

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель проректора по науке
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор физико-математических наук,
профессор

Иванов Алексей Олегович

«28» октября 2023 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» о диссертационной работе **Иванова Алексея Сергеевича** «Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в магнитную жидкость», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Иванова Алексея Сергеевича посвящена гидродинамике магнитных жидкостей – коллоидных растворов ферро- и ферромагнитных материалов в немагнитных жидкостях-носителях. Основное достижение диссертации заключается в том, что автором были обнаружены, описаны и исследованы гидродинамические явления в магнитных жидкостях, инициированные или являющиеся следствием магнитоуправляемого фазового перехода первого рода вида «газ-жидкость». В работе рассмотрены гидродинамические задачи о нестационарных изотермических течениях, вызванных магнитофорезом капельных агрегатов и концентрационной конвекцией; исследованы физические аспекты магнитоуправляемого фазового перехода и задача о магнитостатической пондеромоторной силе, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости, заполняющей цилиндрический контейнер. Контролируемый процесс массопереноса, бесконтактное управление движением немагнитных объектов в жидких магнитных средах являются важными элементами современных технологий и открывают перспективные возможности для различных приложений, в том числе биомедицинских. Поэтому **актуальность** диссертационной работы Иванова А.С не вызывает сомнения.

Целью диссертации является экспериментальное, аналитическое и численное исследование изотермических течений магнитных жидкостей, связанных с фазовым переходом первого рода вида «газ - жидкость» и образованием капельных агрегатов, а также пондеромоторных сил, способных

вызвать магнитофорез или левитацию немагнитных тел, погружённых в контейнер с магнитной жидкостью, при включении внешнего магнитного поля.

Структура и содержание диссертации.

Текст диссертации содержит 282 страницы, включая 88 рисунков и 4 таблицы и подразделяется на введение, шесть глав, заключение и список литературы на 381 источника. Работа в достаточной мере иллюстрирована, содержит необходимое и достаточное описание исследованных задач, методов и способов их решения, обсуждения результатов и выводов.

Во введении сформулирована тема, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, описываются методы исследования и структура диссертации.

В первой главе представлен обзор научной литературы, относящейся к теме диссертационного исследования. Приводятся основные сведения относительно магнитных жидкостей, которые важны для понимания оригинальных глав и интерпретации полученных результатов. Подробно освещены вопросы, касающиеся магнитогранулометрического анализа магнитных жидкостей, магнитоуправляемого фазового перехода и пондеромоторной силы, действующей на немагнитные тела в магнитной жидкости.

Во второй главе описывается обнаруженное автором гидродинамическое явление, представляющее собой нестационарное макроскопическое течение изотермической магнитной жидкости в окрестности твердого ферро- или диамагнитного тела, появляющееся в жидкости под действием однородного постоянного магнитного поля, если его напряжённость достаточно велика, чтобы вызвать магнитоуправляемый фазовый переход. Образующиеся капельные агрегаты подвержены магнитофорезу в неоднородном поле в окрестности твёрдого тела, что и вызывает течение окружающей жидкости. В случае плоского слоя и сферического твёрдого тела течение состоит из 4-х симметричных вихрей. Явление описано с помощью системы уравнений, состоящей из уравнений движения одножидкостной гидродинамики и уравнений магнитоуправляемого фазового перехода. Предложенная система уравнений решена численно. Результатом является качественное совпадение расчётного и экспериментального поля скорости течения по структуре и масштабу, однако отмечается их количественное отличие, объясняемое применявшейся моделью однокомпонентной приближением сплошной среды.

В третьей главе описываются обнаруженные интенсивные изотермические течения свободной конвекции в магнитной жидкости, предварительно подвергнутой фазовому расслоению во внешнем магнитном поле. Если на начальном этапе в магнитной жидкости создаётся инверсное распределение концентрации, то в дальнейшем наблюдаются течения, развивающиеся в результате неустойчивости Рэлея-Тейлора, и приводящие к интенсивному массопереносу, описываемому степенной зависимостью

безразмерного числа Рейнольдса от концентрационного числа Рэлея. Обработка экспериментальных измерений основывается на модельных представлениях о фазовой диаграмме магнитных жидкостей, которые на сегодняшний день представлены в нескольких значительно отличающихся друг от друга вариантах. С целью установления наиболее удачной фазовой диаграммы (из числа существующих) было выполнено численное моделирование в пакете OpenFOAM. Попарное сравнение результатов моделирования и лабораторного эксперимента, выполненное в рамках одной теоретической модели магнитоуправляемого фазового перехода, позволило сравнить три испытываемые диаграммы и показать связь между величиной внешнего воздействия (магнитного поля), степенью концентрационного расслоения феррожидкости и интенсивностью концентрационной конвекции.

Четвёртая глава посвящена физическим и физико-химическим аспектам магнитоуправляемого фазового перехода, который является необходимым условием для нарушения гидростатического равновесия в магнитной жидкости и образования гидродинамических течений, описанных в первых двух оригинальных главах диссертации. Структурно глава состоит из трёх подразделов. В первом подразделе главы исследуется температурная зависимость критического поля, при котором магнитная жидкость становится термодинамически неустойчивой и претерпевает фазовое превращение. Из этого исследования следует, что при фиксированной температуре у полидисперсной магнитной жидкости вместо одного критического поля существует широкий диапазон значений напряжённости магнитного поля, в котором наблюдается фазовый переход. Такое поведение аналогично фазовому поведению многокомпонентных расплавов и смесей. Во втором подразделе главы исследуются причины появления наноскопических агрегатов, являющихся зародышами капельных агрегатов. Численно и экспериментально проверяется предложенная гипотеза о существовании двух видов связи молекул ПАВ с поверхностью магнетитовых частиц. Доказывается возможность существования небольшой (несколько процентов) доли молекул стабилизатора, закреплённых на частице слабой водородной связью, что объясняет динамический характер образования и пептизации зародышей новой фазы. В третьем подразделе описывается каким образом формирование микроструктур из отдельных коллоидных частиц отражается на паспортных магнитных характеристиках таких феррожидкостей – квазистатической кривой намагничивания и температурно-частотной зависимости начальной динамической восприимчивости. Численное обращение экспериментально измеренных сигналов позволяет отследить эволюцию функции распределения структурных элементов коллоида с разным механизмом релаксации намагниченности и тем самым судить о микроструктуре и состоянии коллоида.

В пятой главе исследуется температурная зависимость поверхностного натяжения капельных агрегатов, во многом определяющая гидродинамику течения магнитной жидкости, расслоившейся во внешнем магнитном поле. Описано два независимых эксперимента, первый из которых основан на

методе вытягивания капли в однородном поле, предложенном Ж.-К. Бакри, а второй – на явлении гидродинамической неустойчивости вида Плато-Рэлея, при котором вытянутый капельный агрегат (столб жидкости) при выключении внешнего поля распадается на регулярную последовательность одинаковых капель. Второй эксперимент является методически более корректным и позволяет с большей точностью выполнить измерения, показавшие аномальный, то есть немонотонный и даже возрастающий характер температурной зависимости межфазного поверхностного натяжения. Физическая причина этой немонотонности объясняется гранулометрическим аспектом фазового перехода в полидисперсной магнитной жидкости, заключающимся в увеличении среднего магнитного момента частиц, входящих в состав капельных агрегатов с ростом температуры, а также необходимостью дополнительно увеличивать внешнюю напряженность прикладываемого поля, что в свою очередь приводит к увеличению разности концентраций в конденсированной и окружающей газообразной фазе коллоидных частиц.

В шестой главе исследуется магнитная пондеромоторная сила, действующая на немагнитную сферу, погружённую в цилиндрический контейнер, заполненный магнитной жидкостью, намагниченной вдоль оси контейнера. Комплексное исследование объединяет лабораторный эксперимент, численное моделирование и аналитическое исследование. Представлено аналитическое выражение для пондеромоторной силы, удовлетворительно согласующееся с лабораторными измерениями и прямым численным моделированием. Описаны условия существования устойчивых положений механического равновесия немагнитной сферы вблизи крышек контейнера указанной геометрии.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

По диссертационной работе Иванова А.С. необходимо сделать следующие замечания.

1. В главе 2 описание процесса массопереноса проводится без учета газовой фазы, а появление пондеромоторной силы связывается только с образованием капельных агрегатов, одиночные же частицы игнорируются. Насколько оправдан такой подход, ведь одиночные феррочастицы так же, как и капельные агрегаты, являются макроскопическими объектами по отношению к несущей среде?

2. В классическом смысле термин критической точки фазового перехода вида «газ-жидкость» определяет границу, выше которой происходит расслоение магнитной жидкости. В этом смысле на рис. 4.7 на с. 116 такой границей можно считать кривую 1. Интерпретация автора о существовании в полидисперсной магнитной жидкости критического интервала понятна, но вызывает некоторый терминологический диссонанс.

3. На с. 210 неудачно выбрана форма записи для силы F_m (формула (6.55)): в знаменателе присутствует разность внутренней и внешней проницаемостей

$(\mu_i - \mu_e)$. Таким образом, складывается впечатление, что при равенстве этих двух величин сила F_m стремится в бесконечность.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общее, очень хорошее впечатление о диссертационной работе. Анализ диссертации показывает, что ее содержание и структура находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Основные результаты и выводы работы опубликованы в 17 публикациях в регулярных научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из них 16 индексируются ведущими мировыми реферативными базами Scopus/WoS и 1 работа опубликована в российском журнале. Научные результаты Иванова А.С. хорошо известны специалистам, работающим с магнитными жидкостями по докладам автора на многочисленных международных и всероссийских конференциях. Диссертация хорошо оформлена и легко читается. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Он в достаточном для понимания объеме отражает наиболее важные моменты работы. Оформление автореферата отвечает требованиям положения ВАК РФ.

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что впервые обнаружены и комплексно (экспериментально, численно и аналитически) исследованы гидродинамические явления, имеющие сложную причинно-следственную связь между внешним магнитным воздействием на полидисперсную магнитную жидкость и её откликом. Полученные результаты могут использоваться при расчётах и проектировании магнитожидкостных устройств, а также для разработки терапевтических методик в медицинских приложениях, использующих магнитные жидкости в качестве рабочей среды.

Заключение.

Диссертационная работа Иванова А.С. содержит новые научные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее существенное значение в механике жидкости, газа и плазмы. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и соответствует специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы». Автор достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Результаты диссертационной работы обсуждались на научном семинаре кафедры теоретической и математической физики УрФУ (протокол № 100.089-06/09а от 26.09.2023 г.), руководитель семинара д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и математической физики УрФУ

Елфимова Е.А. Диссертационная работа и отзыв были одобрены участниками данного семинара, а диссертационная работа Иванова А.С. рекомендована к защите.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры теоретической и математической физики Зубаревым Андреем Юрьевичем.

Заведующий кафедрой
теоретической и математической
физики ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.
Ельцина» д.ф.-м.н., доцент
620002, Российская Федерация,
Свердловская область, город
Екатеринбург, ул. Ленина, д. 51
Тел.: +7 (343) 3899477
e-mail: ekaterina.elfimova@urfu.ru

Елфимова Екатерина Александровна

Профессор кафедры теоретической и
математической физики ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», д.ф.-м.н.,
профессор
620002, Российская Федерация,
Свердловская область, город
Екатеринбург, ул. Ленина, д. 51
Тел.: +7 (343) 3899477
e-mail: A.J.Zubarev@urfu.ru

Зубарев Андрей Юрьевич



Подпись Елфимовой Е.А. и Зубарева А.Ю. подтверждаю:

Ведущий документовед

/С.В. Жукова