

ОТЗЫВ

официального оппонента Ерина Константина Валерьевича 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

Магнитные жидкости – коллоидные системы из магнитных наночастиц в различных жидкостях активно исследуются, начиная с 60-х годов XX века. Такие системы получили большое количество практических применений, наиболее известные из них: вакуумные герметизаторы вращающихся деталей машин, магнитоуправляемые опоры, подшипники, сепараторы, демпферы измерительных приборов и динамических головок, инерционные датчики и другие. Крайне интересной особенностью магнитных жидкостей, которая активно исследуется с 1980-х годов является возможность обратимого образования в них агрегативных структур за счет значительного магнитного диполь-дипольного взаимодействия и различных факторов, нарушающих целостность адсорбционных оболочек частиц. Интерес к магнитным коллоидам в научном плане обусловлен разнообразием возникающих в них структурных и ориентационных эффектов, особенностями намагничивания этих сред, сложной гидродинамикой, теплофизикой и оптикой, сильными изменениями физических свойств системы под действием магнитных и электрических полей. К настоящему времени библиография работ по магнитным коллоидам насчитывает десятки тысяч статей.

Воздействие внешних полей приводит к изменению ряда физических свойств магнитного коллоида (намагниченности, поверхностного натяжения, диэлектрической проницаемости и др.) и появлению магнитовязких, магнитоакустических, магнитооптических эффектов, магнитодиффузии и движения межфазных границ и других. Действие магнитного поля может приводить и к структурным изменениям в магнитном коллоиде, образованию агрегатов различного вида или фазовому расслоению системы. Поскольку эффекты внешнего поля определяются различными параметрами системы:

концентрацией частиц, их размером, величиной магнитного момента, температурой и т.п., то комплексное применение различных экспериментальных методов исследования магнитных жидкостей, в которых происходит образование агрегатов, имеет чрезвычайно большое научное и практическое значение. С учетом этого заявленную автором цель диссертационной работы, состоящую в экспериментальном, аналитическом и численном исследовании 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 под действием поля, следует признать актуальной.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в рецензируемой диссертации, обоснованы результатами комплекса проведенных автором экспериментальных и теоретических исследований, не противоречат известным фактам и теоретическим представлениям о магнитных жидкостях. Выносимые на защиту положения обладают необходимой научной новизной.

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

Во введении автор традиционно обосновывает актуальность и характеризует степень разработанности темы исследования, формулирует цель и задачи, защищаемые положения, описывает научную новизну результатов работы, их теоретическую и практическую значимость, приводит описание методологии и методов диссертационного исследования, а также сведения, подтверждающие достоверность результатов диссертации и личный вклад автора.

Первая глава диссертации представляет собой описание основных сведений о физико-химических свойствах магнитных жидкостей, которые важны для представления и понимания результатов диссертационного исследования. Приведены сведения о характерных размерах наночастиц, природе их взаимодействия между ними, способах описания их полидисперсности, а также методах гранулометрического анализа магнитных жидкостей. Автор подробно описывает современные термодинамические подходы к описанию процесса фазового расслоения в магнитной жидкости с

образованием агрегатов различного типа. Уделено внимание таким важным научным проблемам феррогидродинамики как транспорт немагнитных тел и динамика капельных агрегатов.

На основе анализа литературы автором сделаны выводы, позволившие уточнить задачи исследования.

Во второй главе описывается обнаруженное автором новое явление - возникновение изотермических макроскопических вихревых течений магнитной жидкости вблизи ферро- или диамагнитного твёрдого тела, намагниченного внешним однородным и постоянным магнитным полем. Автор показывает, что макроскопические течения возникают за счёт магнитофореза образующихся в магнитной жидкости капельных агрегатов. Магнитофоретическое движение агрегатов в неоднородном поле вблизи полюсов ферромагнитного тела (или экватора диамагнитного) увлекает за собой жидкую основу, что в итоге и приводит к вихревому течению. Автором проведено численное решение системы гидродинамических уравнений, описывающей изотермическое течение магнитной жидкости с капельными агрегатами. Результаты численного решения хорошо согласуются с экспериментом в части характера, характерного масштаба и структуры вихревых течений.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования изотермической концентрационной конвекции в тонком слое магнитной жидкости с микрокапельными агрегатами, возникающей после выключения внешнего магнитного поля. Автор доказывает зависимость интенсивности концентрационной конвекции магнитной жидкости от степени её концентрационного расслоения, описываемого бинодальной кривой магнитоуправляемого фазового перехода.

Четвертая глава посвящена исследованиям структуры, магнитных свойств и дисперсного состава магнитных жидкостей, содержащих капельные агрегаты. На оригинальной установке с помощью модифицированного шлирен-метода фоторегистрации света, рассеянного на капельных агрегатах, исследован магнитоуправляемый фазовый переход в магнитной жидкости. Автор экспериментально показал возможность определения возможности фазового перехода в полидисперсных магнитных жидкостях при фиксированной

температуре в широком диапазоне магнитных полей, при помощи диаграмм, аналогичных используемым в теории многокомпонентных жидкостей диаграмм «вапорус-ликвидус». Для описания свойств агрегированных магнитных жидкостей предложен модифицированный параметр Ланжевена для капельных агрегатов, определяемый через температурозависимые средний магнитный момент и ширину распределения частиц по размерам в конденсированной фазе. Значительная часть главы посвящена анализу возможности спонтанного возникновения агрегатов в магнитных жидкостях без воздействия магнитного поля. На основе эксперимента и численного моделирования автор объясняет возможность появления наноразмерных квазисферических агрегатов и обратимость агрегирования наличием двух возможных типов связи молекул олеиновой кислоты с поверхностью наночастицы магнетита. Предложен метод повышения коллоидной стабильности магнитных жидкостей за счет прогрева до 100 °С на финальной стадии синтеза, при котором происходит замена слабых водородных связей на ковалентные.

В пятой главе автор описывает экспериментальные результаты исследования температурной зависимости межфазного поверхностного натяжения $\sigma(T)$ агрегатов в магнитной жидкости, образовавшихся в результате магнитоуправляемого фазового перехода. В ходе экспериментов обнаружена аномальная зависимость поверхностного натяжения капельных агрегатов от температуры. Для повышения достоверности автор провел измерение поверхностного натяжения капельных агрегатов в диапазоне температур от 10 до 80 °С двумя независимыми методами: методом вытягивания капельного агрегата в магнитном поле и анализом капиллярной неустойчивости Плато-Рэля капельных агрегатов в нулевом поле. Интерпретация полученных результатов, основанная на известной модели жидкости Штокмайера, объясняет аномальное поведение поверхностного натяжения при увеличении температуры за счет конкуренции процессов магнитного упорядочения и тепловой хаотизации взаимодействующих дипольных частиц.

Шестая глава посвящена исследованиям пондеромоторной силы, действующей со стороны магнитного поля на твердую немагнитную сферу, погруженную в контейнер с магнитной жидкостью. Автором проанализированы известные подходы к определению пондеромоторной силы, действующей на

немагнитную сферу в магнитной жидкости. Разделены вклады «объёмной» и «поверхностной» пондеромоторной силы и разъяснена их физическая природа. По результатам сопоставления эксперимента, теоретических расчетов и компьютерного моделирования показано, что у немагнитных тел есть одно неустойчивое положение равновесия в центре цилиндрического контейнера и, в некоторых случаях, два устойчивых положения равновесия вблизи его торцов.

В целом, диссертация оставляет впечатление качественной научной работы. В ней подробно описаны используемые установки, приборы и методы, а также детально описываются полученные результаты. Каждая глава начинается с краткого анонса содержания и заканчивается выводами, что значительно упрощает ознакомление с работой. Графический и иллюстративный материал работы качественный. Результаты диссертации представляются новыми и достоверными.

Автором получены новые важные экспериментальные результаты в части обнаружения, исследования и численного моделирования изотермических вихревых течений магнитной жидкости в окрестности диа- и ферромагнитных тел, вызванных возникновением капельных агрегатов и их магнитофорезом в неоднородном поле; исследования влияния полидисперсности и температуры на магнитоуправляемый фазовый переход вида «газ - жидкость» в магнитных жидкостях; выполнены теоретические и экспериментальные исследования, а также численное моделирование магнитной пондеромоторной силы и устойчивость механического равновесия немагнитной сферы в цилиндрическом контейнере с магнитной жидкостью.

Практическая значимость результатов заключается как в расширении возможностей использования магнитных жидкостей в традиционных устройствах герметизации вращающихся валов, магнитной сепарации и демпфирования колебаний за счет учета влияния на их работу агрегирования частиц, так и для развития перспективных устройств микрофлюидики и биомедицины: систем гомогенизации жидкостей с наполнителями на основе магнитных жидкостей и интенсификации транспорта лекарств в кровеносных сосудах. Предложенный автором способ повышения агрегативной устойчивости магнитных жидкостей путём её прогрева на финальной стадии

производства чрезвычайно важен для развития технологий синтеза магнитных коллоидов и оценки их структурного состояния.

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, а 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 весьма высоком научном уровне, однако при её чтении возникает ряд вопросов и замечаний:

1. При моделировании вихревых течений в магнитной жидкости в неоднородном поле в условиях фазового расслоения автор, по-видимому, полагает вязкость системы в уравнении Навье-Стокса (2.7) постоянной. Однако это не выглядит очевидным. Появление в магнитной жидкости агрегатов, вытянутых вдоль направления поля, приводит к изменению ее реологических свойств, что было неоднократно подтверждено экспериментально. При этом равномерное движение агрегата в разных областях системы может обеспечиваться только равенством магнитофоретической силы и силы вязкого трения. Так как агрегаты вытянуты всегда в одном направлении, то направление скорости его движения оказывается ориентировано под разными углами к его длинной оси, что, несомненно, влияет на силу сопротивления его движению. Даже если предположить, что агрегаты вообще неподвижны относительно движущейся окружающей жидкости, изменение вязкости при агрегировании может быть существенным, и возможно даже отличаться в различных областях системы с разными напряженностями магнитного поля.

2. На странице 63 автор постулирует «Так, при некотором фиксированном внешнем поле и объеме V с N частицами намагниченность будет больше, если все N частиц объединены в плотный агрегат, чем когда эти же N частиц равномерно распределены в V ». Это не подтверждается некоторыми современными исследованиями, например, Dikansky Y.I., Ispiryan A.G., Arefyev I.M., Zakinyan A.R., Drozdov A.S. Dispersion medium crystallization effect on the magnetic susceptibility of ferrofluids // Journal of Applied Physics. 2022. V. 131. № 20. 204701, которые доказывают прямо противоположное – при агрегировании частиц магнитная восприимчивость системы не только не возрастает, а даже может снижаться за счет влияния размагничивающего поля агрегатов. Формулы (2.17) и (2.20) собственно подтверждают это – если все частицы в

системе объединятся в один очень длинный агрегат с близким к нулю размагничивающим полем, то (2.17) и (2.20) дадут одинаковый результат, т.е. намагниченность системы не возрастет.

3. На стр. 168 автор пишет: «...повышение T приводит к увеличению диполь-дипольных межчастичных взаимодействий внутри капельных агрегатов из-за увеличения среднего магнитного момента $\langle m_{II} \rangle$ коллоидных частиц внутри них». Непонятно, что автор имеет в виду. Каким образом повышение температуры может увеличить средний магнитный момент коллоидных частиц? Каков механизм этого явления, ведь магнитный момент отдельной наночастицы магнетита не может увеличиваться с ростом температуры? За счет чего при повышении температуры в агрегаты начинают объединяться более крупные частицы?

4. Автор полагает (стр. 167-168), что объемная концентрация частиц в капельном агрегате численно равна плотности упаковки в простой кубической решетке, т.е. превышает 50%. Это вызывает сомнения. Магнитные жидкости типа магнетит в керосине, синтезированные в г. Краснодаре в НИПИ Газпереработки, как правило, теряют текучесть при концентрациях 28-33%. Представляется маловероятным, чтобы в способном деформироваться агрегате концентрация была выше 25-28%. Рисунок 5.1 подтверждает это: из него намагниченность насыщения агрегатов равна 100-120 кА/м, что позволяет оценить объемную концентрацию магнетита в них ($(120 \text{ кА/м} / 480 \text{ кА/м}) 100\% = 25\%$).

5. Одним из результатов, полученных автором, является возрастающая зависимость межфазного натяжения капельных агрегатов от температуры. Автор акцентирует внимание на том, что зависимость уникальная и не совпадает с известными зависимостями поверхностного натяжения жидкостей от температуры. Действительно, многочисленные исследования магнитных жидкостей с капельными агрегатами и близких к ним систем – магнитных эмульсий с низким межфазным натяжением как традиционным методом, которым пользовался автор диссертации, так и другими методами, не обнаружили роста межфазного натяжения с температурой (Кушнарев В.В. Моделирование топологических нестабильностей межфазных границ в магнитных коллоидах: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2004; Мкртчян В.Д., Диканский Ю.И. Особенности формирования структурных решеток в тонких слоях магнитных эмульсий // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 6. С. 752-760; Белых С.С., Ерин К.В., Фурсова В.В. Исследование влияния температуры на магнитооптический эффект изменения прозрачности магнитной эмульсии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 3. С. 333-337). Кроме того, экспериментальные результаты

измерения межфазного натяжения, выполненные автором двумя различными способами (рис. 5.5 и рис. 5.14), отличаются на порядок и даже более. При этом автор это отличие никак не комментирует, сосредоточившись на качественном согласии характера зависимости от температуры.

6. Предлагаемое автором физическое объяснение аномальной температурной зависимости поверхностного натяжения в рамках модельной жидкости Штокмайера не позволяет понять в полной мере физическую природу влияния температуры на межфазное натяжение. Из рис. 5.8 следует, что можно получить, в общем, любую зависимость межфазного натяжения от температуры, но для этого физические условия должны быть различными. Например, в постоянном магнитном поле (безразмерное поле H^* на рис. 5.8) зависимость от температуры вполне традиционная – убывающая, а возрастающую зависимость можно получить только при одновременном изменении и температуры, и поля. Однако экспериментальные кривые (рис. 5.5) получены при постоянном поле. В связи с этим предлагаемое автором физическое объяснение «...конечный результат зависит от конкуренции порядка (магнитная конденсация) – беспорядка (тепловое движение)...» представляется не вполне ясным.

Несмотря на высказанные замечания, следует выразить мнение о том, что:

– диссертационная работа Иванова Алексея Сергеевича «Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в магнитную жидкость» содержит разработанные автором теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области магнитных дисперсных наносистем;

– 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 достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

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

Официальный оппонент

профессор кафедры экспериментальной физики
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
доктор физико-математических наук, доцент

Ерин Константин Валерьевич

08 сентября 2023 г.

355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
www.ncfu.ru, тел. (8652)95-68-00 доб. 4914
e-mail: kerin@ncfu.ru



ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ
Заместитель начальника
Управления
делами СКФУ

Ерина Т. В.

Догачева А. В.