

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию Мусихина Антона Юрьевича
«Реологические свойства жидких и мягких магнитных полимеров»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Диссертационная работа Мусихина Антона Юрьевича посвящена изучению реологических свойств полимерных композитных материалов с ферромагнитным наполнением. Такого рода материалы представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения в силу возможности влиять на их физические свойства извне при помощи магнитного поля. Безусловно, такая возможность позволяет говорить о перспективности использования магнитных жидкостей и магнитоактивных эластомеров в промышленности и медицине. Для успешного практического применения магнитополимерных композитных материалов необходимо достаточно точно описать как изменения их макроскопических характеристик под действием внешних стимулов, так и микроскопические причины таких изменений. Эта задача решается в диссертационной работе Мусихина А.Ю. для нескольких магнитополимерных систем. При описании микроскопической структуры материалов автор опирается на методы статистической физики для системы магнитных диполей с учётом сил магнитного и упругого взаимодействия. Автором также рассматривается поведение структурных единиц материала (агломератов частиц наполнителя) и проводятся экспериментальные исследования по деформации образцов магнитополимерных композитов с целью верификации результатов теоретического моделирования. Таким образом, полученные результаты имеют связь с экспериментом и могут быть использованы для описания поведения магнитополимерных материалов в магнитном поле, в частности, при доставке лекарственных препаратов к тромбам с помощью магнитной жидкости. Из отмеченного выше можно сделать вывод об **актуальности и практической значимости** диссертационной работы Мусихина А.Ю.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка литературы (150 наименований). Диссертация изложена на 144 страницах и содержит 50 рисунков и 3 таблицы.

Во **введении** описаны объекты исследования, обоснована актуальность работы, её научная новизна и значимость, сформулированы основная цель работы и решаемые в работе задачи, а также кратко описаны применяемые при исследовании методы.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвящённый истории развития научных исследований в области физики магнитных жидкостей, гелей и эластомеров. Достаточно подробно описываются основные особенности структуры и свойств таких материалов. Отмечены основные проблемы, возникающие при изучении магнитополимерных материалов. Обращено внимание на недостаток работ, посвящённых исследованию магнитореологического эффекта в феррогелях. Также в данной главе описаны основные практические приложения магнитополимерных материалов, основное внимание уделено их применению в области медицины. Наконец, отмечено, что в связи с комплексной природой происходящих в магнитополимерных материалах процессов их теоретическое описание представляет собой крайне сложную задачу, последовательное и достаточно точное решение которой не представлено в литературе. Описанные в первой главе исследования задают общий вектор диссертационной работы.

Вторая глава работы посвящена изучению сдвиговой деформации феррогелей с изотропно распределёнными сферическими частицами наполнителя. Для описания взаимодействия частиц наполнителя используется приближение парного взаимодействия. С использованием магнитного дипольного приближения и формулы Фрелиха-Кеннели для намагниченности частиц проведены расчёты для компонент намагниченности частицы наполнителя. Рассмотрены возмущения парной функции распределения частиц, вызванные магнитным взаимодействием частиц во внешнем поле, сдвиговой деформацией материала, а также комбинацией этих двух процессов. Получено аналитическое выражение модуля сдвига композита в приближении линейной упругости, представляющее собой сумму механической и магнитомеханической компонент. Приведены результаты численных расчётов зависимостей магнитомеханической компоненты модуля от приложенного магнитного поля, отмечен немонотонный характер полученных зависимостей.

В **третьей главе** изучаются напряжения, возникающие при деформациях сдвига и одноосного растяжения в феррогелях с анизотропным распределением наполнителя, а именно содержащих перколирующие цепочечные структуры сферических ферромагнитных частиц. Основным объектом рассмотрения является уединённая цепочка ферромагнитных частиц, начало и конец которой лежат на границах материала. В магнитном дипольном приближении с использованием формулы Фрелиха-Кеннели получены и численно решены уравнения относительно намагниченности частиц в цепочке.

Затем в приближении линейной упругости и взаимодействия ближайших соседей получены смещения частиц цепочки при деформации образца в однородном магнитном поле. Наконец, рассчитывается магнитомеханическая часть напряжения в цепочке по аналогии с напряжением, возникающим в цепочечных макромолекулах. Представлено сравнение результатов расчёта с экспериментами: для случая деформации сдвига достигнуто хорошее совпадение при малых и при достаточно больших магнитных полях, а для случая деформации одноосного растяжения достаточно хорошее совпадение с экспериментом получено на всём диапазоне исследуемых величин деформации.

Четвёртая глава посвящена описанию сильного магнитореологического эффекта, возникающего в феррогелях с высокой концентрацией наполнителя. Теоретическое рассмотрение происходящих в материале процессов опирается на идею об объединении частиц наполнителя в первичные кластеры приблизительно сферической формы на этапе синтеза материала. Основными структурными единицами материала, таким образом, становятся «большие» сферические частицы, соответствующие первичным кластерам. Образование цепочки кластеров описывается в работе с помощью иерархического подхода. В рамках этого подхода аналитически рассчитывается смещение заданного кластера, необходимое для образования цепочечной структуры, а затем рассчитывается сила, действующая на такую структуру в материале. Также получена функция распределения структур по количеству кластеров в каждой из них и рассчитано среднее число кластеров в цепочках. Наконец, при условии рассмотрения цепочки как эллипсоида получено выражения для модуля сдвига композита в рассматриваемой модели при отсутствии межцепочечного взаимодействия. Также приведено сравнение полученной теоретической зависимости модуля сдвига от приложенного магнитного поля с экспериментальными данными.

В **пятой главе** описаны экспериментальные исследования свойств магнитореологических эластомеров. Приведён состав исследуемых образцов и изложен процесс их синтеза. Синтезированы образцы с различной жёсткостью полимерной матрицы и различной концентрацией наполнителя. Для этих образцов при помощи вибрационной магнитометрии получены кривые намагничивания. Затем при помощи деформационных испытаний по растяжению образцов были измерены зависимости напряжения от деформации при условии малых деформаций, а также зависимости напряжения от приложенного магнитного поля. Рассчитаны значения модуля Юнга для синтезированных образцов. Продемонстрировано наличие магнитореологического эффекта и магнитного гистерезиса, а также рост интенсивности этих эффектов с уменьшением жёсткости

полимерной матрицы и увеличением концентрации наполнителя, чего и следовало ожидать. Также проведено сравнение экспериментальных зависимостей напряжения от магнитного поля с разработанной ранее теорией.

В **шестой главе** обсуждается задача о течении феррожидкости в щели, заполненной некоторой немагнитной жидкостью, под действием осциллирующего магнитного поля. Создаваемое смещением частиц магнетита циркулирующее течение позиционируется автором как возможная реализация транспорта лекарств в кровеносных сосудах. Для определения скорости течения феррожидкости решается система уравнений, состоящая из уравнений Навье-Стокса магнитогидродинамики, уравнения вращения магнитного момента частиц магнетита и уравнения непрерывности для концентрации магнитных частиц. При решении используются приближения первого порядка малости, сохранения начальной локальной концентрации магнитных частиц и мгновенной релаксации угла поворота магнитного момента частиц. Решение получено численно с помощью преобразования Фурье уравнений системы. В результате автором получены профили скорости жидкости при условии нормального распределения частиц наполнителя в капле феррожидкости.

В **заключении** сформулированы выводы и итоги работы, полностью отражающие её содержание. Даются прогнозы дальнейшего развития представленных в работе исследований. Отмечаются некоторые недостатки использованных в работе моделей и приближений.

Мусихиным А.Ю. проделана большая работа по исследованию структуры и свойств магнитополимерных композитных материалов, рассмотрен целый ряд интересных задач, предложены разумные и последовательные теоретические модели, подкреплённые сравнением с экспериментальными данными, в том числе, полученными самим автором. Также продемонстрирован высокий уровень владения аппаратом математической физики применительно к задачам механики, магнетизма и гидродинамики. Этим обеспечивается **достоверность** результатов и **обоснованность** выводов работы. Результаты работы опубликованы в научных изданиях, находящихся в перечне ВАК, а также представлены на всероссийских и международных конференциях.

К работе в целом нет существенных замечаний, однако по её прочтении возникает ряд вопросов и комментариев:

1) Следует отметить, что в обзоре литературы основное внимание уделяется экспериментальным работам, а обзор теоретических подходов фактически отсутствует.

Такой обзор особенно актуален для задачи о парном взаимодействии частиц и о поведении цепочек, которые изучались различными группами учёных ранее.

2) В главах 3, 4 и 5 при сравнении результатов с экспериментальными данными (рисунки 3.5, 3.9, 4.7, 5.5) следовало бы рассчитывать и указывать отклонение теоретических кривых от экспериментальных (например, среднеквадратичную погрешность аппроксимации), чтобы не определять совпадение с экспериментом «на глаз». Какими будут эти погрешности в работе? Что такое «хорошее» совпадение с экспериментом в данном случае? Кроме того, было бы полезно привести описание экспериментальных методов, чтобы обосновать адекватность применения предложенной модели для описания полученных экспериментальных данных.

3) При сравнении результатов моделирования с экспериментом в главе 4 (рисунок 4.7) можно отметить, что, хотя количественно теоретические предсказания близки к экспериментальным данным, формы соответствующих кривых демонстрируют отсутствие качественного совпадения поведения модельной и реальной систем. В конце главы автор выдвигает предположение о том, какой фактор мог бы повлиять на разницу в результатах, однако тут же объявляет его незначительным. В связи с этим возникает вопрос, а какие же факторы тогда являются значительными при объяснении разногласий с экспериментом?

4) Не совсем понятно, как в главе 4 учитывается (если учитывается) структура первичных агломератов и свойства отдельных магнитных частиц? В чём состоит отличие первичных агломератов от обыкновенных сферических ферромагнитных частиц в рамках используемой модели?

5) В главе 5, в которой автором описан метод синтеза магнитных эластомеров, указано, что в результате синтеза «получаются однородные полимерные композиты без каких-либо дефектов». Возникает вопрос, каким методом проверялась однородность распределения частиц наполнителя в полимерной матрице?

Представленные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Мусихина А.Ю.

Диссертационная работа Мусихина А.Ю. полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней УрФУ» и соответствует специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений», а автор диссертации, Мусихин Антон Юрьевич,

заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

профессор кафедры физики полимеров и кристаллов

Физического факультета Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"

доктор физико-математических наук (02.00.06 – высокомолекулярные соединения), доцент,

профессор РАН

КРАМАРЕНКО Елена Юльевна

17.08.2021

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова"

Физический факультет, кафедра физики полимеров и кристаллов

Тел.: 7(495)939-4013

E-mail: kram@polly.phys.msu.ru

Подпись сотрудника Е.Ю. Крамаренко заверяю:

Декан физического факультета

Московского государственного университета

имени М.В. Ломоносова, профессор

