

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Иванова Алексея Сергеевича

«Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в магнитную жидкость», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Вопросы исследования взаимосвязи динамики образования капельных агрегатов, структуры магнитных жидкостей, включая дисперсный состав и хемосорбцию поверхностно активных веществ, физических свойств магнитных коллоидов с различным дисперсным составом и поведения погруженных в них немагнитных тел являются одной из важнейших проблем механики магнитных жидкостей.

В настоящее время исследование микро- и наногидродинамике многофазных систем на основе магнитных жидкостей уделяется значительное внимание ввиду развития микрофлюидики, трехмерной биопечати и других приложений, в которой уникальное сочетание текучести и возможности активного бесконтактного управления находит широкое применение. В большинстве экспериментальных исследований динамики подобных систем при интерпретации результатов полагается отсутствие агрегатов в подобных системах, дисперсный состав описывается монофракцией, в лучшем случае двухпараметрическим распределением. Однако в реальных образцах магнитных жидкостей образуются и распадаются агрегаты, дисперсный состав чаще неоднородный и содержит различные фракции, оболочка из поверхностно-активного вещества может иметь дефекты, что оказывает значительное влияние на физические свойства и динамику коллоидов при внешних магнитных воздействиях. Эти изменения в значительной степени проявляются в микроканалах, в которых наблюдается диффузионно ограниченная агрегация (DLA). Многие теоретические исследования рассматривают динамику образования различных структур и агрегатов в магнитной жидкости, однако для сравнения используются результаты компьютерного моделирования, без верификации экспериментальными данными. В большинстве экспериментальных работ, посвящённых гидродинамике пара- и диамагнитных тел в магнитной жидкости, не учитываются размагничивающий фактор и изменение сил вблизи стенок ограничивающей поверхности. Это формирует актуальную научную проблематику, прокидывающий мост через эксперимент от особенностей синтеза магнитных коллоидов к теоретическому описанию с использованием компьютерного моделирования: динамика капельных агрегатов и плавание тел в магнитной жидкости. При всей диалектической противоположности эти задачи взаимно дополняют друг друга, совместно очерчивая область исследования данной диссертации, а результаты, представленные в работе, являются научно ценными и практически значимыми.

Диссертационная работа Иванова А.С. состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, отмечена научная и практическая значимость работы.

В первой главе дан подробный критический обзор литературных данных о физико-химических свойствах МЖ, которые важны для представления и понимания результатов диссертационного исследования. Из приведенного обзора следует, что динамика капельных агрегатов, образующихся в магнитной жидкости, претерпевающей магнитоуправляемый фазовый переход первого рода; природа зародышей магнитной конденсации, физические свойства конденсированной фазы и межфазной поверхности, условия реализации фазового перехода; магнитные силы плавучести, действующие на диа-, пара- и суперпарамагнитные тела в магнитной жидкости, мало исследованы и представляют научный интерес.

Во второй главе описывается обнаруженное автором новое явление - возникновение макроскопических вихревых течений изотермической магнитной жидкости возле ферро- или диамагнитного твёрдого тела, намагниченного внешним однородным и постоянным магнитным полем. Макроскопические течения возникают за счёт магнитофореза капельных агрегатов, образующихся в результате магнитоуправляемого фазового перехода первого рода вида «газ - жидкость». Капельные агрегаты образуются неравномерно, что в совокупности с неоднородным полем внутри магнитной жидкости обуславливает неоднородность ponderomotorной силы, вызывающей вихревое течение среды. Движение магнитной жидкости в окрестности ядра конденсации продолжается до тех пор, пока все капельные агрегаты не конденсируются на её поверхности. Такие течения магнитной жидкости дополнительно ускоряют магнитофорез капельных агрегатов по направлению к индуцированным магнитным полюсам твёрдого тела (конденсационного ядра), в результате наблюдается очень интенсивный внутренний массоперенос.

Третья глава описывает экспериментальное и численное исследование концентрационной конвекции магнитной жидкости в нулевом магнитном поле. Это явление важно как с фундаментальной, так и с практической точки зрения: динамика сильно концентрированной области в магнитной жидкости влияет на работу технических устройств, использующих магнитную жидкость в качестве рабочего тела: герметизаторы, демпферы, акустические излучатели и т.д. Исследования были направлены на установление физических закономерностей обнаруженного явления.

Четвертая глава диссертации содержит результаты трёх самостоятельных, но тематически связанных работ по исследованию некоторых аспектов температурно- и магнитоуправляемого фазового перехода в магнитной жидкости. Первый подраздел главы посвящён экспериментальному и численному исследованию температурной зависимости магнитоуправляемого фазового перехода в магнитной жидкости. Исследование разрешает ряд противоречий,

сложившихся в этой науке из-за несовпадающих между собой экспериментов, выполненных разными исследовательскими группами в 1980-1990-е гг.

Второй подраздел главы посвящён экспериментальному и численному исследованию причин обратимого изотермического объединения частиц в наноскопические агрегаты, вызванного добавлением чистой жидкости-носителя, в нулевом магнитном поле. Это явление важно в контексте 2-х вопросов, относящихся к фазовому переходу в магнитной жидкости. Что собой представляют и как появляются зародыши конденсированной фазы (капельных агрегатов) в магнитной жидкости? Какова причина появления наноразмерных агрегатов при разбавлении магнитной жидкости чистым носителем?

Третий подраздел главы посвящён экспериментальному и численному исследованию магнитного отклика магнитной жидкости, претерпевающей температурно-управляемый фазовый переход в нулевом ($H = 0$) магнитном поле. Проведено экспериментальное исследование квазистатических и динамических магнитных свойств объекта исследования. Разработана и апробирована методика, позволяющей описывать магнитный отклик магнитной жидкости с превращениями микроструктуры (в том числе по причине фазового перехода). Описание реальных магнитных свойств магнитной жидкости с микроструктурой осуществляется методом численного обращения экспериментальных кривых

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию температурной зависимости межфазного натяжения $\sigma(T)$ конденсированной фазы (капельных агрегатов) в МЖ, претерпевающей магнитоуправляемый фазовый переход первого рода вида «газ – жидкость». Диссертантом методом численной обработки экспериментальных измерений выявлено аномальное (по сравнению с обычными однокомпонентными жидкостями) поведение функции $\sigma(T)$ для всех исследованных образцов МЖ: капли конденсированной фазы при высоких T демонстрировали более высокую $\sigma(T)$, чем капли, конденсированные при низких T . Описанию, верификации и обоснованию этого аномального явления посвящена данная глава.

В шестой главе исследуются пондеромоторные силы, действующей на твердую немагнитную сферу, погруженную в конечных размеров контейнер с МЖ, намагниченную внешним однородным магнитным полем. Исследование проводилось экспериментально, численно и аналитически в рамках индукционного приближения, что позволило учесть размагничивающие поля, создаваемые как немагнитным телом, так и самой магнитной жидкостью

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых журналах, в основном, первого квартала, большинство из которых в моноавторстве, а также докладами на большом числе профильных конференций, которые всегда вызывали неподдельный интерес и живое обсуждение. Также хотелось бы отметить основные **достоинства** работы Иванова А.С. Автор в своей работе не придерживался «модных» направлений, а взялся за исследование «темных пятен» в гидродинамике

магнитных жидкостей, которые создают физическую основу для установления взаимосвязи структурных изменений в магнитном коллоиде с его физическими свойствами. Многие полагают, что ПАВ плотно связан с наночастицей, а автор детально исследовал процесс закрепления оболочек на частицах и показал влияние технологии синтеза. Большинство исследований рассматривает процесс образования агрегатов, преимущественно цепочечных, а возможно ли существование других форм агрегатов и как они распадаются? Автором проведены детальные исследования данной научной проблемы. Плавание немагнитных тел в магнитной жидкости в магнитном поле является актуальнейшей задачей для биопечати, микрофлюидики и других технических применений магнитных коллоидов, в работе представлены оригинальные результаты исследования сил, действующих на подобные тела с учетом ограничивающих факторов. Полученные результаты обладают **новизной**, являются **достоверными**, дополняют известные теоретические модели и согласуются с данными экспериментов.

Давая общую положительную оценку, необходимо сделать ряд **замечаний**:

1. На странице 64 диссертации из текста не ясна повторяемость экспериментов по видеофиксации динамики капельных агрегатов вблизи ядра конденсации. Наблюдалось ли оседание частиц на ядре ввиду его остаточной намагниченности и стенках ячейки.

2. В таблице 2 диссертации объемная доля магнетита указана до сотых долей процента знака, как автору удалось добиться такой точности?

3. Автор при некоторых характеристиках образцов, например, на странице 142 диссертации, утверждает, что они «демонстрировали коллоидную стабильность в гравитационном (без седиментации в течение 1.5 лет) и магнитном полях», другие образцы, например, MF-1 изготовлены в 1980-х гг. (стр. 136 диссертации). При этом многие эксперименты автора посвящены исследованию фазовых переходов и расслоений. В связи с этим возникает вопрос, что соискатель понимает под коллоидной стабильностью магнитных жидкостей?

4. В таблице 2 автореферата (стр.22) логично было бы указать значения среднего диаметра и площади поверхности частиц $\langle x \rangle$, $\langle S \rangle / \pi$ (таблица 3 диссертации стр.137)

5. Диссертация, к сожалению, не имеет сквозной нумерации образцов и местами довольно сложно разобраться о каких магнитных жидкостях идет речь, не всегда приведены их физические параметры. Например, в разделе 4.3, страница 142 упоминаются два образца: центрифугированный и содержащий агрегаты, далее на графиках 4.19, 4.20 представлены зависимости уже для трех образцов различной концентрации, механизм получения которых не ясен, дальнейшее обсуждение (рис. 4.21- 4.29) ведется уже для двух исходных образцов.

6. Экспериментальные данные и физическая интерпретация на основе распределения магнитных моментов, полученного методом регуляризованного численного обращения кривых $M(H)$ для исходного, центрифугированного и DLA образцов, представленные на рис. 4.22, значительно выиграли бы от сравнения с другими теоретическими моделями.

7. В тексте диссертации имеются некоторые неточности и опечатки, которые не влияют на ценность работы, так, на стр. 156 в тексте указан средний размер неелевских и броуновских частиц 16 и 59 нм, в подписи к рисунку 4.25 приведены значения 15.7 и 51 нм соответственно. Аналогичное замечание к рисунку 4.29.

8. Из текста диссертации не ясно, что автор понимает под пристеночной областью, не дано ее определение.

9. Также в тексте диссертации введена масса сокращений без соответствующего списка, что делает некоторые предложения сложными для понимания, в том числе встречаются использования одинаковых обозначений для различных величин, например, d на стр. 151 – это диаметр магнитного ядра, а на странице 193 полувысота цилиндра.

10. В 6 главе (рисунок 6.1 стр 193) в качестве тест-объекта рассматривается стеклянная сфера, заполненная диа-, пара- или суперпарамагнитным материалом, что в некоторой степени терминологически противоречит цели и названию работы.

11. Местами диссертация содержит автобиографические вставки и некоторые формулировки, не совсем уместные для данного научного труда, например, начало п.2.4 стр. 77 диссертации, «прекрасное оформление результатов», стр. 24 автореферата и т.д.

12. В автореферате имеются некоторые неточности в связке текст-рисунок и подрисуночная подпись: в тексте не приведено описания рисунка 15а, а немонотонная зависимость $\sigma(T)$ показано на рисунке 16б, в тексте диссертации верно; не указано зависимость какой физической величины представлена на рисунке 21, в диссертации соответствующий рисунок 6.21 оформлен верно.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не умаляют значимости основных результатов диссертации. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, обладающей актуальностью, научной новизной и высокой теоретической и практической значимостью. Результаты, полученные автором, имеют значение для гидродинамики магнитной жидкости, физической интерпретации взаимосвязи структуры, свойств и внешних воздействий магнитных коллоидов. Автор является специалистом-универсалом, выполнившим полный цикл исследований от синтеза образцов, их модификации, определения физических свойств, создания уникальных экспериментальных установок на основе оптических, магнитных, электрических и тепловых эффектов, обработке экспериментальных данных, их теоретической интерпретации и компьютерного моделирования в различных средах. Результаты диссертации могут быть использованы для оптимизации технологических процессов и представляют интерес для научных организаций, связанных с исследованием физико-химических свойств магнитных жидкостей.

Содержание диссертационной работы соответствует специальности. Автореферат диссертации полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы и соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Иванова Алексея Сергеевича «Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в магнитную жидкость» полностью удовлетворяет требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Иванов А.С., заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук, доцент, декан естественно-научного факультета, ведущий научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет",

научная специальность: 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

Ряполов Петр Алексеевич

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Телефон: +7 (4712) 22-25-53, e-mail: ryapolovpa@swsu.ru.

05.10.23

Подпись П.А. Ряполова заверяю:



*Специальность
кадров*

Т.В. Черных