

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 13.10.2016 № 131

О присуждении Биллер Анастасии Михайловне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров» по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 26.07.2016, протокол № 115 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Биллер Анастасия Михайловна 1987 года рождения, в 2011 г. окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет» (ГОУ ВПО «ПГТУ») по направлению «Прикладная механика», специализация «Механика деформируемого твёрдого тела». В 2014 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории физики и механики мягкого вещества ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории физики и механики мягкого вещества ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Райхер Юрий Львович, заведующий лабораторией физики и механики мягкого вещества ИМСС УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Налетова Вера Арсеньевна, доктор физико-математических наук, профессор (ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»);

Паньков Андрей Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент (ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, в своем положительном заключении, составленном Игумновым Леонидом Александровичем, д.ф.-м.н., профессором, директором Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета.

им. Н.И. Лобачевского, и утверждённом проректором по научной работе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», д.ф.-м.н. В.Б. Казанцевым, указала, что диссертация представляет собой законченное научное исследование в области теоретического изучения механики магнитореологических полимеров, заключающееся в построении и детальной разработке модели мезоскопического элемента магнитореологического эластомера, исследовании магнитомеханики пары намагничивающихся частиц в эластомере, изучении механические свойства композита. Результаты исследования имеют научное и практическое значение. Диссертационная работа отвечает требованиями Положения о присуждении ученых степеней, а её автор Биллер Анастасия Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях (журналах, рекомендуемых ВАК), 3 из которых также индексированы в базах Web of Science и Scopus. Наиболее значительные работы:

1. Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – 114904.
2. Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Dipolar models of ferromagnet particles interaction in magnetorheological composites // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2015. – Vol. 17. – No. 7-8. – P. 1106-1113.
3. Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Mesoscopic magnetomechanical hysteresis in a magnetorheological elastomer // Physical Review E. - 2015. – Vol. 92. – No. 2. – Art. no. 023202.
4. Биллер А.М., Столбов О.В. Райхер Ю.Л. Бистабильное магнитомеханическое поведение ферромагнитных частиц в эластомерной матрице // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 273-288.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Налетовой Веры Арсеньевны. В отзыве указано, что диссертация представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, результаты которого обладают научной новизной и являются полезным вкладом в фундаментальные исследования в области механики деформируемых материалов, взаимодействующих с магнитным полем. Оппонент отмечает отсутствие списка обозначений в диссертации, что затрудняет знакомство с ней и опечатки: неверное граничное условие на бесконечности (после формулы (1.9)) и в формуле (1.28). Во введении не упоминается о «магнитной пластичности» или «памяти формы» в магнитном поле магнитореологических эластомеров. Нет подробного описания известных из литературы экспериментальных исследований этих интересных явлений, хотя именно они являются основной мотивацией проводимых в диссертации исследований.

2. Положительный отзыв официального оппонента Панькова Андрея Анатольевича. В отзыве указывается на то, что диссертация выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является завершенным научным иссле-

дованием. Представленные результаты вносят существенный вклад в развитие методов расчёта и анализа особенностей распределения существенно неоднородных деформационных и магнитных полей на структурном уровне гетерогенных магнитореологических материалов во внешнем магнитном поле. Оппонент отмечает, отсутствие в диссертации списка принятых обозначений и аббревиатур моделей, который мог бы облегчить её прочтение. В диссертации делается неверное утверждение о том, что если распределение частиц статистически однородно, тогда композит на макроуровне изотропен; в этом же абзаце делается неверное утверждение, что «эластомеры, имеющие внутренние структуры называют анизотропными». На стр.11 написано: «анизотропные образцы демонстрируют больший рост упругого модуля по сравнению с изотропным», не уточняя ориентации направления (для модуля Юнга) или плоскости (для модуля сдвига) с учётом, что упругие свойства материала анизотропны. На стр.17 написано о связи «гипотезы бинарного взаимодействия» с «подходом Фойгта» (без библиографической ссылки). На стр.17 записано: «Две частицы в некотором образце полимера – это наименьший представительный элемент МР эластомера, являющийся носителем свойств композита как целого» (можно с этим согласиться только в смысле «первого или нулевого приближения» представительной области композита или в смысле «ячейки периодичности с двумя частицами» с соответствующими условиями симметрии на внешних границах). В разделе «научная новизна» написано, что «на мезоскопическом уровне оценено влияние взаимодействия частиц на эффективные характеристики композиционного материала», в тексте диссертации (см. (3.11); рис.3.12 на стр. 128) есть лишь «изменение жесткости образца с двумя частицами. На стр.67, 68 неясен смысл записанных условий вида: $q \ll l/a$, $0 \leq q \leq \infty$, если по определению $q = l/a \geq 2$ (см. стр.63, 66). В разделе 3.2 «Нелинейно намагничивающиеся частицы в конечном гиперупругом массиве» отсутствуют математическая постановка и граничные условия для деформационных и магнитных полей на внешних границах. В диссертационной работе замечены некорректные формулировки, например: термин «направление усилия сдвига» на стр.11; термины «мезомеханика» и «микромеханика» без пояснения общности и различий входящих в них моделей и подходов, например: «микроскопический подход» (стр.14), «микроструктура», «микроструктурный подход» (стр.9); термин «сторона» в предложении «Имеет форму куба со стороной $d = \dots$ »; в пояснении к формуле (2.7) «...усилие p » (известно, что это вектор напряжения); на стр.85 некорректная формулировка в предложении «На границах расчётной области никаких условий не задается, то есть внешняя поверхность остается свободной»; на стр.13 некорректная формулировка: «Есть работы, в которых закон намагничивания записывается честно с использованием...». В диссертационной работе замечены опечатки, например: на стр.12 в слове «статистический»; на стр.73 в формуле $f_r \propto \sin 2\gamma$; на стр.31 и 54 критерий применимости моделей в виде $l \ll a$; приведено «известное соотношение» (1.19) без ссылки на источник.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, основные научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность результатов. Ведущая организация в отзыве приводит несколько замечаний. Указания на возможность использования построенной модели мезоскопического элемента для предсказания макроскопических свойств МР эластоме-

ров требует предоставления оценок её применимости, к примеру, оценки по допустимым концентрациям наполнителя. Развитие вычислительных технологий достигло уровня, при котором можно исследовать поведение системы, состоящей из десятков и сотен частиц. Остается неясным, почему автор ограничился рассмотрением простого случая пары частиц. Если теоретические и численные исследования проведены в работе на очень высоком уровне, то сравнение с экспериментальными данными представлено существенно слабее. Да, есть подраздел 3.2.4, в котором предпринимается попытка оценить вклад в магнитодеформационный эффект, который вносят частицы, располагающиеся в образце вдоль вектора магнитного поля. Но даже в этом случае деформация образца эластомера, оцененная в рамках предложенной автором двухчастичной мезоскопической модели, лишь качественно совпадает с экспериментальными данными, а количественно более чем на 60% отличается от экспериментально измеренной магнитоиндцированной деформации. Эта величина принципиально не может претендовать на количественную точность из-за того, что в данной модели не учитывается вклад пар, расположенных поперек поля.

На автореферат поступило 6 положительных отзывов, из них 2 отзыва – без замечаний от: Иванова А.О., д.ф.-м.н., профессора, заместителя проректора по науке ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург; Исхакова Р.С. д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией физики магнитных пленок Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обосновленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН.

4 отзыва с замечаниями от: Дементьева О.Н., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой вычислительной механики и информационных технологий ФБГОУ ВО «Челябинский государственный университет», г. Челябинск; Радковской А.А., к.ф.-м.н., доцента кафедры магнетизма Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва; Кашевского Б.Э., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории физико-химической гидродинамики, Руководителя научного центра биомагнитных систем Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларусь, г. Минск, Беларусь; Зубарева А.Ю., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

В качестве замечаний отмечено следующее: отсутствие обсуждения многочастичных проявлений магнитомеханического гистерезиса; отсутствие простых оценок, которые позволили бы получить представление о порядке величины характерных скачков («зазубрин») на зависимости деформации от поля; недостаток анализа имеющегося экспериментального материала на предмет выявления особенностей макроскопического поведения исследуемого типа материалов, объяснение которых требует привлечь полученные автором мезоскопические представления; отсутствие в автореферате хотя бы качественного сопоставления теории и эксперимента.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых не вызывает сомнения, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области вычислительной механики деформируемого твёрдого тела, имеют большое число публикации с результатами теоретических работ по изучению механики гетерогенных магнитореологических материалов, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ННГУ является одним из ведущих университетов страны и хорошо известна своими достижениями в области механики деформируемого твёрдого тела. В университете активно ведутся фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области механики деформируемого твёрдого тела, комплексных и специальных разделов механики, динамики систем. Разрабатываются численные схемы и алгоритмы решения сложных задач механики с учётом нелинейности различного характера и воздействия тепловых, электромагнитных и других типов физических полей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана мезоскопическая модель двухчастичного элемента магнитореологического полимера, описывающая деформационное поведение системы под действием внешнего магнитного поля; модель позволяет связать структурную перестройку композита с изменением его механических свойств на макроскопическом масштабе;

доказано возникновение бистабильности и определены характеристики эффекта магнитомеханического гистерезиса в системе из двух намагничающихся частиц, погружённых в эластомер;

показана принципиальная роль магнитомеханического гистерезиса, существующего на мезоскопическом уровне, как причины уникальных макроскопических эффектов, проявляемых реальными магнитореологическими эластомерами в ответ на приложение магнитного поля и механической нагрузки;

введён критерий применимости приближений дипольного типа для расчёта пондеромоторных сил, действующих между неоднородно намагниченными частицами;

предложена модель нелинейных взаимодействующих диполей, значительно упрощающая расчёт сил магнитного взаимодействия в случае частиц из магнитомягкого ферромагнетика.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- выполнены решение и анализ задачи о магнитном силовом взаимодействии двух нелинейно и неоднородно намагничающихся частиц;
- полученное решение позволило сформулировать условия применимости приближений дипольного типа для расчёта межчастичных магнитных сил и указать область материальных параметров, где дипольные приближения полностью непригодны;
- предложены квазианалитические методы расчёта магнитных сил, связывающих линейно, но неоднородного намагничающиеся частицы, и упругой энергии, накапливающейся в эластомерной матрице при взаимном перемещении частиц;

- в системе двух намагничающихся частиц, заключённых в эластомер, обнаружен и исследован гистерезис деформации, вызываемый приложением внешнего магнитного поля;
- показано, что магнитомеханический гистерезис имеет место как для линейно, так и для нелинейно намагничающихся частиц;
- полученные результаты позволяют естественным образом объяснить природу эффектов магнитоиндукционных деформаций, упрочнения и псевдопластичности, наблюдавшихся в изучаемых композитах на макроскопическом уровне.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы аналитические и численные методы исследования магнитных характеристик и напряжённо-деформированного состояния в системе из двух твёрдых намагничающихся частиц, заключённых в гиперупругий эластомер;

изложены результаты решения задач магнитомеханики применительно к модели магнитореологического полимера;

изучено механическое поведение системы из двух намагничающихся частиц, погруженных в эластомерный массив;

раскрыта причина образования плотных кластеров частиц при намагничивании композиционного материала, а также их влияние на его макроскопические характеристики;

представлена формулировка критерия применимости приближений дипольного типа для расчёта межчастичных магнитных сил.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

создан комплекс алгоритмов и программ для решения задачи о механическом отклике на намагничивание, проявляемом системой из двух частиц ферромагнетика, окружённых гиперупругим эластомером, который может быть использован как для интерпретации результатов магнитомеханических измерений, так и для планирования новых экспериментов по изучению структурных изменений в магнитореологических материалах;

разработана мезоскопическая модель элемента магнитореологического эластомера, которая может служить основой для дальнейшего изучения этих композитов, в том числе на макроскопическом уровне;

представлена модель нелинейных взаимодействующих диполей, которая обеспечивает высокую точность при расчёте силы взаимодействия близкорасположенных магнитомягких частиц в полях с высокой напряжённостью;

определены пределы применимости стандартных приближений дипольного типа для расчёта межчастичных магнитных сил.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория основана на известных уравнениях электродинамики сплошных сред и нелинейной теории упругости;

идея базируется на вытекающем из анализа опубликованных экспериментальных результатов запросе на теорию, которая должна учитывать принципиальные особенности магнитореологического полимера: насыщение намагченности частиц и её неоднородность, большие деформации;

использованы современные апробированные численные методы (метод конечных элементов) и методы оптимизации (методы деформируемого многогранника и параллельных касательных), для которых продемонстрирована численная сходимость на решаемых задачах;

установлено качественное, а в некоторых случаях и количественное, соответствие полученных в работе аналитических и численных решений с теоретическими и экспериментальными данными, представленными в литературе.

Личный вклад соискателя состоит в применении аналитических методов к исследованию распределения магнитных полей в системе из двух намагничивающихся частиц; создании программ и проведении с их помощью численных экспериментов; анализе результатов и их сравнении с теоретическими и экспериментальными данными других авторов; участии в написании статей и подготовке докладов на конференциях.

Выбор направления исследований, постановка задач магнитостатики, анализ результатов и подготовка публикаций осуществлялись совместно с научным руководителем. Постановка задач нелинейной теории упругости, разработка численных алгоритмов и компьютерных программ проводилась совместно с соавтором – О.В. Столбовым.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием логически-обоснованного плана исследований, формулировкой проблем в общем виде, а затем их расщеплением на последовательность частных задач в порядке возрастания сложности; две главные линии исследования – расчёты магнитных и упругих взаимодействий – сначала глубоко разработаны по отдельности, а затем корректно сведены в единую модель, позволившую впервые детально описать магнитомеханику рассматриваемой системы.

На заседании 13 октября 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Биллер А.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

13.10.2016 г.

М.П.



/ Матвеенко Валерий Павлович

/ Зуев Андрей Леонидович