениях параметров материала возможно образование на колумнарном дефекте четырех типов вихреподобных неоднородностей (ВН), имеющих блоховское распределение намагниченности и различающихся ориентацией намагниченности  $\mathbf{m}$  в центре кора (полярность) и направлением  $\mathbf{m}$  на периферии. Два из них (ВН первого типа), имеющие нулевой топологический заряд ( $q=0$ ), представляют вырожденные состояния нетопологического солитона (0–скирмиона), а два других (ВН второго типа) с топологическим зарядом  $q=1$  представляют вырожденные состояния магнитного скирмиона ( $\pi$ –скирмион). В то же время все они характеризуются одинаковым разбиением их структуры на три участка вращения магнитных моментов: центральный (кор), промежуточный и граничный участки (рисунок 2). Было показано, что такая ситуация вполне объясняется конкурирующим влиянием обменного взаимодействия, одноосной анизотропии и размагничивающих полей.

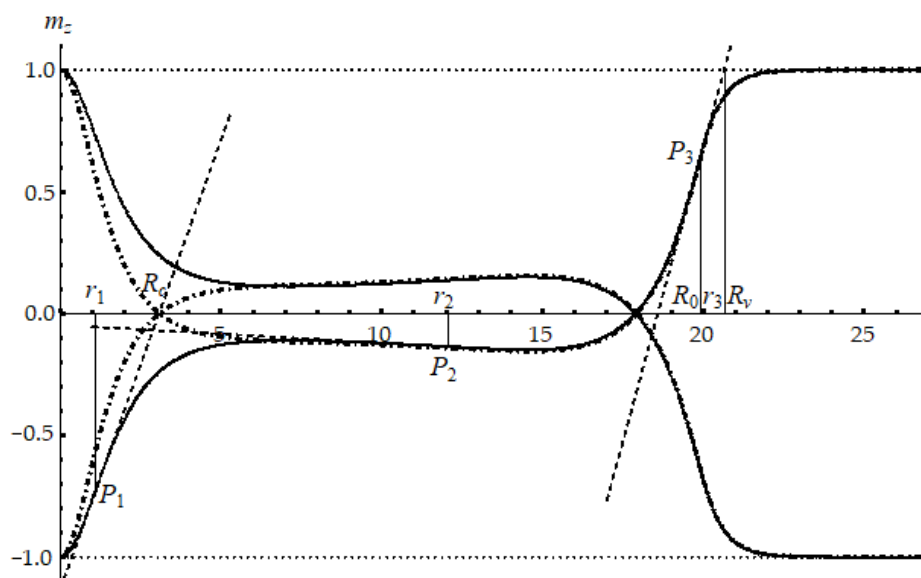


Рисунок 2– Распределение намагниченности в обоих типах ВН, где сплошными линиями обозначены профили ВН второго типа, штрихпунктирными – ВН первого типа, а штриховыми – касательные к соответствующим точкам перегиба ( $P_1, P_2, P_3$ ). Здесь  $r_1, r_2, r_3$  – координаты соответствующих точек перегиба

При этом первые два фактора оказывают одинаковое влияние на формирование профилей ВН обоих типов, в то время как вклады размагничивающих полей в структуры неоднородностей существенно различаются. Если во втором типе ВН имеет место полное замыкание магнитного потока, то в первом такое замыкание отсутствует. Поэтому энергия размагничивающих полей у ВН второго типа значительно меньше, чем в первом. Соответственно, магнитные скирмионы энергетически более выгодны, чем нетопологические солитоны. Кроме того, ВН первого типа отличаются от ВН второго типа и по распределению: в профиле ВН первого типа имеется две точки перегиба функции  $m_z(r)$ , а во втором – три точки перегиба. Наличие точек перегиба в профиле ВН обоих типов позволяют определить и изучить характерные размеры каждого участка, в зависимости от материальных параметров и характеристик дефекта. В частности, было установлено, что размеры обоих типов существенно зависят прежде всего от радиуса дефекта  $R_0$  (рисунок 3) и от глубины потенциальной ямы  $\Delta K = K_1 -$

$K_2$ . Из графиков видно, что при определенном значении величины  $R_0$  происходит скачкообразный характер этой зависимости, который связан с изменением топологии магнитного скирмиона и образованием перетяжки (число точек перегиба увеличивается с одной до трех). При дальнейшем возрастании  $R_0$  величина  $R_v$  также увеличивается, становясь линейно зависимой от  $R_0$ . В то же время, анализ поведения  $R_v$  при малых  $R_0$  показывает, что существует предельный размер дефекта, ниже которого ВН обоих типов на них не образуются. Аналогичное утверждение имеет место и при анализе зависимостей  $R_v$  от  $r$  для фактора качества  $Q$  и глубины потенциальной ямы  $\Delta K$ : для них также существуют критические значения, меньше которых ВН на дефектах не зарождаются.

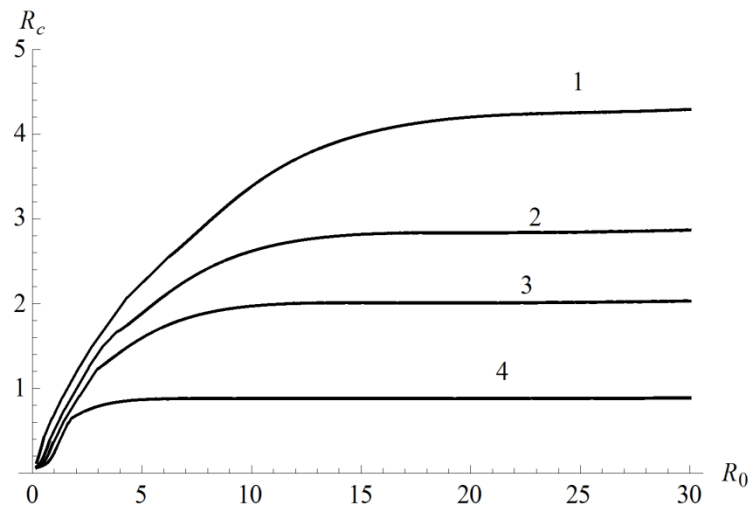


Рисунок 3— Графики зависимости размера кора скирмиона с полярностью  $m_z(0) = -1$  от радиуса дефекта при следующих значениях материальных параметров:  $K_{u2} = -K_{u1}, A_2 = A_1, Q = 5, M_{s2} = M_{s1}, D = 10$

Линия 1 соответствует  $K_{u2} = -0,2K_{u1}$ , линия 2 —  $K_{u2} = -0,5K_{u1}$ , линия 3 —  $K_{u2} = -K_{u1}$ , линия 4 —  $K_{u2} = -5K_{u1}$

Кроме того, было исследовано влияние размера дефекта на радиусы коров и вихреподобных неоднородностей обоих типов, а также на их энергии. С учетом полученных данных построена диаграмма устойчивых состояний вихреподобных неоднородностей в переменных  $Q - R_0$  (рисунок 4), из которой следует, что ВН устойчивы в области, ограниченной снизу кривой  $Q =$

$Q_1(R_0)$ , а слева – кривой  $Q = Q_2(R)$ . Установлено, что на нижнюю границу диаграммы существенное влияние оказывает глубина потенциальной ямы  $\Delta K$ : чем больше  $\Delta K$ , тем она ближе к критической линии  $Q_0 = 1$  и наоборот. В то же время кривая  $Q_1(R)$  практически не зависит от  $M_{s2}$ , но зависит от параметра  $A_2$ : при его возрастании (по сравнению с  $A_1$ ), нижняя кривая смещается вверх и наоборот. С другой стороны, кривая  $Q = Q_2(R_0)$  зависит от  $M_{s2}$ , смещая её влево при возрастании  $M_{s2}$ . Аналогичная тенденция смещения кривой  $Q = Q_2(R_0)$  влево будет иметь место при возрастании  $\Delta K_u$ .

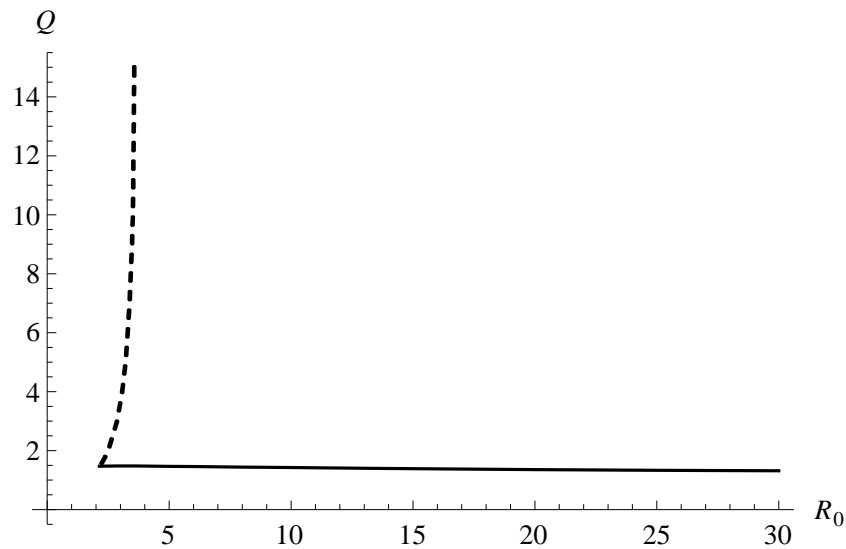


Рисунок 4– Диаграмма области устойчивости вихреподобного образования с полярностью  $m_z(0) = -1$  при следующих значениях материальных параметров:  $K_{u2} = -K_{u1}, A_2 = A_1, M_{s2} = M_{s1}, D = 10$

В **третьей главе** были изучены процессы перемагничивания одноосных модифицированных пленок во внешнем магнитном поле различной направленности: действующем вдоль нормали к её поверхности и перпендикулярно к ней. В этом случае в подынтегральное выражение энергии магнетика (1) добавляется слагаемое  $\mathcal{E}_H = -M_s \mathbf{m} \mathbf{H}$ , представляющее плотность энергии зеемановского взаимодействия. Численный анализ уравнений Эйлера–Лагранжа с учетом зеемановского слагаемого показал, что ВН обоих типов трансформируются, характер их изменений зависит от типа ВН и от ориентации  $\mathbf{H}$ . В случае ВН первого типа ( $m_z(0) = 1$ ) при включении

магнитного поля с  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oz}$  его структура видоизменяется. С увеличением  $H$  размер его кора увеличивается, а размер ВН и максимальное отклонение  $m$  от оси  $Oz$ , характеризуемое углом  $\theta_m$ , уменьшаются. В результате при возрастании поля ВН первого типа, уменьшаясь в размерах, постепенно перемагничивается и затем исчезает как объект.

Если магнитное поле действует на ВН второго типа с полярностью, противоположной полю, то его трансформация происходит в несколько этапов. В начале при возрастании поля она уменьшается в размерах. При достижении полем критического значения  $H = H_c$  скирмион может схлопнуться и исчезнуть, так как при  $H > H_c$  его энергия становится больше энергии однородного состояния. В то же время ВН может так же превратиться и в нетопологический солитон, так как вблизи  $H = H_c$  их энергии сравниваются. Для выявления предпочтительного сценария его перемагничивания было решено исследовать данный процесс с помощью пакета программ открытого доступа OOMMF [11]. Для этого был рассмотрен одноосный ферромагнитный диск радиуса  $R = 300$  нм с пониженной константой анизотропии  $K_u$ :  $D = 30$  нм,  $R_0 = 30$  нм,  $A_1 = A_2 = 2,5 \cdot 10^{-13}$  Дж/м,  $K_{u1} = 3 \cdot 10^4$  Дж/(м<sup>3</sup>),  $K_{u2} = -0,5 \cdot 10^4$  Дж/(м<sup>3</sup>),  $M_{s1} = M_{s2} = 6.6 \cdot 10^5$  А/м. Размеры ячейки разбиения брались как  $2,5 \times 2,5 \times 2,5$  нм. Согласно расчетам в пакете OOMMF, процессы перемагничивания магнитного скирмиона, образующегося в центре дефекта под действием перпендикулярного магнитного поля ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oz}$ ), будут радиус кора и размеры ВН. Такая тенденция будет иметь место до тех пор, пока при  $H = H_c = 525$  мТл не изменится полярность кора. Таким образом, магнитный скирмион в поле  $H = H_c$  превращается в 0-скирмион.

При дальнейшем возрастании поля 0-скирмион повторит все этапы изменения его структуры и при  $H = H_c$  ( $H_c = 790$  мТл) он полностью перемагнитится и образец становится однородно намагниченным.

При действии планарного магнитного поля на диск с дефектом, в центре которого расположен скирмион, нарушается симметрия магнитной системы; он перестает быть аксиальным. В данном случае магнитные моменты,

имеющие энергетически невыгодные ориентации по отношению к направлению поля, ведут себя неодинаковым образом. В результате кор перемещается перпендикулярно полю в сторону, где часть магнитных моментов образует с полем тупой: угол, т.е. сверху вниз. В поле, превышающем  $H = H_c$ , процесс перемещения завершается вытеснением кора, за пределы области дефекта, и полным премагничиванием образца вдоль поля.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Установлено, что в одноосных ферромагнитных плёнках на дефектах типа «потенциальная яма» при определенных условиях могут зарождаться вихреподобные неоднородности четырёх видов, различающиеся полярностью кора, ориентацией намагниченности на периферии, структурой, топологическим зарядом и энергией. Два из них представляют вырожденные состояния нетопологического солитона, имеют нулевой топологический заряд ( $q = 0$ ), в их структуре содержатся две точки перегиба, и энергетически относятся к метастабильным структурам. Два другие представляют вырожденные состояния магнитного скирмиона, имеют топологический заряд  $q = 1$ , в профиле имеются три точки перегиба и являются энергетически более выгодными структурами, чем первый вид неоднородностей во всей области изменения материальных параметров и характеристик дефекта.

2. Показано, что зарождение этих неоднородностей в рассматриваемых плёнках носит пороговый характер, существуют критические размеры дефекта, значения глубины потенциальной ямы и факторы качества материала, ниже которых они не образуются.

3. Определены основные этапы трансформации вихреподобных неоднородностей обоих видов в исследуемых плёнках под действием магнитного поля, направленного вдоль плоскости и по нормали к поверхности плёнки. Найдены критические значения магнитных полей, при которых происходит существенная перестройка их структуры вплоть до их исчезновения.

4. Выявлено, что в магнитном поле, направленном противоположно ориентации кора при некотором критическом значении поля происходит превращение магнитного скирмиона в нетопологический солитон. Таким образом, установлено, что нетопологический солитон становится устойчивым образованием на определенном этапе перемагничивания магнитного скирмиона.
5. Найдено, что при некоторых значениях материальных параметров, когда магнитный скирмион не существует, он может образоваться как устойчивая неоднородность, при действии перпендикулярного поля.
6. Показано, что при действии планарного поля на магнитный скирмион он перемещается как единое целое (без изменения своей структуры) перпендикулярно направлению поля. По направлению смещения скирмиона относительно поля, можно определить его киральность.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук и приравненных к ним:**

1. Вахитов, Р. М. Вихреподобные образования на дефектах магнитоодноосных пленок / Р. М. Вахитов, **А. А. Ахметова**, Р. В. Солонецкий // Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61, № 3. – С. 453-459.
2. Вахитов, Р. М. Особенности перемагничивания магнитоодноосных пленок с колумнарными дефектами / Р. М. Вахитов, Р. В. Солонецкий, **А. А. Ахметова** // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 5. – С. 462-468.
3. Vakhitov, R. M. Stable states of vortex-like magnetic formations in inhomogeneous magnetically uniaxial films and their behavior in a longitudinal magnetic field / R. M. Vakhitov, R. V. Solonetsky, **A. A. Akhmetova** // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 128, No. 15. – P. 0002280.
4. Vakhitov, R. M. Behavior of Vortex-Like Inhomogeneities Originating in Magnetic Films with Modulated Uniaxial Anisotropy in a Planar Magnetic Field / R. M. Vakhitov, R. V. Solonetsky, **A. A. Akhmetova**, M. A. Filippov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, No. 3. –p. 13.
5. Вахитов, Р. М. Процессы перемагничивания одноосных ферромагнитных пленок с пространственно модулированными параметрами / Р. М. Вахитов, **А. А. Ахметова**, М. А. Филиппов, Р. В. Солонецкий // Физика металлов и металловедение. – 2024. – Т. 125, № 5. – С. 513-520.
6. Vakhitov, R. M. Two-factor analysis of magnetic skyrmions stability in multilayer modified films / R. M. Vakhitov, **A. A. Akhmetova**, M. A. Filippov, A. A. Khakimullina // Letters on Materials. – 2025. – Vol. 15, No. 4(60). – P. 344-349.
7. Vakhitov, R. M. Possible structures of skyrmion states in chiral ferromagnetic films with spatially modulated uniaxial anisotropy / R. M. Vakhitov, **A. A.**

Akhmetova, M. A. Filippov // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2025. – Vol. 37, No. 5. – P. 055802.

**Основные тезисы в сборниках материалов российских и международных конференций:**

1. Akhmetova A.A. Magnetic inhomogeneities appeared on secluded defects of through type in magnetic uniaxial films / Vakhitov R.M., Solonetsky R.V., Akhmetova A.A. // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) Book of Abstracts, M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics – Moscow, 2017. – p. 920.

2. Вахитов, Р.М. Процессы перемагничивания магнитоодноосных плёнок с колумнарным дефектом в перпендикулярном поле / Р. М. Вахитов, А. А. Ахметова, Р. В. Солонецкий, М. А. Филиппов // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции "Уфимская осенняя математическая школа-2021" : Тезисы докладов XII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию профессора БашГУ Фарзтдинова Миркашира Минигалиевича, Уфа, 06–09 октября 2021 года / Отв. редактор Л.А. Габдрахманова. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2021. – С. 51-52.

8. Филиппов, М.А. Исследование структуры и свойств вихреподобных неоднородностей в модулированных ультратонких ферромагнитных плёнках / М. А. Филиппов, Р. М. Вахитов, А. А. Ахметова, Р. В. Солонецкий // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции "Уфимская осенняя математическая школа-2022" : Тезисы докладов XIII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию образования математического и физического факультетов БашГУ, Уфа, 21–22 октября 2022 года / Отв. редактор Л.А. Габдрахманова. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2022. – С. 52-53.

9. Vakhitov R.M. Structure and stable state of magnetic vortex-like inhomogeneities in modulated ultrathin magnetic films / R.M. Vakhitov, R.V. Solonetsky, A.A. Akhmetova, M.A. Filippov // В книге: Samarkand International Symposium on Magnetism 2023. Book of Abstracts. Samarkand, 2023. С. 123.
10. Филиппов, М. А. Свойства и стабильность скирмионных состояний в модулированных ультратонких магнитных пленках / М. А. Филиппов, Р. М. Вахитов, А. А. Ахметова, Р. В. Солонецкий // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции "Уфимская осенняя математическая школа-2024" : Тезисы докладов XV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 300-летию Российской академии наук, Уфа, 06–09 октября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 47-48.
11. Вахитов, Р. М. Особенности стабилизации вихреподобных неоднородностей в ультратонких ферромагнитных модифицированных пленках / Р. М. Вахитов, А. А. Ахметова, Р. В. Солонецкий, М. А. Филиппов // Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах : Сборник докладов XXV международной конференции, Москва, 01–06 июля 2024 года. том 2. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 262-266.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- [1] Mühlbauer, S. Skyrmion lattice in a chiral magnet / S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, P. Böni // Science.– 2009.– V. 323.– P. 915-919.
- [2] Everschor–Sitte, K. Perspective: Magnetic skyrmions – Overview of recent progress in an active research field / K. Everschor–Sitte, J. Masell, R. M. Reeve, M. Kläui // J.Appl.Phys.–2018.– V. 124.– P. 1-17.
- [3] Самардак, А.С. Топологически нетривиальные спиновые текстуры в тонких магнитных пленках / А. С. Самардак, А. Г. Колесников, А. В. Давыденко, М. Е. Стеблей, А. В. Огнев // ФММ.– 2022. – Т. 123.– 3. –с. 260-

283.

[4] Сапожников, М. В. Магнитные скирмионы в пленках с модулированной толщиной / М. В. Сапожников, О. В. Ермолаева, Е. В. Скороходов, Н. С. Гусев, М. Н. Дроздов // Письма в ЖЭТФ.– 2018.– т. 107, 6.– с. 378-382.

[5] Moreau–Luchaire, C. Additive interfacial chiral interaction in multilayers for stabilization of small individual skyrmions at room temperature / C. Moreau–Luchaire, C. Moutafis, N. Reyren, J. Sampaio, C. A. F. Vaz, N. Van Horne, K. Bouzehouane, K. Garcia, C. Deranlot, P. Warnicke, P. Wohlhüter, J.–M. George, M. Weigand, J. Raabe, V. Cros, A. Fert // Nat. Nanotechnol.– 2016.– V. 11. – P. 444-448.

[6] Büttner, F. Dynamics and inertia of skyrmionic spin structures / F. Büttner, C. Moutafis, M. Schneider, B. Krüger, C. M. Günther, J. Geilhufe, C. v. Korff Schmising, J. Mohanty, B. Pfau, S. Schaffert, A. Bisig, M. Foerster, T. Schulz, C. A. F. Vaz, J. H. Franken, H. J. M. Swagten, M. Kläui und S. Eisebitt // Nature Phys.– 2015. – V. 11. – P. 225-228.

[7] Sapozhnikov, M.V. Skyrmion lattice in a magnetic film with spatially modulated material parameters. / M. V. Sapozhnikov // J. Magn. Magn. – 2015. – V. 396– P. 338-344.

[8] Вахитов, Р. М. Особенности структуры микромагнитных образований на дефектах пленок ферритов гранатов / Р. М. Вахитов, Т. Б. Шапаева, Р. В. Солонецкий, А. Р. Юмагузин // ФММ. – 2017. – Т. 118, 6.– с. 571-575.

[9] Sapozhnikov M. V. Artificial dense lattice of magnetic bubbles / M. V. Sapozhnikov, S. N. Vdovichev, O. L. Ermolaeva, N. S. Gusev, A. A. Fraerman, S. A. Gusev, Yu. V. Petrov // Appl. Phys. Lett. –2016. – V. 109, I.4. – 042406. – P. 6.

[10] Devolder, T. Magnetic properties of He<sup>+</sup>-irradiated Pt/Co/Pt ultrathin films/ T. Devolder, J. Ferré, C. Chappert, H. Bernas, J. P. Jamet, V. Mathet // Phys. Rev. B. –2001 – V. 64, I.4. – 064415

[11] Donahue, M.J.; Porter D.G. OOMMF User’s Guide, version 2.0a3. National Institute of Standard and Technolog: Gaithersburg, MD, USA. 2021.

Websites: <https://math.nist.gov/oommf/doc/userguide20a3/userguide/>

[12] M. Beg, M. Lang and H. Fangohr, «Ubermag: Toward More Effective Micromagnetic Workflows,» in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2022, Art no. 7300205, doi: 10.1109/TMAG.2021.3078896