

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Амбарова Александра Васильевича
«Математическое моделирование динамических свойств ансамбля
взаимодействующих суперпарамагнитных частиц», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Диссертационная работа А.В. Амбарова посвящена изучению математических моделей поведения ансамблей суперпарамагнитных частиц с анизотропной ориентационной структурой. Рассматриваемый ансамбль частиц является широко распространенной моделью полимерных магниточувствительных композитов, свойства которых значительно меняются под действием магнитного поля. Указанные исследования являются **актуальными**, поскольку сделан акцент на учете диполь-дипольного взаимодействия при определении динамического магнитного отклика, при этом данное взаимодействие значительно влияет на статические и динамические свойства ансамблей дипольных частиц.

Научная новизна диссертации состоит в том, что, несмотря на активные экспериментальные исследования магнитных полимерных систем в последнее десятилетие, теоретические исследования поведения этих материалов в магнитных полях явно недостаточны. Существенно новым в диссертационном исследовании является теоретическое описание динамических свойств таких материалов, находящихся под действием переменного магнитного поля произвольной амплитуды.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что получены аналитические выражения и численные данные, прогнозирующие магнитные динамические свойства ансамбля суперпарамагнитных взаимодействующих частиц, в зависимости от режимных параметров.

Построенная теория может быть применима для проектирования новых магнитоактивных материалов с заданными свойствами. Практическую ценность также представляют разработанные комплексы программ, позволяющие численно описывать магнитные характеристики системы взаимодействующих частиц.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы (97 наименований). Диссертация изложена на 122 страницах и содержит 50 рисунков.

Во **введении** описана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту, представлены сведения о достоверности и апробации результатов диссертационного исследования.

Первая глава «Обзор современных исследований мягких магнитоактивных материалов» представляет собой обзор литературы и позволяет оценить текущее состояние исследований ансамблей суперпарамагнитных взаимодействующих обездвиженных частиц. Обсуждается история развития науки о таких ансамблях, привлекающих исследователей своими уникальными физическими свойствами. В главе рассмотрены особенности микроструктуры мягких магнитоактивных материалов. Обзор литературы показал, что физические свойства и поведение этих материалов определяются внутренними структурными превращениями, происходящими в ансамблях внедренных частиц под действием внешнего магнитного поля. Фундаментальные особенности таких превращений в феррокомпозитах, имеющие ряд принципиальных отличий от таковых в жидких и газовых средах, практически не изучены. В первой главе обсуждается также современное состояние развития изучаемой области науки и отмечены основные нерешенные вопросы в исследовании ансамбля суперпарамагнитных частиц, решение которых представлено в последующих главах диссертации.

Вторая глава «Моделирование динамических свойств ансамбля обездвиженных суперпарамагнитных частиц» посвящена изучению влияния межчастичных диполь-дипольных взаимодействий, ориентации и амплитуды внешнего переменного магнитного поля и величины магнитной анизотропии на динамические свойства системы суперпарамагнитных обездвиженных частиц. В данной главе определены динамические свойства такие как динамическая намагниченность, динамическая восприимчивость и характерное время релаксации системы суперпарамагнитных обездвиженных частиц, когда переменное магнитное поле направлено под произвольным углом к осям магнитной анизотропии. Для малых амплитуд переменного магнитного поля динамические свойства исследовались аналитически. Численное моделирование систем суперпарамагнитных обездвиженных частиц проведено для любых амплитуд переменного магнитного поля.

В третьей главе «Влияние статического поля на динамические свойства ансамбля обездвиженных суперпарамагнитных частиц» изучается влияние статического магнитного поля, дополнительно приложенного к системе случайно распределенных обездвиженных суперпарамагнитных частиц, на динамический отклик. Теоретически показано, что в случае параллельной конфигурации переменного и статического магнитных полей, учет подмагничивающего статического магнитного поля приводит к немонотонным эффектам зависимости динамической восприимчивости от магнитной анизотропии и амплитуды переменного магнитного поля в системе обездвиженных взаимодействующих магнитных частиц.

В четвертой главе «Разработанные программные комплексы» содержится детальное описание программных комплексов, разработанных для численного моделирования динамических магнитных свойств ансамбля суперпарамагнитных обездвиженных взаимодействующих частиц во внешнем магнитном поле. Численные решения, представленные в диссертации, получены с помощью описанных в данной главе комплексов

программ. Также в главе показана логика работы программных комплексов, описаны типы входных и выходных данных.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы, указываются рекомендации и возможные направления дальнейших исследований.

К положительным аспектам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и может быть полезна при исследованиях, в том числе экспериментальных, поведения анизотропных намагничивающихся материалов в магнитном поле.

2. Текст диссертации имеет удобную для восприятия структуру; в первой главе даны основные понятия, виды взаимодействий частиц и фундаментальные формулы, что облегчает понимание диссертации.

3. Эффекты, полученные автором в результате теоретических исследований, объяснены с точки зрения физики.

4. Проведено сравнение результатов, полученных автором в диссертационной работе, с известными из литературы результатами. Например, на странице 88 дана ссылка на работу, в которой рассмотрен броуновский механизм релаксации магнитного момента, и указано, что в ней получены аналогичные результаты.

5. На доступном уровне объяснены принципы работы программных комплексов, созданных автором для проведения численных расчетов.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания.

1. На мой взгляд, в начале второй главы необходим рисунок постановки задачи с изображением системы координат, углов и векторов, аналогичный рисункам третьей главы на странице 67.

2. В диссертационной работе присутствуют неудачные обозначения. Так косинус угла между вектором магнитного момента и осью z обозначен через x , при этом координатная ось также обозначена через x . Кроме того, в

формуле для разностного оператора диффузионного переноса (2.3.4) параметр k введен для двух разных величин.

3. На странице 78 указано, что «существуют усложняющие факторы, связанные с экспериментальными измерениями, включая полидисперсность частиц, которые могут скрыть влияние диполь-дипольных взаимодействий на магнитный отклик», тем не менее, я считаю, было бы весьма полезно провести сравнение теоретических результатов, полученных автором, с экспериментальными исследованиями (например, известными из литературы) пусть даже без учета диполь-дипольных взаимодействий.

4. На рисунках 2.2.6 и 3.1.5 не приведены графики для угла между направлением переменного магнитного поля и осей легкого намагничивания в 45 градусов в случае учета диполь-дипольных взаимодействий.

Представленные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Амбарова А.В.

Диссертационная работа А.В. Амбарова полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней УрФУ» и соответствует специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а автор диссертации, Амбаров Александр Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник лаборатории физико-химической гидродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

кандидат физ.-мат. наук (1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы)

Меркулов Дмитрий Игоревич

Меркулов Д.И.
11.2022

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д.1

Тел. 7 (495) 939-31-21, e-mail: merkulovdima@mail.ru

Подпись тов.
УДОС
Зав. канцелярией
ИИИМ механики МГУ

Меркулов Д.И.
Умская Л.М.