

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

Важной прикладной характеристикой магнитных жидкостей является их способность сохранять пространственную однородность в процессе эксплуатации. Поэтому обычно магнитные жидкости представляют собой коллоидные системы с размером частиц 10^{-7} - 10^{-9} м. Нарушение однородности магнитной жидкости вызывает дрейф эксплуатационных параметров устройства, в которых она используется. В настоящее время задачи об устойчивости магнитных коллоидов решаются в самом «грубом» варианте - приближении разбавленных растворов, в рамках которого пренебрегается межчастичными взаимодействиями и магнитными полями, создаваемыми самой жидкостью. Для корректной постановки и решения задачи о массопереносе в концентрированной магнитной жидкости необходима информация о влиянии межчастичных взаимодействий на интенсивность седиментации, на коэффициенты диффузии и информация об условиях формирования плотных структур, нарушающих однородность магнитной жидкости на мезоскопическом уровне. В диссертации А.А. Кузнецова свойства магнитных коллоидов изучаются в малоисследованной области высоких концентраций частиц и высоких энергий межчастичных взаимодействий, поэтому тематика диссертационного исследования является актуальной.

В своей диссертации А.А. Кузнецов численно моделирует осаждение и конгломерацию коллоидных частиц в магнитных жидкостях под действием гравитационного поля. Магнитная жидкость аппроксимируется системой однодоменных сферических наночастиц, взвешенных в вязкой среде, каждой из которых приписывается постоянный по модулю магнитный момент, совершающий тепловые флуктуации. Под действием гравитационного поля, межчастичных взаимодействий и теплового движения частицы перемещаются в пространстве, формируя со временем неоднородное стационарное поле концентрации. Параллельно с оседанием частиц идет формирование магнитных ориентационных структур, связанных с анизотропным потенциалом диполь-дипольного взаимодействия. Оба эти фактора (неоднородность концентрации частиц и структурообразование) существенно влияют на физические и реологические свойства магнитных жидкостей. В диссертации А.А. Кузнецова эти факторы впервые исследованы в области высоких концентраций частиц и высоких энергий межчастичных взаимодействий.

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. Вторая глава диссертации посвящена описанию методов математического моделирования дипольных систем и носит методический характер. Основные результаты работы получены методами ланжевеновской динамики. Кузнецовым был создан специализированный программный комплекс на параллельных алгоритмах, а для обработки данных использовались стандартные численные методы, реализованные в открытой библиотеке *scipy*. Третья, четвертая и пятая главы посвящены описанию оригинальных результатов. В заключение представлен краткий обзор основных результатов.

Наиболее важные результаты и научная новизна.

Впервые решена задача об осаждении (седиментации) магнитных наночастиц в магнитной жидкости при больших энергиях межчастичных взаимодействий. Вычисленные стационарные профили концентрации использованы для получения новой интерполяционной формулы для зависимости коэффициента градиентной диффузии магнитных наночастиц от концентрации частиц и параметра магнитодипольного взаимодействия в широком диапазоне их значений. Также получены новые интерполяционные формулы для осмотического давления частиц и свободной энергии магнитной жидкости. В области умеренных значений параметра магнитодипольных взаимодействий, изученной ранее, все полученные формулы имеют хорошее согласие с известными результатами других авторов.

Показано, что при высоких значениях параметров магнитодипольных взаимодействий (несколько единиц) в системе взаимодействующих диполей 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.

Установлено, что равновесная структура микрообъемов концентрированной магнитной жидкости с числом частиц не превышающим нескольких сотен, решающим образом определяется геометрической формой содержащего жидкость контейнера (плоский слой, цилиндр конечной высоты и сфера

Автором подробно исследован процесс самоорганизации магнитных моментов в жесткой и гибкой цепочках. Показано, что перемагничивания прямолинейной жесткой цепочки под действием тепловых флуктуаций подчиняется тем же законам, что и перемагничивание одиночной частицы с одноосной магнитной анизотропией. Более того, характерное время перемагничива-

ния цепочки описывается формулой, полученной ранее для неелевского времени релаксации магнитных моментов с перенормированной константой анизотропии. Для гибкой цепочки из магнитных частиц, скрепленных полимерными нитями, определена область безразмерных параметров, внутри которой возможно существование квазисферических или тороидальных глобул.

Основные результаты и выводы диссертационной работы опубликованы в международных рецензируемых журналах (две статьи в журнале *Magnetohydrodynamics* и одна статья в *Physical Review E*). Эти результаты многократно докладывались на научных конференциях различного уровня, включая международные. **Их достоверность** не вызывает сомнения. Автор подробно описывает методику вычислений и анализирует работы предшественников, сопоставляя свои результаты с известными данными. Диссертация написана ясно, достаточно подробно и хорошо иллюстрирована рисунками и графиками. **Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.**

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть использованы при постановке и решении краевых задач о магнитных и концентрационных полях в магнитожидкостных устройствах и оценке дрейфа технологических параметров, включая дрейф нуля магнитожидкостных датчиков.

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

1. Результаты работы сопоставляются с аналитическими и численными данными предшественников, однако их сопоставление с результатами лабораторных измерений магнитной восприимчивости отсутствуют, несмотря на большой объем таких данных. Причина непонятна и нуждается в пояснении.

2. Реальные магнитные жидкости существенно полидисперсны в отличие от монодисперсной модели, заложенной в работах автора. Необходимы комментарии автора, касающиеся этого расхождения.

Заключение. Несмотря на сделанные выше замечания, диссертационную работу Кузнецова А.А. оцениваю как хорошую. Автором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение в области массообмена в суспензиях наночастиц и коллоидных растворов. Считаю, что 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.

Я, С.Н. Пещеренко, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
начальник Инженерно-технического центра АО «Новомет-Пермь»

Адрес: 614065. Г. Пермь, ул. Шоссе космонавтов, 395.

Тел: 8(342)296-27-56

E-mail: psn@novomet.ru

14 ноября 2016 года

Пещеренко Сергей Николаевич

