ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук Гареева Камиля Газинуровича
на тему: «Магнитные нанокompозиты на основе многофазных систем
с оксидами железа»
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Диссертационная работа представляет собой комплексное исследование, в котором объединены экспериментальные методики, теоретическое моделирование и сравнительный анализ синтетических, естественных и природоподобных структур. Актуальность выбранной тематики обусловлена широким практическим применением таких объектов в металлургии, химическом катализе, микроэлектронике, медицине и защите от электромагнитного излучения. Кроме технологической доступности оксидов железа, это связано с их уникальным сочетанием физических характеристик, которое позволяет изменять магнитные и электрические свойства материалов за счет управления фазовым составом и морфологией.

Диссертационная работа Гареева К.Г. состоит из введения, шести глав, заключения, перечня сокращений, перечня обозначения и наименования основных физических величин и технических параметров, перечня терминов и определений и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 257 страниц, включая 105 рисунков, 23 таблицы, список публикаций автора по теме диссертации из 44 наименований, и список цитируемой литературы из 346 наименований.

Во введении работы обоснована актуальность исследования, четко сформулированы цель, задачи и выносимые на защиту научные положения. Отмечена как теоретическая, так и практическая значимость полученных результатов, а также приведены сведения об апробации методов исследования на профильных конференциях.

Глава 1 представляет собой обширный обзор литературы, в котором детально рассмотрены структурный полиморфизм оксидов железа, их физические свойства и механизмы формирования в естественных (биогенные и литогенные) и искусственных условиях. Автор систематизирует сведения о различиях в кристаллических структурах (кубическая, ромбоэдрическая, орторомбическая) и связывает их с разнообразием магнитных (намагниченность, коэрцитивная сила) и электрических характеристик. Анализ представленных данных позволяет оценить перспективность использования как природных, так и синтетических структур в различных областях техники.

Глава 2 описывает разработку и оптимизацию методов синтеза синтетических наноструктур на основе модельной системы «оксиды железа – диоксид кремния». Рассмотрены два подхода (двух- и одностадийный), позволяющие варьировать фазовый состав, размеры и форму зерен оксидов железа. Полученные экспериментальные данные, подтвержденные микроскопическими изображениями, рентгенофазовым анализом и измерениями магнитных свойств, свидетельствуют о высокой методологической строгости исследования.

Глава 3 посвящена исследованию естественных и природоподобных структур с оксидами железа. Проведен сравнительный анализ магнитных характеристик образцов литогенного и биогенного происхождения, в том числе бактериальных магнетосом и структур, полученных из раковин фораминифер. Такой подход позволяет выявить преимущества естественных механизмов формирования по сравнению с синтетическими, а также определить перспективы использования природоподобных наноструктур в фундаментальных исследованиях и биомедицинских приложениях.

Глава 4 концентрируется на изучении магнитных свойств синтетических, естественных и природоподобных систем. Особое внимание уделено экспериментальному определению распределения ферромагнитных зерен по размерам, которое впервые описано с использованием

логнормального закона. Выявление малых фракций суперпарамагнитных частиц, не обнаруживаемых традиционными методами, является значительным вкладом в понимание микроструктурных особенностей исследуемых материалов.

Глава 5 посвящена исследованию влияния внешних воздействий – постоянного магнитного поля, лазерного и гамма-излучения, а также радиочастотного излучения – на изменение микроструктуры и фазового состава нанокompозитов. Определены пороговые уровни воздействия, при достижении которых наблюдаются существенные изменения магнитных характеристик, что имеет высокую практическую значимость для разработки материалов с функцией экранирования и для применения в магнитоуправляемой технологии.

Глава 6 содержит экспериментально-теоретическую оценку биосовместимости синтетических нанокompозитов и демонстрирует возможность их использования для магнитоуправляемой доставки лекарственных средств. Результаты *in vivo* и *in vitro* испытаний подтверждают высокую биосовместимость разработанных систем, что открывает перспективы для их применения в медицине, в частности, для создания контрастных агентов и систем целевой доставки.

Научная новизна работы заключается в ее следующих основных результатах:

1. Впервые предложена физическая модель системы «оксиды железа – диоксид кремния», позволяющая описывать магнитные и другие физические свойства структур в различных магнитных состояниях.

2. Экспериментально доказано, что распределение ферромагнитных зерен по размеру и по коэрцитивной силе описывается единым (логнормальным) законом.

3. Впервые с использованием разработанного комплекса методов обнаружены малые (до 1 % объема) доли суперпарамагнитных частиц.

4. Определены пороговые уровни воздействия магнитного поля и электромагнитного излучения, приводящие к изменению микроструктуры и магнитных свойств нанокompозитов.

5. Разработан единый подход к синтезу магнитных нанокompозитов, позволяющий регулировать их свойства посредством изменения фазового состава и морфологии.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик, комплексностью подхода (структурная характеристика, спектроскопия, магнитометрия, теоретическое моделирование) и независимой апробацией на международных конференциях. Практическая значимость работы выражается в возможности применения разработанных материалов для создания магнитных жидкостей, систем электромагнитного экранирования и технологий магнитоуправляемой доставки лекарств, что подтверждено патентами и опубликованными научными работами.

К достоинствам работы можно отнести небольшой, но весьма поучительный литературный обзор, тщательно проработанную структуру диссертации и подачу материала: помимо обычного в таких случаях списка аббревиатур, также присутствует список обозначений и даже словарь основных терминов, используемых в диссертации.

Вместе с тем, диссертация не свободна от ряда недостатков, их можно разбить на несколько групп:

Терминологические вопросы

с.111 не пояснен термин "коэрцитивный спектр" (в то время как намного более распространенный термин «коэрцитивная сила» поясняется в конце диссертации).

с.112 термин "псевдооднодоменные" весьма расплывчат, даже когда поясняется в списке терминов, позже в тексте он появляется в контексте "малодоменного" состояния и "вихревой" структуры.

с. 157 «Под изменением магнитной структуры, кристаллической структуры и микроструктуры нанокompозитов .. подразумеваются образование стабильных линейных агрегатов НЧ, изменение магнитного состояния и фазовые переходы в ряду «магнетит–маггемит–гематит» - вероятно, порядок перепутан.

с. 166 "отрицательно влиять на цитотоксичность" То есть они становятся безвредными? Далее же по тексту следует, скорее, что токсичность увеличивается при наличии диоксида кремния

Значения физических величин, вызывающие вопросы

с. 105 "... соотношение между остаточной намагниченностью при наличии поля и при его отсутствии составляет 1.66. С увеличением размера зерна это соотношение систематически падает до 0.3...0,5" Непонятно, как отношение могло стать меньше 1.

с. 135 "*Измерение электрического сопротивления показало значения 1 Ом*". Идет ли речь об удельном сопротивлении материала, деленном на толщину слоя?

Рис. 6.3 Почему сумма живых клеток и Annexin-положительных не 100%? В тексте на с.165 также возникает ощущение, что кроме живых и мертвых клеток существует некое третье состояние.

с. 145 Проводились ли сравнение экранирующей способности магнитной жидкости и фольги?

Рис. 5.15 Почему пороговые уровни критических полей изменения магнитной и микроструктур не зависят от частоты?

Неясности в обозначениях

с. 140 Рис. 5.7 Fe₂O₃ - без греческого символа. Это гамма или альфа Fe₂O₃?

с. 141 «гамма облучение приводит к индуцированному фазовому переходу Fe₃O₄ -> gamma-Fe₂O₃. В контексте подписи к рисунку 5.7 обозначение «gamma-Fe₂O₃» выглядит уже двусмысленным, возникает подозрение, что речь идет ужк не о маггемите, а об индуцированной гамма-излучением фазе.

В тексте также найдены опечатки, но всего две: с. 93 «локального окружениЕ железа» - ошибка согласования; с. 142 «изменнеие» - изменение

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Гареев Камиль Газинурович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
профессор кафедры физики колебаний
физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова»

Пятаков Александр Павлович
07.05.2025

Контактные данные:

тел.: +7 495 9394138, e-mail: pyatakov@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация: 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Адрес места работы: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

Тел.: +7 495 9394138

e-mail: pyatakov@physics.msu.ru

Подпись д.ф.-м.н. А.П. Пятакова удостоверяю