

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 01.12.2016, протокол № 138

О присуждении *Кузнецову Андрею Аркадьевичу*, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Процессы массопереноса и структурообразование в суспензии взаимодействующих магнитных наночастиц» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 29 сентября 2016 г, протокол № 123 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева 1, утвержденном приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Кузнецов Андрей Аркадьевич 1990 года рождения, в 2012 г. окончил ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по специальности «Радиофизика и электроника». В 2016 г. окончил очную аспирантуру ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН) по специальности «01.04.07 – Физика конденсированного состояния вещества», в настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – Пшеничников Александр Фёдорович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией динамики дисперсных систем.

Официальные оппоненты:

1) Зубарев Андрей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математической физики института математики и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург);

2) Пещеренко Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, начальник Инженерно-технического центра АО «Новомет-Пермь» (г. Пермь),
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», в своем положительном заключении, подписанном Полуниним Виктором Михайловичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры нанотехнологий и инженерной физики и Кузько Андреем Евгеньевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой нанотехнологий и инженерной физики, и утвержденном ректором ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный универ-

ситет», д.т.н, профессором С.Г. Емельяновым, указала, что диссертация А.А.Кузнецова представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискателем опубликовано 17 научных работ, в том числе из них 3 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки. В работах решена задача о гравитационной седиментации магнитных наночастиц в горизонтальном слое магнитной жидкости, предложена новая аппроксимационная формула для коэффициента броуновской градиентной диффузии магнитных частиц, справедливая в более широком диапазоне энергий магнитнодипольных взаимодействий, чем известные в литературе приближения, численно исследовано спонтанное ориентационное упорядочение дипольных моментов частиц в конечных объёмах магнитной суспензии, ограниченных жёсткими стенками, продемонстрировано существенное влияние размера и формы контейнера на параметры перехода в упорядоченное состояние и на магнитную структуру системы, исследована динамика спонтанного перемангничивания в стержнеобразной жёсткой цепочке магнитных частиц, подверженных вращательному броуновскому движению, обнаружена аналогия этого процесса с неелевской релаксацией одиночной суперпарамагнитной частицы, исследована динамика и равновесная структура одиночной гибкой цепочки магнитных частиц, взвешенной в вязкой среде, определены условия перехода такой цепочки в состояние плотной квазисферической или тороидальной глобулы.

Наиболее значительные работы:

1. Pshenichnikov A. F., Kuznetsov A. A. Equilibrium susceptibility of concentrated ferrocolloids: Monte Carlo simulation // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49, no. 1/2. – P. 101-109.

2. Pshenichnikov A. F., Kuznetsov A. A. Sedimentation of particles in concentrated magnetic fluids: numerical simulation // *Magnetohydrodynamics*. – 2015. – Vol. 51, no. 3. – Pp. 551-560.

3. Pshenichnikov A. F., Kuznetsov A. A. Self-organization of magnetic moments in dipolar chains with restricted degrees of freedom // *Physical Review E*. – 2015. – Vol. 92, no. 4. – P. 042303.

На диссертацию поступили отзывы от ведущей организации и оппонентов.

1. Положительный отзыв ведущей организации. В нем указывается, что полученные аппроксимационные выражения для коэффициента диффузии и осмотического давления магнитных частиц могут быть использованы при постановке краевых задач, для расчётов и оценки концентрационного расслоения магнитной жидкости в механизмах и устройствах, использующих её как рабочее тело. Указывается на возможное ограничение области применимости результатов исследования из-за отсутствия учёта малых дисперсионных взаимодействий между частицами, а также полидисперсности реальных жидкостей. Отмечается, что не везде в диссертации приводится количество проведенных симуляций; недостаточно раскрыты в тексте функция вязкости и накладываемые ей ограничения; в работе имеются опечатки.

2. Положительный отзыв официального оппонента А.Ю.Зубарева. Оппонент отмечает обширный обзор литературы, свидетельствующий о глубокой проработке автором научной литературы по тематике работы. Указывается, что в диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей большое значение в области массообмена в жидких многофазных средах. Сделанные замечания касаются уточнения, как учёт зависимости коэффициентов трения частиц от их концентрации скажется на динамические процессы в суспензии, а также того, как с точки зрения результатов исследования интерпретировать известные экспериментальные данные по фазовому расслоению реальных магнитных жидкостей. Отмечается наличие опечаток и грамматических ошибок.

3. Положительный отзыв официального оппонента С.Н.Пещеренко. В нем отмечается актуальность тематики исследования, связанную с тем, что наиболее интересная с точки зрения приложений магнитной жидкости область высоких концентраций магнитных частиц и высоких энергий межчастичных взаимодействий остаётся малоисследованной. В качестве замечания указывается отсутствие сравнений результатов моделирования с доступными в литературе экспериментальными данными по восприимчивости магнитных жидкостей. Отмечается необходимость комментариев, касающихся полидисперсности реальных магнитных жидкостей и учёта этого фактора в работе.

На автореферат поступило 6 отзывов: 1) Положительный отзыв без замечаний от д.ф.-м.н., профессора Иванова А.О., заместителя проректора по науке ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург); 2) Положительный отзыв от д.ф.-м.н., профессора Диканского Ю.И., зав. каф. общей и теоретической физики института математики и естественных наук ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь); 3) Положительный отзыв от к.т.н. Радионова А.В., директора ООО «НПВП «Феррогидродинамика» (г. Николаев, Украина) 4) Положительный отзыв без замечаний от д.ф.-м.н., профессора Баштового В.Г. и д.ф.-м.н., профессора Рекса А.Г., соответственно, заведующего и профессора кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь) 5) Положительный отзыв от к.т.н., доцента Страдомского Ю.И., профессора кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина» (г. Иванова); 6) Положительный отзыв без замечаний от д.ф.-м.н., профессора Скалдина О.А., зав. лаб. физики твердого тела ФГБУН «Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН» (г. Уфа).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- Не совсем понятен смысл сравнения процесса перемагничивания в стержнеобразной жёсткой цепочке магнитных частиц, подверженной вращательному броуновскому движению с неелевской релаксацией одиночной суперпарамагнитной частицы, так как броуновская и неелевская релаксация имеют совершенно разную природу.
- Ранее в ряде экспериментальных работ научной группы проф. Диканского сообщалось об обнаружении самопроизвольного образования, а также целенаправленном получении в магнитных жидкостях с достаточно крупными частицами областей (агрегатов) с отличным от нуля магнитным моментом. В этих же работах приведены резуль-

таты исследования особенностей релаксации намагниченности таких объектов и намагничивания магнитных жидкостей, содержащих хорошо развитую систему агрегатов, в том числе и в малом объеме (тонких слоях). Было бы интересным рассмотреть вопрос о возможности использования разработанных автором диссертации подходов для объяснения механизма реально наблюдаемого упорядочения моментов частиц в агрегатах таких магнитных жидкостей.

- отсутствие в работе экспериментальных исследований, подтверждающих полученные результаты и выводы;
- при определении полной потенциальной энергии наночастицы в магнитной жидкости не учитывается энергия сил Ван-дер-Ваальса;
- в большинстве магнитожидкостных устройств используется неоднородное магнитное поле, в котором на магнитные частицы действуют силы, значительно превышающие гравитационные силы. Рассмотрение данной задачи способствовало бы повышению практического значения диссертационной работы;

Вместе с тем, в положительных отзывах отмечено, что диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием, имеющим несомненное фундаментальное значение, результаты работы опубликованы в ведущих мировых научных журналах в области механики жидкости, а безусловным достоинством работы является разработка программного комплекса для численного моделирования динамики взаимодействующих феррочастиц.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальный оппонент д.ф.-м.н., проф. Зубарев А.Ю. является ведущим признанным специалистом в области теоретического исследования динамических и равновесных свойств магнитных нанодисперсных систем, включая диффузию, седиментацию и магнитофорез наночастиц, реологию магнитных жидкостей и суспензий. Официальный оппонент д.ф.-м.н., проф. Пещеренко С.Н. является признанным специалистом в области гидродинамики многофазных сред. Оппоненты имеют публикации по данным направлениям в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО «Юго-Западный Государственный Университет» является одним из лидеров в изучении магнитных жидкостей. Хорошо известны работы сотрудников ЮЗГУ по исследованию акусто-электромагнитных явлений в жидких поляризующихся средах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика численного моделирования процессов массопереноса и структурообразования в суспензии магнитных наночастиц с учетом магнитодипольных и стерических взаимодействий между частицами;

предложен новый способ вычисления приведенного коэффициента градиентной диффузии магнитных наночастиц, осмотического давления и свободной энергии суспензии на основе концентрационных профилей;

доказано существенное влияние магнитодипольных взаимодействий на равновесное распределение магнитных наночастиц в гравитационном поле;

введено понятие относительной толщины переходного слоя на концентрационном профиле.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказано:

– магнитодипольные взаимодействия способны привести к увеличению коэффициента сегрегации наночастиц в поле тяжести на несколько порядков, но не приводят к фазовому расслоению системы в отсутствие дополнительного потенциала притяжения;

– при высоких значениях безразмерного параметра магнитодипольных взаимодействий в системе с высокой концентрацией магнитной фазы возможно спонтанное упорядочение магнитных моментов частиц;

– для гибкой цепочки магнитных наночастиц, взвешенной в вязкой жидкости, возможен переход «клубок-глобула», если целостность цепочки поддерживается силами немагнитной природы;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы Монте-Карло и ланжевеновской динамики, а также численные методы обработки данных, реализованные в библиотеке `scipy` для языка программирования Python;

изложены условия перехода гибкой цепочки магнитных наночастиц в состояние квазисферической или тороидальной глобулы;

раскрыта аналогия между динамикой теплового перемагничивания стержнеобразной цепочки магнитных наночастиц и неелевской релаксацией одиночной суперпарамагнитной частицы с одноосной магнитной анизотропией;

показано влияние геометрии сосуда с суспензией магнитных наночастиц на ее равновесную магнитную структуру;

проведена модернизация алгоритма учёта стерических взаимодействий в рамках ланжевеновской динамики, что позволило провести сравнение результатов моделирования с известными аналитическими результатами для системы твёрдых дипольных сфер.

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

разработан метод расчёта пространственного распределения частиц в магнитной жидкости в гравитационном поле или поле центробежных сил;

определены критические значения параметра магнитодипольных взаимодействий и концентрации магнитных частиц, соответствующие спонтанному переходу системы в ориентационно упорядоченное состояние;

создан программный комплекс на основе современных параллельных вычислительных технологий для численного моделирования системы взаимодействующих магнитных наночастиц, взвешенных в вязкой среде;

представлена интерполяционная формула для приведенного коэффициента градиентной диффузии магнитных наночастиц, которая позволяет повысить точность решения краевых задач о концентрационных полях в магнитожидкостных устройствах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

используемые в работе модели межчастичных взаимодействий и броуновского движения частиц построены на основе фундаментальных представлений о физических свойствах магнитных нанодисперсных систем;

идея базируется на обобщении передового опыта по численному моделированию коллективной динамики частиц в нанодисперсных суспензиях;

использовано несколько способов тестирования разработанных расчётных программ;

установлены качественное и количественное согласие результатов диссертации с известными аналитическими предсказаниями для предельных случаев, а также с численными результатами других авторов, полученных в рамках альтернативных подходов.

Личный вклад соискателя состоит в выборе методов моделирования, написании и тестировании программ, проведении всех численных расчётов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов, а также подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленных научных задач и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований, обладающего понятной внутренней логикой и тесной взаимосвязью проблем, рассмотренных в трёх содержательных главах работы.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным "Положением о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г.

На заседании 1 декабря 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Кузнецову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета

 Матвеенко Валерий Павлович

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Зуев Андрей Леонидович

01.12.2016 г.

М.П.

