

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

МУСИХИНА АНТОНА ЮРЬЕВИЧА «Реологические свойства жидких и мягких магнитных полимеров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Диссертационная работа А.Ю. Мусихина посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния магнитного поля на реологические свойства мягких магнитных композитов. Эти материалы, состоящие из дисперсных магнитных частиц, внедренных в полимерную матрицу, называются «интеллектуальными», так как их макроскопические свойства значительно меняются под действием магнитного поля. Такие особенности открывают широкие перспективы их применения в промышленных и биомедицинских устройствах. В работе А.Ю. Мусихина устанавливается взаимосвязь структурных превращений, вызываемых магнитным полем, с изменением реологических свойств мягких магнитных композитов. Указанные исследования являются **актуальными**, поскольку именно такой методологический подход, при котором сопоставляются теоретически рассчитанные данные с результатами экспериментальных исследований, позволяет выявить фундаментальные особенности структурных превращений в магниточувствительных средах и проанализировать влияние этих превращений на их макроскопические свойства.

Научная новизна работы 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 структурирования магнитных частиц в полимерной системе в результате магнитного взаимодействия между ними. Проведен анализ магнитомеханических явлений в феррогелях, обладающих повышенными магнитореологическими характеристиками. Рассмотрена также задача об индуцировании вращающимся магнитным полем циркуляционных потоков в жидкой среде, содержащей феррожидкость.

Теоретическая и практическая значимость. Решение сформулированных задач даст возможность качественно и количественно объяснять магнитореологические эффекты в магнитных полимерных системах. Выведены математические формулы для расчета напряжений (модулей) сдвига и растяжения композитов, помещенных в магнитное поле.

Результаты моделирования циркуляционных течений, создаваемых феррожидкостью в переменном магнитном поле, могут служить основой метода магнитной интенсификации транспорта лекарств в тромбированных кровеносных сосудах.

Диссертация состоит из введения, шести глав основного материала, заключения и списка цитируемой литературы из 150 названий. Основные научные результаты по теме диссертации представлены в 9 публикациях, из них 5 опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, и индексируются ведущими мировыми реферативными базами Scopus и/или WoS. Также получены 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные статьи и автореферат полностью отражают результаты, полученные автором. Работа прошла апробацию на 8 научных конференциях, в том числе на 4 международных.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели, задачи и методы исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации «**Магнитные жидкости, гели и эластомеры**» дан краткий исторический обзор изучения магнитных жидкостей и мягких магнитных композитов, раскрывается их «интеллектуальный» характер и выделяются сферы использования этих систем в промышленных и медицинских технологиях. Основываясь на достаточно содержательном рассмотрении и анализе современного состояния исследования магнитореологического эффекта в таких материалах, соискателем ставится главная цель диссертации: «Теоретическое изучение структурных превращений в магнитных гелях и эластомерах, а также их влияние на макроскопические упругие свойства данных композитов».

Вторая глава диссертации «**Упругие свойства феррогелей с пространственно однородным расположением частиц**» посвящена теоретическому исследованию упругих свойств таких систем. В основу модели берется приближение парного магнитного и упругого взаимодействия намагничивающихся сферических микрочастиц. В рамках этого приближения при наложении магнитного поля у каждой частицы рассматриваемой пары появляется дипольный момент, направленный вдоль поля, который также содержит перпендикулярную к полю составляющую. Именно она дает вклад в магнитную компоненту модуля сдвига, когда сдвиговая деформация перпендикулярна полю. Результаты расчетов демонстрируют, что в магнитном поле магнитоиндуцированная часть модуля сдвига может на порядок превышать модуль матрицы композита. При этом зависимость модуля от напряженности поля описывается

кривой с максимумом. При напряженности поля, стремящейся к бесконечности, модуль принимает конечное значение.

В третьей главе диссертации «Сдвиговое и одноосное напряжение в магнитном полимере с анизотропными структурами» представлено теоретическое описание зависимостей макроскопических сдвиговых напряжений и напряжений одноосного растяжения от деформации для магнитных полимерных систем, состоящих из магнитных микрочастиц, объединенных в линейные цепочки. Используется рассмотрение, при котором магнитное поле и направление растяжения направлены вдоль текстуры композита, в то время как деформация сдвига направлена перпендикулярно. Найдена магнитная компонента сил, действующих между частицами. Вычислены смещения всех частиц в цепочке при воздействии на систему макроскопической деформации. Расчеты продемонстрировали, что большие деформации при определенных значениях приводят к разрыву цепочек, что вызывает резкое уменьшение напряжения. Разработанная модель описывает значительное усиление упругих свойств композита в магнитных полях, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными.

В четвертой главе диссертации «Моделирование внутренних магнитореологических эффектов в феррогелях с частицами пермаллоя» предложена теоретическая модель, объясняющая сильный магнитореологический эффект в системах. За основу моделирования берется концепция первичных агломератов, в рамках которой учитывается, что в процессе структурирования матрицы частицы магнитного наполнителя образуют сферические агломераты. При воздействии магнитного поля эти агломераты притягиваются друг к другу и создают ориентированные вдоль поля цепочки. Объединение происходит из-за диполь-дипольного взаимодействия, при этом упругие силы матрицы препятствуют этому процессу. Разработан алгоритм, позволяющий определить среднее число агломератов в цепочке при заданном значении напряженности магнитного поля. Вычислена магнитоиндуцированная часть модуля сдвига. Рассчитанные значения качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными. В системах с альгинатными феррогелями и с магнитным наполнителем из пермаллоя магнитореологический эффект проявляется очень сильно. Так, упругость композита увеличивается на несколько порядков.

В пятой главе диссертации «Экспериментальное исследование упругих и магнитных свойств магнитных полимеров» описан синтез полимерных образцов, изложены результаты экспериментальных исследований упругих и магнитных свойств магнитореологических эластомеров. Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов, приведенных в главе

3. Экспериментальные зависимости напряжения растяжения образцов от напряженности магнитного поля хорошо согласуются с теоретически рассчитанными.

В шестой главе диссертации «**Магнитоиндуцированные циркуляционные течения в феррожидкостях**» описана модель циркуляционного течения феррожидкостей под действием неоднородного вращающегося поля. Автором разработан метод расчета поставленной задачи, в рамках которого использовались параметры: малая толщина щели канала по отношению к размерам соленоидов и небольшая объемная концентрация магнитных частиц в феррожидкости. Показано, что неоднородное вращающееся магнитное поле с амплитудой около 15 кА/м и угловой частотой порядка 10 рад/с при использовании феррожидкости может вызвать циркуляционный поток со скоростью около 0.5 мм/с.

В **Заключении** представлены главные результаты и выводы диссертации, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания.

1. В названии и тексте работы многократно повторяются слова «магнитный полимер». Полимеры не являются магнитными веществами. В работе изучены магнитные полимерные композиции.
2. На рис. 1.8 не указан масштаб на электронных микрофотографиях.
3. В главе 2 на стр. 45 и других говорится о магнитореологическом эффекте магнитных гелей. В литературе принято называть магнитореологическим эффект увеличение вязкости системы при ее течении в магнитном поле. Принципиальным отличием гелей от растворов является отсутствие текучести. Поэтому применение этого термина для описаний свойств гелей в магнитном поле некорректно. При этом сам же автор пишет о модуле упругого сдвига.
4. Нет объяснения экстремальной зависимости модуля сдвига геля от напряженности поля.
5. В главе 3 стр. 47, 48 и др. говорится о полимеризации композита под действием магнитного поля. Полимеризация не может протекать из-за влияния магнитного поля. Эта реакция происходит в результате химического взаимодействия (к сожалению, никаких химических реакций не приводится).
6. На стр. 54 говорится, что приближение 3.13 справедливо только в случае «очень малых относительных перемещений». Что означает «очень малых»?

7. На рис. 3.5 сопоставлены теоретически рассчитанные и экспериментальные значения модуля сдвига в зависимости от напряженности магнитного поля. Не указана погрешность определения модуля.

8. В главе 4 стр. 65 говорится о наполнителе из пермаллоя. Однако никаких характеристик этого наполнителя (размер и форма частиц, магнитные характеристики) не приводится.

9. На рис 4.6 зависимость среднего числа n агломератов в цепочках в зависимости от индукции приложенного магнитного поля B описывается кривой с насыщением. Какова причина постоянства n ? Можно ли говорить о критическом значении параметра B , каков его физический смысл?

10. Глава 5 стр. 90. Написано: «... в качестве основы берется полимер или эластомерная матрица». Здесь не может быть противопоставления. Любой эластомер является полимером.

11. Стр 97. Намагниченность мягких образцов растет с увеличением напряженности поля быстрее, чем жестких образцов. Почему?

12. Стр. 98. Образцы растягивались с очень медленной скоростью. Какой?

Высказанные замечания ни в коей мере не влияют на положительную оценку результатов диссертационной работы.

Давая общую оценку диссертации А.Ю. Мусихина, можно утверждать, что его работа представляет собой законченное, систематическое и важное исследование в области физики магнитных явлений. Результаты, полученные А.Ю. Мусихиным, являются новыми, а их достоверность обусловлена корректной постановкой задач, применением современных методов расчетов и взаимосогласованностью с экспериментальными данными. В целом, на защиту выносятся работа, выполненная на высоком научном уровне. Сформулированные в диссертации утверждения и выводы основываются на тщательном анализе большого объема проведенных теоретических исследований.

Результаты исследований А.Ю. Мусихина могут быть использованы в организациях, занимающихся созданием и исследованием магниточувствительных полимерных систем, а также их переработкой, в частности, в Федеральных государственных бюджетных образовательных учреждениях высшего профессионального образования: Московском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном университете, Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский

федеральный университет», в Федеральных государственных бюджетных учреждениях науки: Институте высокомолекулярных соединений РАН, Институте нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.

Диссертационная работа А.Ю. Мусихина удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней УрФУ» и соответствует специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений», а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Я, Вшивков Сергей Анатольевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент: профессор кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений Института естественных наук и математики УрФУ, доктор хим. наук, профессор.

620000 Екатеринбург, пр. Ленина, 51, тел. +7 (343) 389-97-25

E-mail: sergey.vshivkov@urfu.ru

21.02.2021

Вшивков Сергей Анатольевич

Подпись *Вшивков С.*
Завещаю: вед. документовед
Рудкина Д.Ф.

