

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Канторович Софьи Сергеевны

на тему: «МИКРОСТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ, ФЕРРОГЕЛЕЙ, АНИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОМЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ КОЛЛОИДОВ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Ферроколлоиды, включая феррожидкости, феррогели и магнитные эластомеры, активно исследуются в настоящее время в связи с развитием технологий на основе композиционных материалов, свойства которых регулируются посредством изменений внешних воздействий (в данном случае внешних магнитных полей). Они представляют собой искусственные коллоидные взвеси наночастиц ферро- и ферримагнитных материалов в немагнитных жидких средах (жидкости или полимерные матрицы). Принципиальная особенность таких систем – тот факт, что частицы в них являются однодоменными по намагниченности. Сочетание магнитных свойств наночастиц со свойствами носителя (текучесть, эластичность) привлекательно для многих промышленных приложений (например, сенсоры). Активно развиваются и их медико-биологические применения.

Для таких систем актуальной задачей является установление корреляций между структурой и свойствами. В конечном итоге, регулируя структурные параметры систем на стадии приготовления, регулируют макроскопические свойства в конкретных условиях использования ферроколлоидов. Если свойства слабоконцентрированных ферроколлоидов с изолированными магнитными наночастицами к настоящему моменту изучены достаточно полно как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения, то для концентрированных систем возникают вопросы описания и учета эффектов межчастичных взаимодействий, связанных, прежде всего, с магнитным диполь-дипольным взаимодействием. Корректный теоретический учет влияния такого взаимодействия в ансамблях подвижных и неоднородно распределенных в пространстве частиц, довольно сложен, поэтому требуется развитие методов, совмещающих аналитические подходы и компьютерное моделирование. Особой задачей для данных систем является проблема описания образования равновесных кластеров частиц в результате диполь-дипольного взаимодействия и влияния этого процесса на магнитные и прочие свойства композитов. Работа Софьи Сергеевны Канторович посвящена теоретическому исследованию возможных структур в ансамблях частиц,

составляющих феррожидкости, феррогели и магнитные эластомеры, а также связи этих структур с ожидаемыми магнитным и магнитомеханическим откликами. Два данных направления исследования без сомнения делают диссертационную работу крайне актуальной как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** традиционным образом обоснована актуальность работы, сформулированы ее задачи, представлены новизна, научное и практическое значение результатов, а также даны сведения об апробации работы.

В **первой главе** проводится подробный анализ современного состояния теоретических и компьютерных исследований сложных ферроколлоидов. Обозначена связь с экспериментальными наработками. Приведено описание основных методов компьютерного моделирования, использованных в диссертации. Выделены акценты изучения в сторону более сложной топологии (чем простые линейные цепочки) кластеров частиц, которые могут образовываться в ферроколлоидах. Обозначена связь исследуемого класса систем с перспективными практическими применениям (например, искусственные мышцы, сверхчувствительные датчики, амортизаторы и др.). На основе анализа материала отмечены сложности теоретического изучения данного вида систем; обуславливается необходимость развития теоретических и численных подходов для выявления особенностей и параметров, влияющих на структуру и поведение ферроколлоидов в различных условиях.

Во **второй главе** рассматриваются важные вопросы теоретического описания массивов магнитных наночастиц в жидких средах (магнитные жидкости, или феррожидкости). Так, с помощью термодинамического подхода исследовано влияние пространственных ограничений на микроструктуру магнитных жидкостей. В частности, рассмотрены монослои магнитных жидкостей для монодисперсных и бидисперсных систем. Получены характеристики образующихся кластеров, а также выявлена причина формирования кольцевых и ветвистых агрегатов из феррочастиц в тонком слое бидисперсной феррожидкости в условиях, при которых в объемном образце наблюдаются только цепочки. В этой же главе рассмотрены изменения иерархической самоорганизации в системах магнитных дипольных наночастиц при понижении температуры. Обнаружено, что при достаточно низких значениях температуры существенными становятся эффекты образования разветвленные структур, в которых магнитная частица может иметь более двух соседей. Аккуратно и полно выделены все возможные структуры с последующим расчетом

соответствующих термодинамических характеристик. Как результат, удается записать и подробно проанализировать полную свободную энергию такой системы и теоретически проследить температурные зависимости макроскопических величин, в частности начальной магнитной восприимчивости.

В **третьей главе** рассмотрено влияние анизотрии формы частиц на кластерообразование в магнитных коллоидах. В частности, исследованы кубические магнитные частицы с разной ориентацией намагниченности внутри нанокристаллитов. Также как в предыдущем случае сферических частиц, для кубов рассмотрены всевозможные энергетически выгодные кластерные конфигурации. Проведено сравнение с кластерами сферических частиц. Показано, что изменение ориентации намагниченности в частицах существенным образом влияет на поведение ансамбля частиц во внешнем магнитном поле. В частности, это продемонстрировано для температурной зависимости магнитной восприимчивости.

В **четвертой главе** продолжено исследование эффектов внутренней анизотропии намагниченности частиц для более сложных систем с магнитными частицами типа Януса. Такие частицы характеризуются смещенным магнитным центром и на практике обнаруживают ряд специфических эффектов. Представлены результаты масштабного компьютерного моделирования такого рода систем с частицами из одного, трех и пяти смещенных магнитных диполей для 3D и 2D случаев. Посредством усложнения структуры частиц достигнуто качественное согласие между компьютерным моделированием и реальным экспериментом в отношении ассоциаций частиц, а также структурной реорганизации при помещении во внешнее магнитное поле с разной относительной ориентацией напряженности.

В **пятой главе** приведены результаты молекулярно-динамического моделирования композиционных систем на основе магнитных наночастиц в мягком гидрогеле и эластичной полимерной матрице в 3D и 2D случаях. Описано достаточно большее количество структурных эффектов, предсказываемых в модельных расчетах. Обозначена связь данных расчетов с экспериментально-наблюдаемыми явлениями. Так, предложено объяснение эволюции гистерезиса в магнитных эластомерах. Получен ряд важных магнето-механических характеристик такого рода систем, отражающих влияние внешних магнитных полей на деформации в различных конфигурациях и условиях.

В **заключении** приведены обобщения результатов и выводы по диссертационной работе. Даны рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В качестве **важных результатов** следует отметить существенное продвижение в построении и понимании диаграммы пространственных корреляций дипольных жидких коллоидов (энергия взаимодействия против объемной доли дисперсных частиц) с учетом образования равновесных кластеров всех возможных конфигураций, что дает возможность описания и предсказания экспериментальных данных (магнитометрия, криоэлектронная микроскопия, малоугловое рассеяние) на новом уровне. В частности, в теоретическое рассмотрение введена температурная ось. Теоретически предсказанные температурные зависимости характеристик магнитных жидкостей инициируют последующие работы по экспериментальной проверке. Переход в компьютерном моделировании к более сложным системам, включая магнитные жидкости с частицами с анизотрией формы и внутренней анизотропией намагниченности, а также магнитным гелям и эластомерам обозначает новые стратегические направления экспериментальных исследований, которые могут быть поддержаны развитыми теоретическими подходами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается высоким теоретическим уровнем, применением как аналитических, так и численных методов, согласующимися с другими подходами. Ряд результатов работы согласуется с известными экспериментальными фактами, некоторые же можно использовать при планировании новых экспериментов.

Результаты диссертационной работы имеют **научную значимость**, поскольку направлены на решение сложных задач, связанных с описанием сложных ферроколлоидов, включая фундаментальные и прикладные аспекты. В работе продемонстрировано описание микроструктуры актуальных ферроколлоидов, и фактически промоделировано множество эффектов, которые могут быть использованы на практике. Результаты апробированы на Всероссийских и международных конференциях, опубликованы в реферируемых журналах самого высокого уровня из списка ВАК и хорошо известны специалистам во всем мире.

В качестве **замечаний** можно отметить следующее:

1. В представленном материале в ряде мест, посвященных моделированию систем исследования, не совсем ясно, чем обусловлен выбор диапазонов параметров варьирования для рассматриваемых систем. Так, в Табл. 2.1. параметр диаметра магнитных частиц в монодисперсных магнитных жидкостях меняется от 14 до 17 нм. Из каких соображений? Тот же вопрос возникает и по параметрам частиц в Табл. 2.2, где представлены модельные бидисперсные системы. Насколько однозначны выводы

по таким системам? Что можно ожидать, если размеры частиц и соотношения между частицами изменить в более широких диапазонах? На Рис. 2.3.3 – 2.3.7 следовало бы обосновать исследуемый диапазон по температуре.

2. В отношении ферроколлоидов с кубическими частицами. Если продолжить логику исследования сферических частиц, что можно ожидать от введения в рассмотрение бидисперсности? Для сферических частиц проблема полидисперсности обусловлена наиболее распространенными практическими системами. Насколько актуальна такая задача для систем с кубическими частицами?
3. В работе в качестве частиц с анизометрией формы рассмотрены кубические частицы. Для полноты представляемого материала необходимо было бы отметить проблему и провести сравнение с частицами с другими типами анизометрии формы (например, частицы эллипсоидной или нитевидной формы).
4. В некоторых местах материал перегружен деталями получения отдельных формул, в то время как встречаются места, где формулы даются без вывода, а автор ограничивается указанием соответствующих ссылок на публикации. Это приводит к «размыванию» смысловых акцентов работы. По-видимому, автор хотел таким образом выделить личный вклад в работу. Если это так, то идея не совсем удачная, так как четкое донесение смысла основных положений диссертации до читателя видится рецензенту более важной задачей.
5. В изложении материала встречаются отклонения от научного стиля. В частности, используется русскоязычная «калька» английских слов: «смарт материал», «снэпшот», «подрисунк» и т.п. В тексте встречаются неточности в представлении графического материала. Так, на Рис. 2.2.9. в подписи читаем: «Цифры в поле подрисунков, обозначающие ненормированные длины». Цифры на рисунке не показаны.

Подводя итог, диссертация С.С.Канторович представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на самом высоком уровне. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как решение проблемы, имеющей важное научное значение. Сделанные замечания не снижают научной ценности результатов и относятся к их представлению. Материал диссертации в полной мере отражен в опубликованных работах, а автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Канторович Софьи Сергеевны «Микроструктурные и магнитные свойства феррожидкостей, феррогелей, анизотропных и анизометричных

магнитных коллоидов», полностью удовлетворяет требованиям п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор С.С. Канторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

Начальник сектора нейтронной оптики

Лаборатории нейтронной физики

Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ)

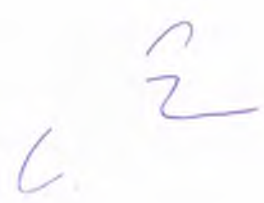
доктор физ.-мат. наук Авдеев Михаил Васильевич

Почтовый адрес: 141980 Дубна МО, ул. Жолио-Кюри 6, ЛНФ ОИЯИ

Телефон: 8(49621) 62674

E-mail: avd@nf.jinr.ru

«08» мая 2019 г.



Авдеев Михаил Васильевич

Подпись М.В.Авдеева заверяю.

Заместитель директора ЛНФ ОИЯИ



Е.В.Лычагин