

**Отзыв официального оппонента**  
на диссертацию Кузнецова Андрея Аркадьевича,  
«Процессы массопереноса и структурообразование в суспензии взаимодействующих  
магнитных наночастиц», представленную к защите на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости,  
газа и плазмы

В диссертации А.А. Кузнецова численно, методами ланжевеновской динамики, исследован процесс осаждения магнитных наночастиц, взвешенных в вязкой среде, под действием гравитационного поля или поля центробежных сил. Главной особенностью работы является учет межчастичных взаимодействий (стерических и магнитодипольных), приводящих в ряде случаев к качественно новым эффектам, включая образование пространственных и ориентационных структур. Чрезвычайно малые размеры частиц (10 – 20 нм) делают необходимым также учет броуновского движения частиц и градиентной диффузии. По этой причине значительная часть работы посвящена зависимости коэффициентов диффузии от концентрации частиц и энергии магнитодипольных взаимодействий.

**Актуальность темы диссертационной работы** связана с несколькими обстоятельствами:

1. Система взаимодействующих магнитных наночастиц, взвешенных в вязкой среде, является хорошей апробированной моделью для магнитных жидкостей, достаточно широко использующихся в технике (магнитожидкостные герметизаторы, подшипники, сепараторы цветных металлов, аудиотехника, демпферы, акселерометры и т.п.).
2. Конкурирующие процессы массопереноса (гравитационная седиментация, магнитофорез и диффузия частиц) приводят к перераспределению магнитных частиц в пространстве и, как следствие, к дрейфу технологических параметров устройств, использующих магнитную жидкость в качестве рабочей. Так как в реальных устройствах применяются коллоидные растворы с высокой концентрацией магнитной фазы, межчастичные взаимодействия играют важную роль в процессах массопереноса.
3. Решение сопутствующих краевых задач сдерживается во многом отсутствием надежных данных о коэффициенте диффузии, его зависимости от концентрации частиц и энергии межчастичных взаимодействий.

**Структура диссертации.** Диссертация А.А. Кузнецова «Процессы массопереноса и структурообразование в суспензии взаимодействующих магнитных наночастиц» состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 212 наименований. Общий объем диссертации 121 страница машинописного текста, диссертация содержит 39 рисунков и 1 таблицу.

**Во введении** обоснована актуальность работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту. Заявлена цель диссертационной работы - получение информации о пространственном перераспределении магнитных наночастиц в вязкой среде и их самоорганизации на микро- и макроуровнях. Основное внимание уделено влиянию магнитодипольных и стерических взаимодействий на осаждение частиц в поле тяжести; роли магнитодипольных взаимодействий в концентрационном расслоении магнитной жидкости, формировании магнитной структуры и агрегации частиц.

**В первой главе (обзор литературы)** приведены известные из научной литературы сведения об основных свойствах и применении магнитных наносuspензий. Особое внимание уделено вопросам, непосредственно связанным с темой диссертационной работы. Это седиментация, магнитофорез и градиентная диффузия частиц в магнитной жидкости, фазовое расслоение и агрегирование частиц и проблема ориентационного упорядочения в дипольных системах. В этой главе, так, или иначе, обсуждается 161 источник, что свидетельствует о достаточно глубокой проработке научной литературы.

**Вторая глава диссертации** посвящена описанию методов математического моделирования дипольных систем и носит методический характер. Приводятся уравнения ланжевеновской динамики для магнитных частиц в вязкой среде. Обосновывается выбор используемой в работе аппроксимации для потенциала стерического отталкивания непроницаемых сфер. Дается описание методики численного решения уравнений движения

**В третьей главе** решена задача о седиментации взаимодействующих магнитных частиц в плоском горизонтальном слое суспензии. Построены профили концентрации в зависимости от средней по объему концентрации частиц и параметра магнитодипольных взаимодействий. Результаты численного моделирования используются для оценки границ применимости известных формул для коэффициента градиентной диффузии магнитных частиц. Предложена новая аппроксимация, на основе которой получены новые формулы для осмотического давления частиц и магнитодипольной поправки к свободной энергии магнитной жидкости. Формулы демонстрируют хорошее согласие с известными численными результатами других авторов. Показано, в частности, что увеличение параметра магнитодипольных взаимодействий приводит к увеличению коэффициента сегрегации частиц в поле тяжести на несколько порядков. Сравнение результатов моделирования для системы твердых дипольных сфер и системы Леннард-Джонса приводит автора к выводу об отсутствии в плоском слое магнитной жидкости с периодическими граничными условиями фазового перехода типа «газ – жидкость».

**Четвертая глава** посвящена проблеме ориентационного упорядочения магнитных моментов частиц в малом объеме суспензии, ограниченном жесткими стенками в отсутствие внешнего магнитного поля. Рассмотрены контейнеры сферической и цилиндрической формы. Внешние силовые поля отсутствуют. Показано, что при высоких значениях параметров магнитодипольных взаимодействий (несколько единиц) в системе возможно спонтанное упорядочение, при котором моменты частиц вблизи стенок направлены по касательным к ним. Этот порядок объясняется тем, что появление нормальной к границе компоненты намагниченности энергетически невыгодно, т.к. приводит к появлению больших размагничивающих полей. Как предельный случай вытянутого цилиндра рассматривается стержнеобразная цепочка магнитных частиц. Установлено, что полный магнитный момент цепочки совершает тепловые флуктуации, случайным образом меняя знак проекции на ее ось. Средняя частота таких перемагничиваний экспоненциально падает с ростом параметра взаимодействий. Показано, что этот процесс аналогичен перемагничиванию частицы с одноосной магнитной анизотропией и может быть описан количественно известной формулой для времени неелевской релаксации.

**Пятая глава диссертации** посвящена спонтанной трансформации одиночной гибкой цепочки из магнитных частиц в вязкой среде. Основное внимание сосредоточено на возможности схлопывания цепочки в плотное квазисферическое образование, называемое глобулой. Показано, что формирование глобул возможно при больших параметрах магнитодипольных взаимодействий, если на движение частиц в цепочке накладывается ограничение, не дающее двум соседним частицам отойти друг от друга дальше, чем на некоторое фиксированное расстояние, составляющее от двух до десяти

диаметров частицы. В остальных случаях наблюдается формирование кольцеобразных агрегатов.

**В заключение** приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

**Научная новизна** диссертации определяется тем, что в ней впервые решена задача о гравитационной седиментации магнитных наночастиц в горизонтальном слое магнитной жидкости при больших энергиях межчастичных взаимодействий между оседающими коллоидными частицами. Установлены пределы применимости известных аналитических выражений для коэффициента градиентной диффузии частиц и предложена простая аппроксимационная формула, справедливая в более широком диапазоне энергий магнитнодипольных взаимодействий. Продемонстрировано решающее влияние формы контейнера на магнитную структуру системы. Обнаружена глубокая аналогия между процессом перемагничивания стержнеобразной жёсткой цепочки частиц и неелевской релаксацией одиночной частицы с одноосной анизотропией. Определены условия перехода гибкой цепочки в состояние квазисферической или тороидальной глобулы.

По диссертационной работе А.А. Кузнецова необходимо сделать следующие **замечания**:

1. В уравнениях (2.1) – (2.2) ланжевеновской динамики коэффициенты трения полагаются не зависящими от концентрации частиц. Хотя это предположение не влияет на равновесные свойства системы, исследуемые в диссертации, его потенциальное влияние на динамические процессы следовало бы оценить. Хотя бы по порядку величины.

2. Дискуссия о фазовых переходах первого и второго рода в магнитных жидкостях ведется с начала восьмидесятых годов прошлого века (работы, Цеберса, Сано и Дои, Шлиомиса, Вейсса, Морозова, Зубарева, Иванова и др.), но до сих пор не утратила своей остроты. Имеются многочисленные аргументы "за" и "против" как в плане экспериментальных данных, так и в плане аналитических исследований и численного моделирования методами Монте-Карло или методами молекулярной динамики. В большинстве работ речь идет о магнитодипольных межчастичных взаимодействиях, как главной причине фазовых переходов в магнитных жидкостях. В этом контексте простая констатация отсутствия фазового перехода типа «газ – жидкость» в диссертационной работе А.А. Кузнецова кажется недостаточной. Хотелось бы знать его интерпретацию известных экспериментов с магнитными жидкостями, в которых этот переход наблюдался многократно.

3. В тексте диссертации встречаются опечатки и грамматические ошибки.

**Анализ диссертационной работы** показывает, что содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. **Выдвигаемые соискателем положения, а также сформированные выводы достоверны.** Во всех случаях, где это возможно, диссертант сравнивает свои результаты с известными из литературы данными, полученными разными методами, и демонстрирует хорошее количественное совпадение.

**Основные результаты и выводы диссертационной работы опубликованы в международных рецензируемых журналах, входящих в базу данных Web of Science.** Эти результаты хорошо известны специалистам, работающим с ультрадисперсными магнетиками по докладам автора на Международных и Всероссийских конференциях. Диссертация хорошо оформлена и легко читается. **Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.**

**Практическая значимость работы.** Предложенная в работе формула для коэффициента диффузии магнитных наночастиц может быть использована при

постановке и решении краевых задач о магнитных и концентрационных полях в магнитожидкостных устройствах и модификации процессов центрифугирования при синтезе магнитной жидкости.

**Заключение.** Сделанные замечания не носят принципиального характера. Диссертационная работа Кузнецова А.А. оставляет в целом очень хорошее впечатление. Автор имеет большое число публикаций по теме диссертации, включая три статьи в международных журналах, входящих в базу данных Web of Science. Он многократно докладывал свои результаты на российских и международных научных конференциях. Диссертация является научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно и на высоком уровне. Автором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей большое значение в области массообмена в жидких многофазных средах. Таким образом, диссертация «Процессы массопереноса и структурообразование в суспензии взаимодействующих магнитных наночастиц» соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, **Кузнецов Андрей Аркадьевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»,  
главный научный сотрудник Института математики и компьютерных наук,  
профессор кафедры математической физики

28.10.2016

 Зубарев Андрей Юрьевич

Адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Тел 905 800 7855  
E-mail: A.J.Zubarev@urfu.ru

Я, А. Ю. Зубарев, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

А.Ю. Зубарев 

Подпись 

Заверяю

