

на правах рукописи

**САКАЕВ РУСЛАН ДЖАЛИЛЕВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ  
НА ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СОСТОЯНИЕ В МАГНЕТИКЕ И  
МАГНИТОУПРУГИЕ СОЛИТОНЫ  
ВБЛИЗИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА  
АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ-ФЕРРОМАГНЕТИЗМ**

специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

УФА - 2008

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Башкирского государственного университета.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Харисов Анвар Тафкильевич

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Шамсутдинов Миниахат Асгатович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Бучельников Василий Дмитриевич

доктор физико-математических наук,  
профессор Дорошенко Рюрик Александрович

Ведущая организация: Институт физики Дагестанского научного  
центра РАН, г.Махачкала,

Защита диссертации состоится «\_\_»\_\_\_\_\_200\_г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета ДМ 002.099.01 в Институте физики  
молекул и кристаллов УНЦ РАН по адресу г.Уфа, Проспект Октября, 71.

Отзывы направлять по адресу: 450075, г. Уфа, Проспект Октября, 151,  
ИФМК УНЦ РАН, диссертационный совет

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФМК УНЦ  
РАН

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_200\_г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ломакин Г.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Более сорока лет область фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм привлекает внимание как прикладной, так и теоретической науки, давая почву для новых экспериментов и развития теорий магнетизма [1, 2]. Возникновение статических и динамических явлений, затрагивающих различные подсистемы одного и того же кристалла, становится возможным из-за проявления и усиления взаимосвязи между ними в области фазовых переходов [1]. Это приводит к проявлению многих линейных и нелинейных эффектов, наблюдаемых в редкоземельных металлах и ортоферритах, ромбоэдрических и тетрагональных антиферромагнетиках [3], в манганитах [4].

При фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм существенно изменяются как магнитные, так и упругие параметры кристалла [1, 3]. Такие переходы могут быть как спонтанными, так и индуцированными внешним магнитным полем [1, 5]. Общим свойством фазовых переходов первого рода в магнетиках, как известно, является образование промежуточного состояния [6]. Как правило, промежуточное состояние представляет собой периодическую доменную структуру – чередующиеся области конкурирующих фаз, разделенные межфазными границами. Такая доменная структура магнитооптическим методом визуально наблюдается в диспрозиевом  $DyFeO_3$  [7] и в эрбиевом  $ErFeO_3$  ортоферритах [8] (рис. 1).

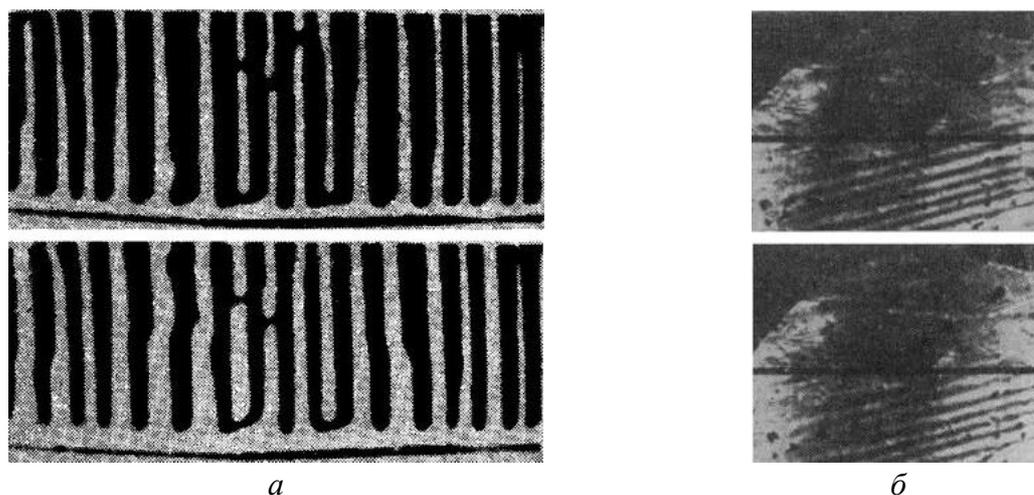


Рис. 1. Визуальное наблюдение доменной структуры а) в диспрозиевом  $DyFeO_3$  [7] и б) в эрбиевом  $ErFeO_3$  ортоферритах [8].

В результате экспериментальных исследований фазового перехода первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм в  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$  не обнаружена периодическая доменная структура магнитного промежуточного со-

стояния [4] (рис. 2). Фазовый переход происходит через расширение области выгодной фазы и уменьшение области метастабильной фазы. Авторы предположили, что промежуточное состояние с периодической доменной структурой не образуется из-за слишком большой энергии межфазных стенок, обусловленной упругими напряжениями, возникающими на границе фаз в результате изменений параметров кристаллической решетки при переходе. Однако, в настоящее время этот вопрос остается теоретически не исследованным.

Существующая теория периодической доменной структуры промежуточных состояний не всегда полностью учитывает влияние магнитоупругого взаимодействия (магнитострикции).

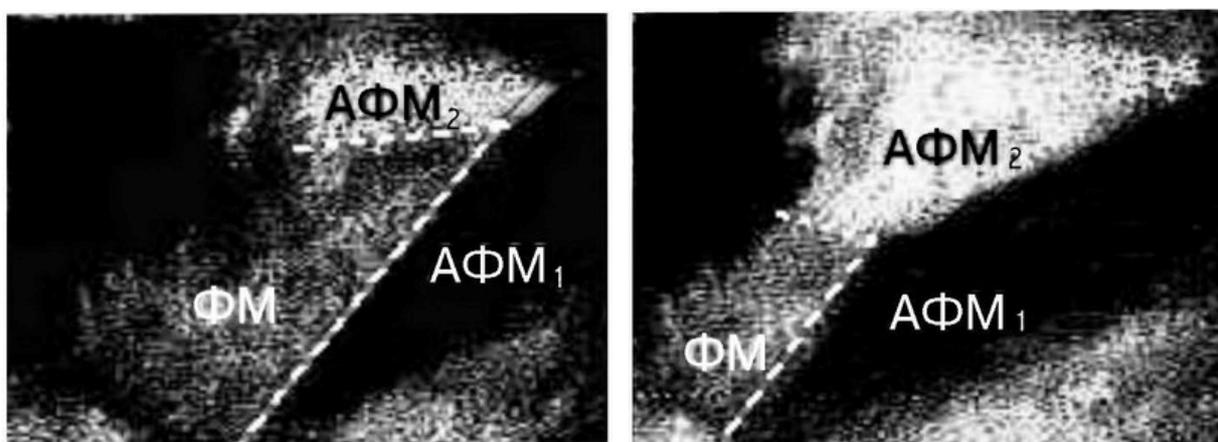


Рис. 2. Визуальное наблюдение промежуточного состояния в  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$  [4].

Считалось, что основным является вклад линейной анизотропной магнитострикции релятивистского происхождения [9]. Последние исследования указывают на то, что необходимо учитывать вклад обменно-стрикционного (объемного) взаимодействия [3, 10]. В ряде случаев в области фазовых переходов первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм велика роль не линейной магнитострикции, а обменной (объемной) [3]. Влияние обменной магнитострикции на характеристики не 180-градусной доменной структуры может оказаться даже более существенной, чем линейной магнитострикции. Также, например, объемная магнитострикция связана с колоссальным магнитосопротивлением и размягчением кристаллической решетки в некоторых манганитах [10].

В случае, когда фазовый переход идет без образования доменной структуры, как например в [4], перемагничивание происходит через возникновение и движение магнитной неоднородности. Локализованные магнитные неоднородности изучены гораздо слабее доменных границ из-за их сложной структуры и трудностей экспериментального исследования. По-

следние теоретические исследования [11] позволили учесть затухание в описании неоднородного перемагничивания. С точки зрения развития теории, представляет интерес изучение динамики локализованных магнитных неоднородностей при фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм с учетом обменной магнитострикции.

Экспериментальные работы, проведенные в 70-х годах [1] показали, что обменно-инверсионная теория фазовых переходов Киттеля нуждается в доработке и уточнении. Магнитооптическое исследование в  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  [4] также подтверждает тот факт, что полнота существующей теории явлений, возникающих вблизи фазовых переходов типа антиферромагнетизм-ферромагнетизм, далеко не совершенна. Не все из них производят учет обменно-стрикционных механизмов, которые в области фазового перехода могут иметь значительно большее влияние на параметры явлений чем, например, линейное анизотропное магнитоупругое взаимодействие или внешнее магнитное поле.

В области магнитных фазовых переходов наблюдается значительный рост нелинейности. Среди нелинейных объектов в конденсированных средах исключительное место принадлежит уединённым частицеподобным волнам – солитонам. В магнетиках уединённые волны интенсивно исследуются теоретически и экспериментально с 70-х годов [12-16]. В связи с тем, что в области фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм связь между упругой и магнитной подсистемами значительно усиливается, небольшие упругие деформации могут привести к возбуждению и распространению связанных магнитоупругих волн, в том числе уединённых – солитонов. Нахождение солитонных решений уравнений динамики магнетиков с учетом магнитострикции остается важной задачей.

Из всего вышеизложенного вытекает **актуальность** исследований роли обменной магнитострикции в образовании промежуточного состояния при фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм, её влияние на динамику магнитной неоднородности, возникающей при данном переходе, а также на параметры и устойчивость нелинейных магнитоупругих волн (солитонов). Наличие более полной теории фазовых переходов антиферромагнетизм-ферромагнетизм дало бы потенциальную возможность управлять характеристиками кристаллов, используя более простые методы воздействия.

**Целью** диссертационной работы является исследование влияния магнитоупругого и обменного взаимодействий как единого обменно-стрикционного механизма на статические и динамические свойства магне-

тиков при фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм. В частности, влияние магнитострикции на образование периодической доменной структуры в промежуточном состоянии при фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм, на динамику магнитных неоднородностей, и на параметры и устойчивость нелинейных магнитоупругих волн – солитонов в области фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм.

**Научная новизна** определяется положениями, выносимыми на защиту.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. В магнетиках с большой магнитострикцией образование периодической доменной структуры промежуточного состояния при спонтанном фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм энергетически не выгодно из-за значительного положительного прироста энергии магнитострикции. При индуцированном внешним магнитным полем фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм образование периодической доменной структуры возможно в кристаллах с малыми значениями обменной магнитострикции.
2. Время распада зародыша перемагничивания на две сильно взаимодействующие межфазные стенки и образования домена новой фазы уменьшается с ростом вклада эффективного обменно-стрикционного поля и внешнего магнитного поля, и возрастает с увеличением параметра затухания.
3. В области фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм возможно существование нелинейных малоамплитудных магнитоупругих волн – солитонов, амплитуда и ширина которых существенно изменяются под воздействием магнитного поля.
4. Устойчивым относительно малых искажений волнового фронта является магнитоупругий солитон, движущийся со скоростью, меньшей, чем скорость продольных линейных квазиупругих волн в кристалле.

**Научная и практическая значимость работы.** Полученные результаты расширяют существующие представления о влиянии обменной магнитострикции на структуру промежуточного состояния, динамику зародышей новых фаз и солитонов. Результаты объясняют существующие экспериментальные данные и могут быть использованы при постановке новых экспериментов по исследованию фазовых переходов антиферромагнетизм-ферромагнетизм, нелинейных волн и солитонов в материалах с сильной обменной магнитострикцией.

**Достоверность** полученных результатов и выводов определяется использованием современных методов математической и теоретической физики, а также физики магнитных явлений, совпадением результатов в предельных случаях с ранее известными, а в некоторых случаях – и с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международной конференции «Фазовые переходы и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала–2000), XVIII – XX Международных школах-семинарах «Новые магнитные материалы в микроэлектронике» НМММ (Москва–2002, 2004, 2006), международном симпозиуме по магнетизму (Moscow International Symposium of Magnetism) MISM–2005 (Москва–2005), международной конференции «Functional Materials» IFCM'2005 (Крым, Партенит–2005), 9-ом Международном симпозиуме «Упорядочения в металлах и сплавах» – ОМА-9 (Ростов-на-Дону–2006), Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала–2007), VII и VIII Всероссийских научных конференциях студентов - физиков и молодых ученых России ВНКСФ (Санкт-Петербург–2001, Екатеринбург–2002), Всероссийской школе-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2007).

Исследования, представленные в диссертации, выполнялись в рамках ФЦП «Интеграция» (проект Б0065), проектов РФФИ (гранты № 01-02-17373, № 02-02-17417, № 04-02-16424), гранта для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов Федерального агентства по образованию (№ А04-2.9-1231).

**Публикации.** Основные результаты опубликованы в 16 печатных работах. В совместных публикациях по теме диссертационной работы личный вклад автора заключается в участии в постановке задач, в проведении всех численных и аналитических расчетов, в обсуждении и интерпретации полученных результатов и написании статей.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 136 страниц, включая 33 рисунка и список цитированной литературы из 137 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование темы диссертации, выявлена цель диссертации, показана актуальность решаемых задач, их научная и практическая ценность, перечислены основные результаты, полученные в работе. Даны сведения о структуре и содержании диссертации

**Первая глава** является обзорной. В ней приведены краткие сведения о ферромагнетиках и антиферромагнетиках, о магнитных фазовых переходах и о некоторых явлениях, возникающих в области фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм, а также о магнитоупругих волнах. В главе приводится краткий анализ предшествующих работ по исследованию магнитных фазовых переходов. Показано, что в ряде экспериментов не обнаружена периодическая доменная структура промежуточного состояния при фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм первого рода. Высказана гипотеза о том, что обменная магнитострикция может влиять на появление или отсутствие периодической доменной структуры при фазовом переходе первого рода. Также в главе проводится обзор работ по исследованию магнитоупругих солитонов и локализованных магнитных неоднородностей. Показано, что учет влияния обменной магнитострикции при расчетах параметров солитонов или магнитных неоднородностей не производился. На основании поднятых в обзоре предшествующих работ проблем, в заключении главы ставится основная цель данной работы.

**Во второй главе** теоретически исследовано влияние обменной магнитострикции на условия образования промежуточного состояния при фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм на примере тетрагонального антиферромагнетика. Плотность энергии состоит из магнитной  $f_m$ , магнитоупругой  $f_{me}$  и упругой  $f_e$  компонент [3]:

$$f = f_m + f_{me} + f_e,$$

где

$$f_m = 2M_0 \left\{ H_E^0 \mathbf{m}^2 + J \mathbf{m}^2 \mathbf{l}^2 + \frac{1}{2} \mu_\gamma \left( \frac{\partial \mathbf{l}}{\partial x_\gamma} \right)^2 + \frac{1}{2} \lambda_\gamma \left( \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x_\gamma} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} H_A l_z^2 + \frac{1}{2} h_A m_z^2 + K_{pl} l_x^2 l_y^2 + K_{pm} m_x^2 m_y^2 - \mathbf{m} \mathbf{H} \right\},$$

$$f_{me} = B_\gamma e_\gamma \mathbf{l}^2 + G_\gamma e_\gamma \mathbf{m}^2, \quad f_e = \frac{1}{2} C_{\gamma\delta} e_\gamma e_\delta.$$

Здесь  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{l}$  – относительные вектора ферромагнетизма и антиферромагнетизма, удовлетворяющие условиям для равномодульной модели;

$M_0 = |\mathbf{M}_1| = |\mathbf{M}_2|$  – намагниченность насыщения магнитных подрешеток;  $H_E^0$  – обменное поле;  $J$  – постоянная биквадратичного обменного взаимодействия;  $\mu_\gamma, \lambda_\gamma$  – постоянные неоднородного обменного взаимодействия;  $H_A, h_A$  – поля магнитной анизотропии;  $K_{pl}, K_{pm}$  – константы тетрагональной анизотропии;  $B_\gamma, G_\gamma$  – константы обменной магнитострикции;  $C_{\gamma\delta}$  – тензор модулей упругости;  $e_\gamma \equiv e_{ij}$  – тензор упругих деформаций ( $e_1 \equiv e_{11}$ ,  $e_2 \equiv e_{22}$ ,  $e_3 \equiv e_{33}$ ,  $e_4 \equiv e_{23}$ ,  $e_5 \equiv e_{13}$ ,  $e_6 \equiv e_{12}$ );  $\mathbf{H}$  – напряженность внешнего магнитного поля.

Построена фазовая диаграмма (рис. 3) с линией фазового перехода первого рода  $h_{e0}A$  в нормированных на эффективное магнитоупругое поле  $H_{me}$  координатах обменно-стрикционного ( $h_e = H_E/H_{me}$ ) и магнитного поля ( $h = H/H_{me}$ ).

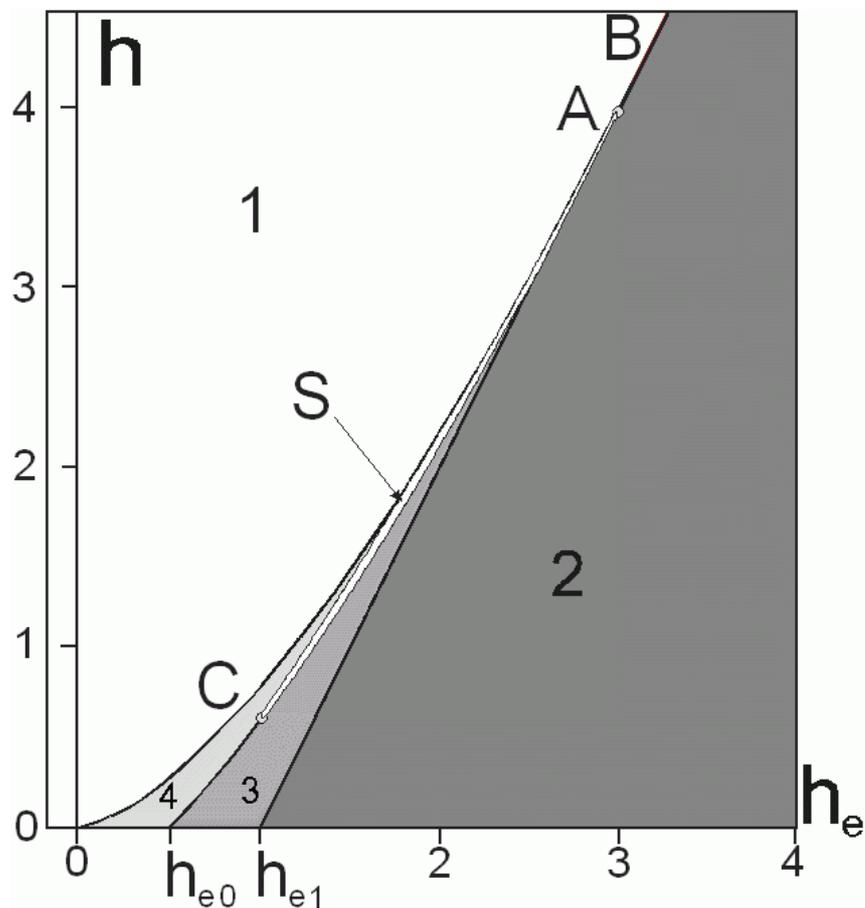


Рис. 3. Магнитная фазовая диаграмма.  $h_{e0}=0,5$ ,  $h_{e1}=1$ . 1 и 4 – области абсолютной устойчивости ферромагнитной фазы (ФМФ), 2 и 3 – области абсолютной устойчивости неколлинеарной фазы (НФ), 3 и 4 – области метастабильности ФМФ и НФ, соответственно.  $h_{e0}A$  – линия фазового перехода первого, а  $AB$  – второго рода.  $A$  – трикритическая точка.  $h_{e1}B$  – линия потери устойчивости ФМФ,  $OB$  – линия потери устойчивости НФ.

Для случая, когда фазовый переход первого рода аниферромагнетизм-ферромагнетизм проходит с образованием периодической доменной структуры, рассчитаны компоненты тензора напряжений, возникающие из-за дополнительных деформаций кристалла, и приводящие к существованию прироста обменно-стрикционной энергии магнетика:

$$\Delta f_{me} = K_{me} \left( \langle \mathbf{m}^2 \rangle - \mathbf{m}^2 \right)^2.$$

$$K_{me} = \frac{1}{2C} \left( (C_{33}(C_{11} - C_{12}) + 2C_{13}^2)(G_1 - B_1)^2 + C_{11}(C_{11} + C_{12})(G_3 - B_3)^2 - 4C_{11}C_{13}(G_1 - B_1)(G_3 - B_3) \right),$$

$$C = C_{11}(C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2), \quad \langle m \rangle = \xi m_0^{(1)} + (1 - \xi)m_0^{(2)}.$$

Здесь  $0 \leq \xi \leq 1$  – доля ферромагнитной фазы в полном объеме кристалла,  $m_0^{(1)}$ ,  $m_0^{(2)}$  – значение вектора ферромагнетизма в первой и во второй фазах.

Показано, что в кристаллах с сильной обменной магнитострикцией существование промежуточного состояния при спонтанном фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм энергетически невыгодно из-за значительной величины положительного прироста энергии магнетика. Показана возможность существования промежуточного состояния в кристаллах со слабой обменной магнитострикцией при индуцированном внешним магнитным полем фазовом переходе. В этом случае прирост энергии магнетика, возникающий при образовании периодической доменной структуры может становится отрицательным:

$$\Delta w = f_{pds} - \tilde{f} = (f_0 + f_{ms} + f_{dw}) - (\tilde{f}_0 + \tilde{f}_{ms}) < 0.$$

Здесь:  $\tilde{f}_0$  и  $\tilde{f}_{ms}$  – плотности энергии основного состояния и магнитостатической энергии магнетика без образования периодической доменной структуры;  $f_0$ ,  $f_{ms}$  и  $f_{dw}$  – плотности энергии основного состояния, магнитостатической энергии магнетика и энергии доменных стенок в магнетике при образовании периодической доменной структуры.

Построены диаграммы областей существования промежуточного состояния в зависимости от нормированных величин: обменной магнитострикции  $\tilde{h}_{ea}$ , внешнего магнитного поля  $\tilde{h}$ , упругих и магнитоупругих параметров кристалла  $\tilde{k}_{me}$  (рис. 4).

Здесь параметры

$$\tilde{h}_{ea} = \frac{1}{4\pi M_0} \left( H_E^0 + \frac{h_A}{2} \right), \quad \tilde{h} = \frac{H}{4\pi M_0}$$

нормировались на поле насыщения ферромагнитного состояния  $4\pi M_0$ , а

$$\tilde{k}_{me} = \frac{K_{me}}{2\pi M_0^2}, \quad \Delta\tilde{w} = \frac{\Delta w}{2\pi M_0^2}$$

на магнитостатическую энергию однородного ферромагнетика  $2\pi M_0^2$ .

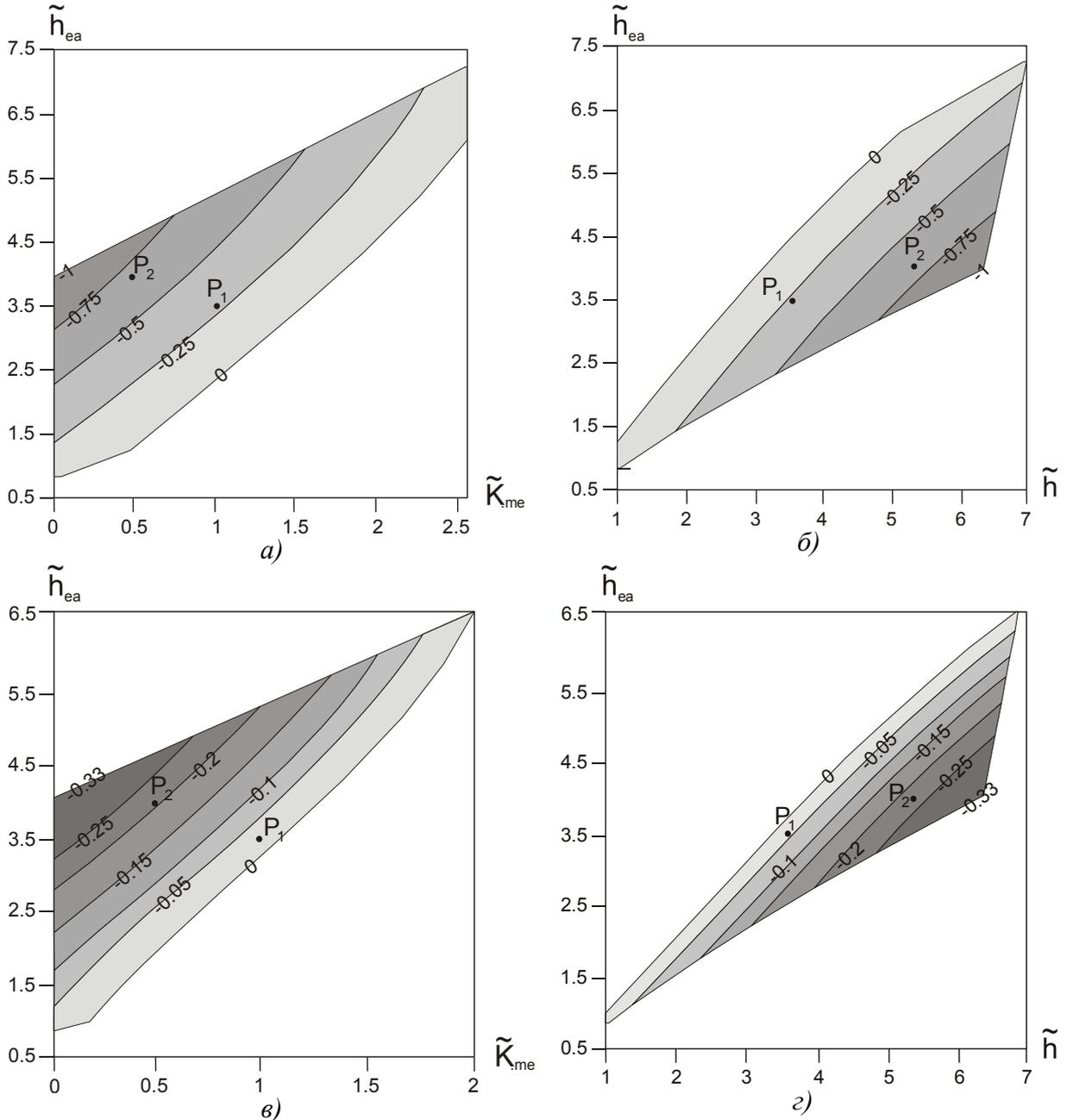


Рис. 4. Области существования промежуточного состояния в случае образца в форме очень сплюснутого эллипсоида вращения (а, б) и в форме шара (в, г).

На фазовой диаграмме показана область параметров, где возможно появление периодической доменной структуры промежуточного состояния (рис. 3). Неокрашенная область  $S$ , расположенная вдоль кривой  $h_{e0}A$ , ограниченная снизу точкой  $C$ , и сверху точкой  $A$  – это рисунок 4б, адаптиро-

ванный к системе координат фазовой диаграммы (рис. 3). Полученный результат соответствует условиям задачи, поставленной в начале главы. Ограничение области  $S$  сверху точкой  $A$  связано с тем, что  $A$  – трикритическая точка. Выше точки  $A$  кривая фазового перехода первого рода  $h_{e0}A$  переходит в линию фазового перехода второго рода  $AB$ . Ограничение области  $S$  снизу точкой  $C$ , связано с тем, что при построении диаграмм (рис. 4) не рассматривались магнитные поля  $H$  ниже поля насыщения ферромагнитного состояния, равного  $4\pi M_0$ .

Построена диаграмма хода фазового перехода первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм, то есть зависимость  $\xi$  – доли ферромагнитной фазы в общем объеме магнетика, от внешнего магнитного поля (рис. 5). Линии 1-5 соответствуют различным значениям обменной магнитострикции. Полученная диаграмма сравнена с экспериментальной работой по визуализации промежуточного состояния при фазовом переходе первого рода в ортоферрите эрбия  $\text{ErFeO}_3$  [8]. Поле перехода, указанное в [8], составляет  $H \approx 4\text{кЭ}$ ; при этом ширина области существования промежуточного состояния по внешнему магнитному полю оценивается в  $\Delta H \sim 10^2 \text{Э}$ .

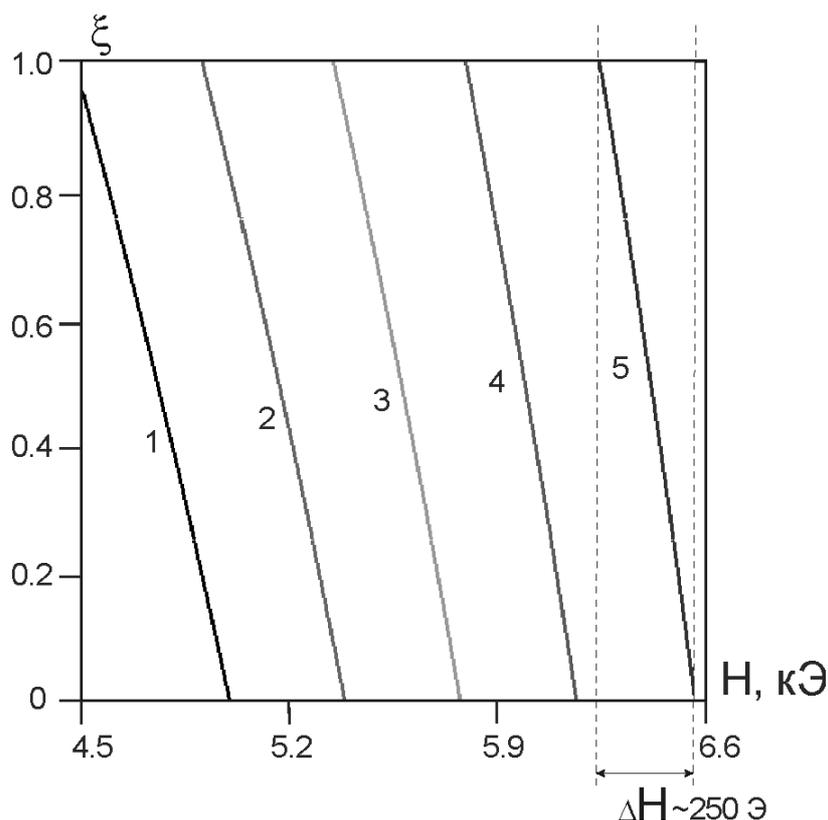


Рис. 5. Диаграммы хода фазового перехода первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм. Ось абсцис – внешнее магнитное поле  $H$ . Ось ординат – доля ферромагнитной фазы  $\xi$  в общем объеме магнетика. Кривые 1-5 соответствуют значениям параметра  $\tilde{h}_{ea}$  от 3,5 до 4,375 с шагом 0,175.

Из рис. 5 видно, что величина поля перехода лежит в пределах от 4,5 до 6,6 кЭ. Разность между значением магнитного поля, соответствующего правому концу кривой и значением магнитного поля, соответствующего левому концу кривой дает нам ширину области существования промежуточного состояния. Так, например, для кривой 5 на диаграмме 6 разность полей составит порядка 250 Э. Это по порядку совпадает с оценками в  $\Delta H \sim 10^2$  Э, приведенными в [8].

Проведенные сравнения ключевых величин с экспериментальными работами показали совпадение по порядку таких величин, как поле перехода и ширина перехода по полю.

**В третьей главе** рассмотрено влияние магнитострикции на динамику магнитной неоднородности вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм. Исследование проводилось на основе плотности свободной энергии для тетрагонального антиферромагнетика. На базе метода, предложенного для изучения влияния внешнего магнитного поля и линейной магнитострикции на магнитные неоднородности в легкоплоскостных антиферромагнетиках [11], было учтено влияние обменной магнитострикции на эволюцию магнитной неоднородности. При расчетах учитывалось затухание в магнитной подсистеме. Уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнения движения упругой среды, записанные в угловых переменных, были сведены к возмущённому уравнению  $\sin$ -Гордона:

$$v_{\tau\tau} - v_{\xi\xi} + \sin v = 2h_e \sin \frac{v}{2} + 2h \sin \frac{v}{4} - \tilde{\beta} v_{\tau}.$$

Здесь:  $v = 4\alpha$ ,  $\tau = t\gamma\sqrt{2H_A H_{me1}}$ ,  $\xi = x\sqrt{\frac{2H_{me1}}{\lambda}}$ ,

$$h_e = \frac{H_E}{H_{me1}}, \quad h = -\frac{H}{H_{me1}}, \quad \tilde{\beta} = \beta\sqrt{\frac{H_A}{2H_{me1}}},$$

где  $\alpha$  – половина угла между намагниченностями магнитных подрешеток,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $H_E$  – эффективное обменно-стрикционное поле,  $H_{me1}$  – эффективное магнитоупругое поле,

$$H_E = H_E^0 + \frac{G_0 - B_0}{2M_0} + \frac{(G_1 - B_1)^2}{4M_0 C_{11}}, \quad H_{me1} = J + \frac{(G_1 - B_1)^2}{4M_0 C_{11}}.$$

Рассматривалось солитонное решение в виде бризера [11]:

$$v = 4\text{arctg}\left(\sqrt{\frac{1-\Omega}{\varepsilon^2 + \Omega}} \cdot \frac{1}{\text{ch}(\xi\sqrt{1-\Omega})}\right),$$

$$v_\tau = -2\varepsilon \sin \frac{v}{2}, \quad \varepsilon = \varepsilon(\tau).$$

Здесь  $\Omega$  – медленно меняющийся со временем параметр бризера из-за наличия возмущения.

Получена система уравнений, показывающая характер зависимости параметров магнитной неоднородности от эффективного обменно-стрикционного и внешнего магнитного поля, а также затухания:

$$\begin{cases} \Omega_\tau = \frac{\varepsilon\sqrt{1-\Omega}}{4} I, \\ \varepsilon_\tau = \Omega + \varepsilon^2 - \frac{(1+\varepsilon^2)I}{8(1+F)\sqrt{1-\Omega}}. \end{cases}$$

где  $I = I(\varepsilon, \Omega, h_e, h, \tilde{\beta})$ ,  $F = F(\varepsilon, \Omega)$  не приведены из-за их громоздкости.

Из анализа неподвижной точки системы ( $\Omega_\tau = 0$ ,  $\varepsilon_\tau = 0$ ) получено значение критической амплитуды:

$$v_{cr} = 4 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1-\Omega_0}{\Omega_0}},$$

и критической частоты бризера:

$$\omega_0 = \sqrt{\Omega_0} = \sqrt{h_e + h}.$$

Магнитоупругий бризер большой амплитуды с критическими параметрами представляет собой зародыш устойчивой фазы в недрах метастабильной. При начальной амплитуде, меньшей амплитуды критического зародыша  $v_{cr}$  ( $\omega_0 > \sqrt{\Omega_0}$ , в размерных переменных  $\tilde{\omega}_0 > \gamma\sqrt{2H_A(H_E - H)}$ ), бризер совершает нелинейные периодические колебания [11], которые при наличии диссипации являются затухающими.

При амплитудах, больших  $v_{cr}$  ( $\omega_0 < \sqrt{\Omega_0}$ ,  $\tilde{\omega}_0 < \gamma\sqrt{2H_A(H_E - H)}$ ), зародыш новой фазы, имеющий форму бризера, распадается на две удаляющиеся друг от друга межфазные стенки с противоположными топологическими зарядами, ограничивающие домен устойчивой фазы.

Построены диаграммы зависимости времени распада бризера (время за которое параметр  $\Omega$  достигнет нуля) от обменно-стрикционного поля (рис. 6), внешнего магнитного поля (рис. 7), и затухания (рис. 8).

Показано, что время распада зародыша перемагничивания на две сильно взаимодействующие межфазные стенки уменьшается с ростом вклада эффективного обменно-стрикционного поля и внешнего магнитного поля, и возрастает с увеличением параметра затухания. Проведено сравнение с ранее полученными теоретическими результатами других исследователей.

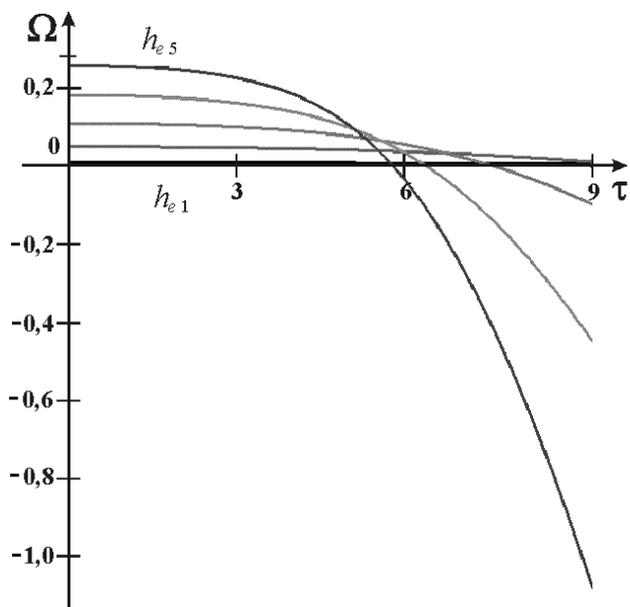


Рис. 6. Зависимость времени распада брызера от величины эффективного обменно-стрикционного поля. Кривые построены при различных начальных значениях параметров  $h_e$  и  $h$ . 5 кривых, от ( $h_{e1}=0,06$ ;  $h=-0,05$ ) до ( $h_{e5}=0,316$ ;  $h=-0,036$ ) с шагом  $0,062$  по  $h_e$  и  $0,0035$  по  $h$  соответственно.  $\tilde{\beta}=0,01$ .

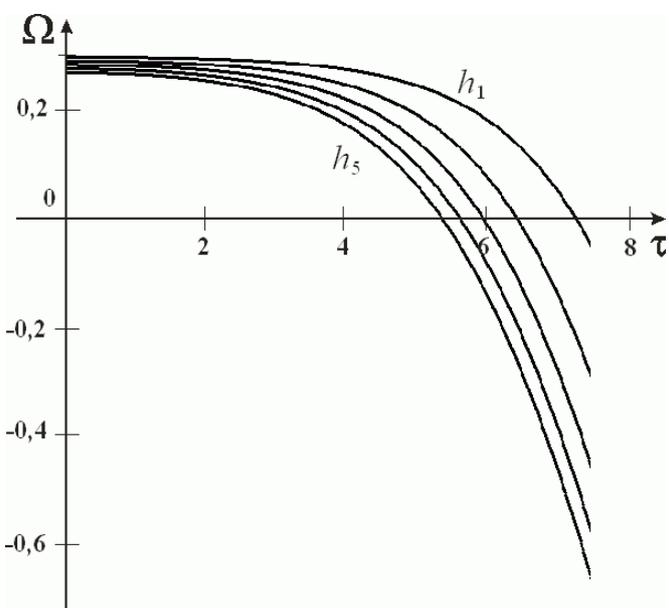


Рис. 7. Зависимость времени распада брызера от величины внешнего магнитного поля  $h$ . Кривые построены при различных начальных значениях параметра  $h$ . 5 кривых, от ( $h_1=-0,007$ ) до ( $h_5=-0,036$ ) с шагом  $0,0058$  по  $h$  соответственно. Начальное значение  $h_e=0,316$ . Коэффициент затухания для всех случаев:  $\tilde{\beta}=0,01$ .

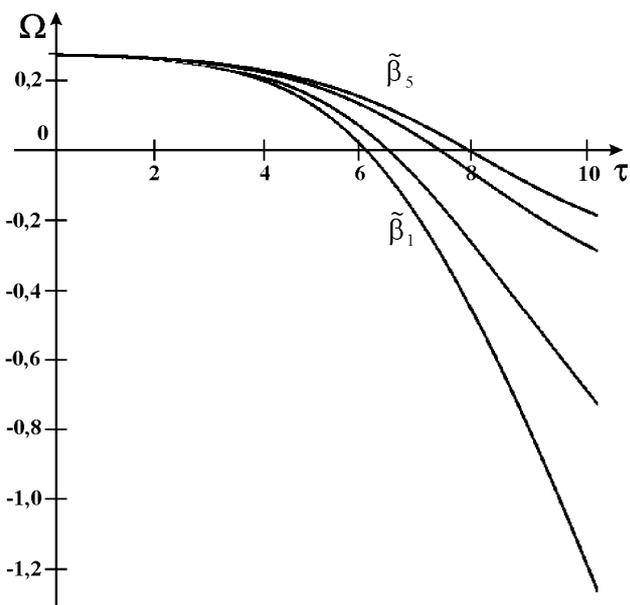


Рис. 8. Зависимость времени распада брызера от величины затухания  $\tilde{\beta}$ . Кривые построены при различных значениях параметра  $\tilde{\beta}$ . 5 кривых, от  $\tilde{\beta}_1=0,1$  до  $\tilde{\beta}_5=0,5$  с шагом  $0,1$ . Начальные значения  $h_e=0,316$  и  $h=0,036$ .

**В четвертой главе** исследованы нелинейные магнитоупругие волны во внешнем магнитном поле вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм как первого, так и второго родов. Расчет проводился на примере тетрагонального антиферромагнетика с магнитной анизотропией типа «легкая плоскость».

Исследование динамики проводилось совместным решением уравнения Ландау-Лифшица и уравнения движения упругой среды. Расчет линейного спектра показал, что в случае фазового перехода второго рода ( $H_E \geq 3H_{me}$ ) в точке фазового перехода смягчается частота квазиантиферромагнитного резонанса, а скорость продольного звука испытывает слабые изменения.

При рассмотрении нелинейных магнитоупругих волн уравнения Ландау-Лифшица и уравнения движения упругой среды с помощью применения редуکتивной теории возмущения были сведены к уравнению Кортевега-де Фриза для продольной  $\tilde{e}_x$  компоненты тензора деформаций:

$$2s \frac{\partial e_x}{\partial t} + r \frac{\partial^3 e_x}{\partial \zeta^3} + q \frac{\partial e_x^2}{\partial \zeta} = 0.$$

Здесь скорость продольного квазизвука и дисперсия, соответственно:

$$s^2 = \frac{C_{11}}{\rho} - \frac{2m_0^3(G_1 - B_1)^2}{M_0 H \rho}, \quad r = \frac{2m_0^4(G_1 - B_1)^2(s^2 - c^2)}{M_0 H^2 H_A l_0^2 \rho \gamma^2},$$

$$q = \frac{3(G_1 - B_1)^3 m_0^4}{M_0^2 H^2 \rho}, \quad \zeta = x - st,$$

$c$  – минимальная фазовая скорость спиновых волн.

Было исследовано односолитонное решение:

$$e_x = \frac{U_0}{ch^2((\zeta - \eta t)/\Delta)}.$$

Были получены зависимости параметров данного солитона – амплитуды упругого солитона  $U_0$ , амплитуды соответствующего ему магнитного солитона  $A$ , и ширины солитонов  $\Delta$  от внешнего магнитного и эффективного обменного полей:

$$U_0 = \frac{3s\eta}{q}, \quad A = -\frac{3s\eta\rho M_0 H}{(G_1 - B_1)^2(2 - m_0^2)}, \quad \Delta = \sqrt{\frac{2r}{s\eta}}.$$

Построены графики их зависимостей при разных значениях эффек-

тивного обменного поля (для случая фазового перехода второго рода рис. 9). На графиках обозначены:  $H_{\text{фп}}$  – величина внешнего магнитного поля, при котором происходит фазовый переход (точка равенства энергий, область фазового перехода второго рода).

Было показано, что вблизи перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм амплитуда упругого солитона в  $\text{Mn}_{1.88}\text{Cr}_{0.12}\text{Sb}$  на порядок больше, чем амплитуда солитонов в легкоплоскостных антиферромагнетиках [12] из-за существенно большего значения обменно-стрикционных констант.

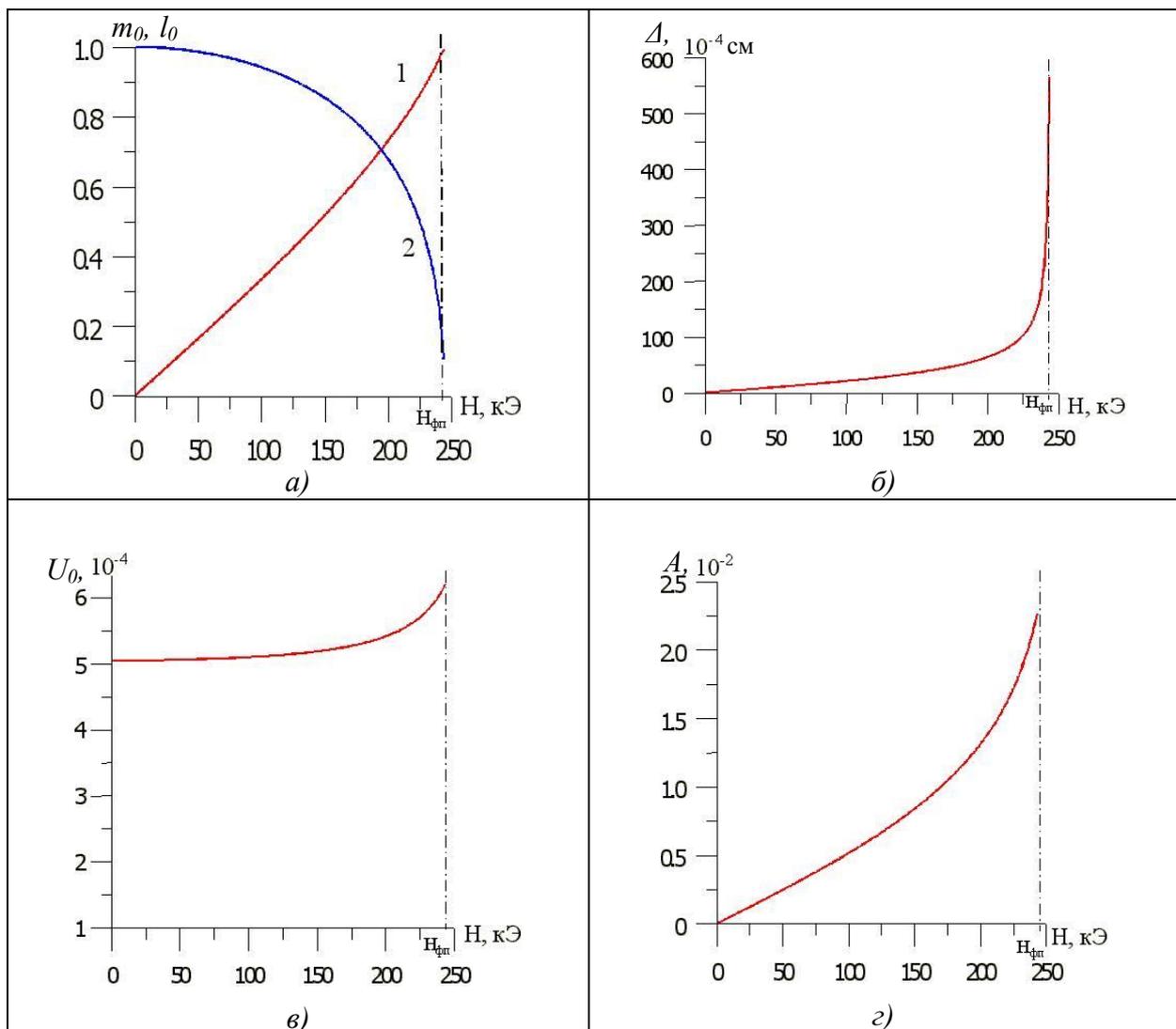


Рис.9. Зависимость параметров солитонов, от внешнего магнитного поля: а) значения  $m_0$  (кр. 1),  $l_0$  (кр. 2); б) ширина солитона  $\Delta$ ; в) амплитуда упругого солитона  $U_0$ ; г) амплитуда магнитного солитона  $A$ . Обменное поле  $H_E = 150 \text{ кЭ}$ .

Для исследования устойчивости магнитоупругих солитонов динамические уравнения с помощью применения редуктивной теории возмуще-

ний были сведены к уравнению Кадомцева-Петвиашвили:

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \left( 2s \frac{\partial e_x}{\partial t} - r \frac{\partial^3 e_x}{\partial \zeta^3} + q \frac{\partial e_x^2}{\partial \zeta} \right) = a \frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} + b \frac{\partial^2 e_x}{\partial z^2}.$$

коэффициенты которого [16] дают критерий устойчивости одномерного солитона относительно гофрировки волнового фронта. Устойчивым в данном случае, когда минимальная фазовая скорость квазиантиферромагнитных волн меньше скорости продольного квазизвука, является «темный» солитон, движущийся со скоростью, меньшей, чем скорость продольных квазиупругих волн в кристалле.

**В заключении** приведен перечень основных результатов и выводов, полученных автором в диссертационной работе.

#### **Основные результаты и выводы диссертационной работы:**

1. От поля обменной магнитострикции и внешнего магнитного поля определена зависимость прироста энергии магнетика, образующегося при возникновении периодической доменной структуры при фазовом переходе антиферромагнетизм-ферромагнетизм. Показано, что в магнетиках с большой магнитострикцией образование периодической доменной структуры промежуточного состояния энергетически не выгодно, что хорошо объясняет наблюдаемые на эксперименте данные. Для тетрагонального антиферромагнетика определена и построена на фазовой диаграмме область, в которой возможно возникновение периодической доменной структуры промежуточного состояния.
2. Динамика зародыша новой фазы вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм исследована с учетом влияния обменной магнитострикции. Показано, что если начальная амплитуда магнитоупругого бризера меньше амплитуды критического зародыша, то он совершает нелинейные периодические колебания, которые в случае наличия диссипации являются затухающими. При амплитудах, больших критической, зародыш новой фазы, имеющий форму бризера, распадается на две удаляющиеся друг от друга межфазные стенки, ограничивающие домен устойчивой фазы. Время распада бризера на две взаимодействующие межфазные стенки уменьшается с ростом вклада эффективного обменно-стрикционного поля и внешнего магнитного поля, и возрастает с увеличением параметра затухания.
3. Установлено, что вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм могут существовать магнитоупругие солитоны, являющиеся решением уравнения Кортевега-де Фриза. Показано, что амплитуда и ширина магнитоупругих солитонов под воздействием магнитного поля в области фазового перехода существенно изменяются.

4. Исследована устойчивость магнитоупругих солитонов. Установлено, что устойчивым является «темный» магнитоупругий солитон, движущийся со скоростью, меньшей чем скорость продольных квазиупругих волн в кристалле для случая, когда минимальная фазовая скорость квазиантиферромагнитных волн меньше скорости продольного квазизвука.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гражданкина Н.П., Бурханов А.М., Берсенев Ю.С., Зайнуллина Р.И., Матвеев Г.А. Исследование перехода антиферромагнетизм – ферромагнетизм в соединении  $Mn_{1.88}Cr_{0.12}Sb$  // ЖЭТФ, 1970, т.58, в.4, с.1178-1185.
2. Бучельников В.Д., Таскаев С.В., Загребин М.А., Энтель П. Фазовая диаграмма сплавов Гейслера с инверсией обменного взаимодействия // Письма в ЖЭТФ, 2007, т.85, в.11, с.689-693.
3. Мирсаев И.Ф., Туров Е.А. Эффективные модули упругости магнетиков вблизи фазовых переходов антиферромагнетизм – ферромагнетизм // ФММ, 1996, т. 81, в. 4, с. 68-81.
4. Гнатченко С.Л., Чижик А.Б., Шкляревский И.О. и др. Визуализация фазового перехода антиферромагнитный изолятор – ферромагнитный металл в манганите  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$  // ФНТ, 1999, т.25, №8/9, с.992-995.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм. Москва: Наука, 1971. 1032 с.
6. Барьяхтар В.Г., Боровик А.Е., Попов В.А. Теория промежуточного состояния антиферромагнетиков // ЖЭТФ, 1972, т.62, №6, с.2233-2242.
7. Харченко Н.Ф., Шимчак Г., Еременко В.В. и др. Магнитные промежуточные состояния в диспрозиевом ортоферрите // Письма в ЖЭТФ, 1977, т.25, №5, с.258-262.
8. Беляева А.И., Баранова Е.В. Термодинамическая модель стабилизации промежуточного состояния в области метамагнитного фазового перехода в ортоферрите эрбия // ЖЭТФ, 2007, т.132, в.1(7), с.108-113.
9. Панкрац А.И., Петраковский Г.А., Безматерных Л.Н., Шимчак Г., Набиалек А., Кундыс Б. Магнотриксционные исследования магнитных фазовых переходов в метаборате меди  $CuB_2O_4$  // ФТТ, 2006, т.48, в.2, с.312-316.
10. Королева Л.И., Демин Р.В., Козлов А.В. и др. Связь гигантской объемной магнотрикции с колоссальным магнитосопротивлением и размягчением кристаллической решетки в манганитах  $La_{1-x}A_yMnO_3$  (A=Ca, Ag, Ba, Sr) // ЖЭТФ, 2007, т.131, №1, с.85-96.
11. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н., Харисов А.Т.,

- Шамсутдинов Д.М. Ферро- и антиферромагнитодинамика. Нелинейные колебания, волны и солитоны. Уфа: Гилем, 2007. 368 с.
12. Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А., Танкеев А.П. Магнитоупругие солитоны и резонанс Захарова-Бенни в тетрагональных антиферромагнетиках // ФММ, 1999, т.87, №4, с.5-12.
  13. Косевич А.М., Иванов Б.А., Ковалев А.С. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. Киев: Наукова думка, 1983. 192с.
  14. Ozhogin V.I., Lebedev A.Yu. On magnetoelastic soliton in antiferromagnet // JMMM, 1980, v.15-18, p.617-618.
  15. Бучельников В.Д., Шавров В.Г. Уединённые магнитоупругие волны в легкоплоскостных магнетиках, распространяющиеся вдоль оси анизотропии // ФТТ, 1983, т.25, №1, с.90-94.
  16. Турицын С.К., Фалькович Г.Е. Устойчивость магнитоупругих солитонов и самофокусировка звука в антиферромагнетиках // ЖЭТФ, 1985, т.89, №1, с.258-270.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- A1. Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А., Сакаев Р.Д. Магнитоупругие солитоны в легкоплоскостном антиферромагнетике вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Физика металлов и металловедение, 2004, том 97, №2, с. 3-7.
- A2. Шамсутдинов М.А., Сакаев Р.Д., Харисов А.Т., Влияние обменной магнитострикции на образование промежуточного состояния вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм, // Физика металлов и металловедение, 2008, том 105, №1, с. 5-13.
- A3. Сакаев Р.Д., Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А. Влияние магнитострикции на эволюцию локализованной магнитной неоднородности вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Электронный журнал "Исследовано в России", 2007, 173, с.2011-2020, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/173.pdf>
- A4. Сакаев Р.Д., Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А. Влияние обменной магнитострикции на динамику локализованной магнитной неоднородности вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Вестник ЧелГУ, Физика, 2008, №2.

- A5. Харисов А.Т., **Сакаев Р.Д.**, Шамсутдинов М.А. Магнитоупругие солитоны в антиферромагнетике вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Вестник БашГУ, 2002, №1, с.47-50.
- A6. Харисов А.Т., **Сакаев Р.Д.**, Шамсутдинов М.А. Нелинейные магнитоупругие волны вблизи фазового перехода антиферромагнетизм – ферромагнетизм // Межвузовский научный сборник «Структурные и динамические эффекты в упорядоченных средах», г.Уфа, РИО БашГУ, 2002, с. 46-51.
- A7. **Сакаев Р.Д.**, Шамсутдинов М.А., Харисов А.Т. Исследование условий образований промежуточного состояния вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Сборник научных трудов «Структурные и динамические эффекты в упорядоченных средах», г.Уфа, РИЦ БашГУ, 2006, с. 25-36.
- A8. Харисов А.Т., **Сакаев Р.Д.**, Шамсутдинов М.А. Магнитоупругие солитоны в антиферромагнетике вблизи фазового перехода порядок-порядок // Сборник трудов XVIII Международной школы-семинара НМММ, г.Москва: МГУ, 2002, с.772-774.
- A9. **Сакаев Р.Д.**, Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А. О доменной структуре промежуточного магнитного состояния вблизи фазового перехода первого рода антиферромагнетизм–ферромагнетизм // Сборник трудов XIX Международной школы-семинара НМММ, г.Москва: МГУ, 2004, с.829-831.
- A10. Харисов А.Т., Шамсутдинов М.А., **Сакаев Р.Д.** Локализованные магнитоупругие возбуждения вблизи фазового перехода первого рода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Сборник трудов XX Международной школы-семинара НМММ (г. Москва, 12 июня – 16 июня 2006). г.Москва: МГУ, 2006, с.692-694.
- A11. **Sakaev R.D.**, Shamsutdinov M.A., Kharisov A.T. Influence of magnetostriction on the formation of the intermediate state in the vicinity of the "antiferromagnetism-ferromagnetism" phase transition // Books of Abstracts of Moscow International Symposium of Magnetism, Moscow, 25-30 June, 2005, p.485-486

- A12. Shamsutdinov M.A., Kharisov A.T., **Sakaev R.D.** The conditions of the formation of the intermediate state in the vicinity of the "antiferromagnetism-ferromagnetism" phase transition // Abstracts of International conference «Functional Materials» IFCM'2005, Ukraine, Crimea, Partenit – 2005. P. 30.
- A13. **Сакаев Р.Д.**, Шамсутдинов М.А., Харисов А.Т. Влияние магнитострикции на образование промежуточного состояния вблизи фазового перехода первого рода // Труды 9-го Международного симпозиума «Упорядочения в металлах и сплавах» – ОМА-9 (Ростов-на-Дону, п. Лоо, 12-16 сентября 2006 г.), ч. II, Ростов н/Д: Изд-во РГПУ, с.223-226.
- A14. **Сакаев Р.Д.**, Харисов А.Т. Шамсутдинов М.А., Влияние магнитострикции на эволюцию локализованной магнитной неоднородности вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Сборник трудов VIII Международного семинара «Магнитные фазовые переходы» Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (г.Махачкала, 12-15 сентября 2007), Махачкала, Институт физики ДНЦ РАН, 2007, С.32-35.
- A15. **Сакаев Р.Д.** Магнитоупругие волны вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Сборник трудов Региональной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике. Том 2 «Физика», г.Уфа, РИО БашГУ, 2001, с.99-103.
- A16. **Сакаев Р.Д.**, Харисов А.Т. Топологические магнитоупругие солитоны в манганитах вблизи фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм // Сборник трудов Региональной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых учённых по математике и физике, г.Уфа, 2004, том 2 «Физика», с. 159-163.