

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора  
Налетовой Веры Арсеньевны  
на диссертацию 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

Диссертация посвящена исследованию свойств магнитных жидкостей – коллоидных растворов ферромагнитных частиц в немагнитных жидких носителях. Эти искусственно синтезируемые среды исследуются с середины XX века по настоящее время в связи с возможностями их практического применения в технике и медицине. Благодаря текучести и намагниченности, магнитные жидкости можно использовать для решения задач герметизации вращающихся валов двигателей, создания магнитоуправляемых демпферов и виброзащитных устройств, конструирования инерционных датчиков.

Практическое применение магнитных жидкостей, как правило, связано с воздействием внешнего магнитного поля, которое может изменять физические свойства жидкости и приводить к образованию в ней агрегатов, а также к фазовому расслоению системы. Проявления межчастичных взаимодействий очень сложны, так как они определяются как полидисперсностью, так и параметрами внешних воздействий (температурное и магнитное поле). Агрегирование в магнитной жидкости и ее расслоение, как правило, являются нежелательными явлениями. Но в некоторых ситуациях эти процессы могут быть использованы для создания течений, которые могут быть полезны в медицине и технике. Наличие в магнитных жидкостях немагнитных включений также может приводить к движению из-за магнитных сил, действующих на эти включения. Этот круг вопросов исследуется в представленной диссертации. Цель диссертационной работы – исследование изотермических течений магнитных жидкостей, связанных с фазовым переходом первого рода вида «газ – жидкость» и образованием капельных агрегатов, а также исследование пондеромоторных сил, способных вызвать магнитофорез или левитацию немагнитных тел в сосуде с магнитной жидкостью в однородном магнитном поле.

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, обоснованы экспериментальными и теоретическими исследованиями, и не противоречат известным научным данным. Выносимые на защиту положения обладают необходимой научной новизной.

Диссертация состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении диссертации приводятся необходимые сведения об актуальности и степени разработанности темы исследования, формулируются цель и задачи, защищаемые положения, описывается научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость, методы исследования, а также сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов с детализацией личного вклада автора.

Первая глава диссертации является обзором научной литературы по магнитным жидкостям, в котором основное внимание уделено сведениям, необходимым для описания и понимания результатов диссертации. Представлены сведения о физико-химических свойствах магнитных жидкостей, об их дисперсном составе и экспериментальных методах его анализа, о многообразии сил межчастичного взаимодействия в магнитных коллоидах. Описываются результаты известных теоретических и экспериментальных исследований магнитоуправляемого фазового перехода первого рода вида «газ – жидкость» в магнитных жидкостях, сопровождающегося возникновением капельных агрегатов. Подробно описываются исследования магнитоуправляемого массопереноса в магнитных жидкостях, касающихся транспорта немагнитных тел и динамики капельных агрегатов.

Обобщая обзор литературы, автор указывает на актуальные проблемы в этой науке и формулирует задачи, положенные в основу диссертационного исследования.

Во второй главе описывается обнаруженное автором явление возникновения изотермических вихревых течений магнитной жидкости вблизи твердых ферро- и диамагнитных тел, намагниченных однородным магнитным полем. Обнаружено, что гидродинамические течения вызваны магнитофорезом капельных агрегатов, образующихся в результате магнитоуправляемого фазового перехода. Экспериментальное исследование дополнено численным решением системы гидродинамических уравнений, описывающей изотермическое течение магнитной жидкости с капельными агрегатами. Результаты теоретического моделирования согласуются с результатами экспериментальных измерений относительно структуры течения и его характерного масштаба.

В третьей главе описывается экспериментальное и теоретическое исследование концентрационной конвекции в магнитной жидкости с микрокапельными агрегатами, предварительно стратифицированной в неоднородном магнитном поле, возникающей после выключения магнитного поля. Выполнено численное моделирование конвекции с использованием различных бинодальных кривых магнитоуправляемого фазового перехода (для определения концентрации частиц в микрокапельных агрегатах). Показана зависимость интенсивности концентрационной конвекции от величины концентрационного расслоения магнитной жидкости.

В четвертой главе исследуются физико-химические аспекты температурно- и магнитоуправляемого фазового перехода в магнитных жидкостях. Экспериментально на установке, реализующей модифицированный шлирен-метод фоторегистрации света, рассеянного на капельных агрегатах, исследуется температурная зависимость магнитоуправляемого фазового перехода в магнитной жидкости. Показано, что в полидисперсных магнитных жидкостях при фиксированной температуре фазовый переход наблюдается в широком диапазоне магнитных полей.

Отдельный подраздел главы посвящен исследованию причин возникновения зародышей капельных агрегатов в магнитных жидкостях в отсутствие магнитного поля. Экспериментально и численно демонстрируется возможность появления наноразмерных квазисферических агрегатов и обратимость этого агрегирования благодаря двум типам связи молекул олеиновой кислоты с поверхностью магнетитовой частицы. Предложен способ повышения коллоидной стабильности магнитных жидкостей путем их прогрева на финальной стадии синтеза, что позволяет заменить относительно слабые водородные связи между ПАВ и

наночастицей на сильные ковалентные связи.

В пятой главе описывается экспериментальное исследование температурной зависимости поверхностного натяжения капельных агрегатов, образующихся в результате магнитоуправляемого фазового перехода. Обнаружена аномальная зависимость поверхностного натяжения капельных агрегатов от температуры, заключающаяся в том, что у агрегатов, конденсированных при высокой температуре, поверхностное натяжение оказывается больше, чем у тех агрегатов, которые формируются при более низкой температуре.

Экспериментальные измерения выполнены двумя независимыми методами: методом вытягивания капельного агрегата в магнитном поле (метод Ж.-К. Бакри) и анализом капиллярной неустойчивости Плато-Рэля капельных агрегатов в нулевом поле. Автор утверждает, что метод Бакри существенно завышает результаты измерений, так как в этом методе поверхностное натяжение определяется одновременно и температурой и магнитным полем, причём поле увеличивает натяжение на несколько порядков больше, чем межчастичные взаимодействия.

В шестой главе описывается комплексное исследование пондеромоторной силы, действующей на твердую немагнитную сферу, погруженную в цилиндрический контейнер с магнитной жидкостью в приложенном однородном магнитном поле. Задача рассматривалась в индукционном приближении. Экспериментально и теоретически показано, что у немагнитных тел в гидроневесомости есть одно неустойчивое положение равновесия в центре цилиндрического контейнера и дополнительно два устойчивых положения равновесия вблизи его торцов при выполнении ряда условий.

Наиболее значимые результаты:

- обнаружены и описаны вихревые течения магнитной жидкости в окрестности диа- и ферромагнитных тел в приложенном однородном магнитном поле, вызванные магнитоуправляемым фазовым переходом и магнитофорезом капельных агрегатов;
- обнаружено, что в полидисперсных магнитных жидкостях магнитная конденсация капельных агрегатов происходит в широком интервале магнитных полей;
- экспериментально обнаружена и теоретически обоснована аномальная зависимость поверхностного натяжения капельных агрегатов от температуры;
- установлены зависимости величины и направления магнитной силы, действующей на немагнитную сферу в цилиндрическом контейнере с магнитной жидкостью, от величины внешнего однородного магнитного поля и геометрии контейнера.

Представленная диссертация является качественной научной работой, содержащей подробное описание задач, методов и подходов их решения, включая описания экспериментальных установок, использовавшихся методов исследования, а также полученные результаты. Работа в достаточной мере иллюстрирована. Результаты диссертации являются новыми. Достоверность результатов подтверждаются экспериментами и теоретическими выводами, совпадающими с экспериментальными результатами.

Практическая значимость результатов заключается как в учете влияния процессов

агрегирования частиц на работу традиционных устройств, так и в развитии перспективных устройств микрофлюидики и биомедицины. Кроме того, предложенный автором способ повышения агрегативной устойчивости магнитных жидкостей путём её прогрева на финальной стадии производства важен для развития технологий синтеза магнитных коллоидов.

Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались на авторитетных научных конференциях в России и за рубежом и признаны в научном сообществе. Автором опубликовано по теме диссертации 17 работ в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, и также входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в том числе 11 статей в журналах 1-2 квартилей. Автореферат в полной мере передает содержание диссертационной работы.

Диссертация А.С. Иванова выполнена в целом на хорошем уровне, однако при её чтении возникает ряд вопросов и замечаний, например:

1. При теоретическом описании вихревого течения магнитной жидкости около диамагнитного или ферромагнитного сферического тела в приложенном магнитном поле использована односкоростная модель двухфазной магнитной жидкости, в которой есть капли более концентрированной магнитной жидкости. Магнитная сила в этом случае определяется концентрацией капель. В диссертации магнитная сила, действующая на такую среду, определена формулой (2.22). В этой формуле концентрация частиц капель зависит только от времени. При этом можно показать, что эта сила потенциальна. Но если это так, то такая сила не может вызвать вихревое течение, так как ротор от нее (в формуле (2.31)) равен нулю. Очевидно, что движение в данном случае определяется неоднородностью концентрации капель, связанной с неоднородностью магнитного поля. Этот вопрос хорошо бы прояснить.

2. В главе 3 для теоретического исследования течения двухфазной магнитной жидкости, в которой есть капли более концентрированной магнитной жидкости, предложена двухскоростная модель (уравнения (3.5)). В рамках этой модели выписаны уравнения движения двух фаз: магнитной жидкости с нано ферромагнитными частицами и капель более концентрированной магнитной жидкости. Не ясно, почему в этих уравнениях отсутствует сила взаимодействия фаз, т.е. сила трения между фазами?

3. В главе 6 теоретически и экспериментально исследуется сила, действующая на сферическое тело в магнитной жидкости, находящейся в цилиндрическом сосуде в однородном магнитном поле. К сожалению, в диссертации отсутствует определение силы, действующей на тело в жидкости в произвольном случае. Сразу выписывается формула для магнитной силы (6.4), которая называется универсальной. Однако, эта формула верна только для следующих случаев: 1) жидкость покоится (статика), 2) жидкость однородна и изотермичная, т.е. намагниченность зависит только от магнитного поля, 3) тело из немагнитизирующегося материала. Поэтому непонятно, почему эта формула использована для вывода формулы (6.55) для магнитной силы, действующей на сферическое тело с произвольной магнитной проницаемостью? Надо отметить, что при достаточно большой магнитной проницаемости внутри тела из формулы (6.55) следует, что хорошо намагнитизирующееся тело должно двигаться в сторону меньшего поля!

Несмотря на высказанные замечания, следует заключить, что диссертационная работа Иванова Алексея Сергеевича «Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в магнитную жидкость» содержит разработанные автором теоретические положения и результаты экспериментов, совокупность которых можно квалифицировать как достижение в области исследования магнитных дисперсных систем, в которых происходят расслоение или образование капель более концентрированной жидкости, а также находятся тела из немагнитизирующегося материала.

Диссертация по актуальности выбранной темы, уровню проведенных исследований, научной и практической значимости, а также степени обоснованности результатов полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в ред. От 18.03.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и соответствует специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Автор диссертации Иванов Алексей Сергеевич достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

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

#### **Официальный оппонент**

ведущий научный сотрудник лаборатории  
физико-химической гидродинамики НИИ механики  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова»  
доктор физико-математических наук, профессор

Налетова Вера Арсеньевна

22 сентября 2023 г.

119991, г. Москва, Ленинские горы,  
НИИ Механики МГУ  
[www.imec.msu.ru](http://www.imec.msu.ru),  
тел. +7(495)939-59-74  
e-mail: [vera.a.naletova@mail.ru](mailto:vera.a.naletova@mail.ru)

Подпись В.А. Налетовой заверяю

И.о. директора НИИ механики МГУ,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»,  
профессор



Д.В. Георгиевский