

«УТВЕРЖДАЮ»



И.О. директора Федерального государственного  
Бюджетного учреждения науки Института  
теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,

Д.Ф. Сиковский

«12» октября 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Судакова Владимира Сергеевича «Явления самоорганизации в сложных активных коллоидных системах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Работа посвящена экспериментальному исследованию процессов самоорганизации активных капель в эмульсии.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 104 страницы, включая 32 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 250 наименований.

**Во введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы; сформулированы цели работы; научная новизна и практическая ценность полученных результатов; перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, объеме и структуре работы.

**В первой главе** диссертации анализируется движение смеси активных и пассивных капель в эмульсии масло-в-воде. Механизм движения связан с образованием агломератов между активными и пассивными каплями в результате флокуляции. Такие агломераты демонстрируют способность двигаться как единое целое. Альтернативный метод перемещения пассивных капель в эмульсии связан с действием активных капель в качестве насоса, когда активные капли приводят в движение дисперсную фазу эмульсии, а вместе с ней движутся и пассивные капли. Результаты исследования показывают, что перемещение пассивных капель в эмульсии возможно, если диаметр активных капель больше или сопоставим с диаметром пассивных капель. При обратном соотношении диаметров капель, образуются агломераты, которые интенсивно вращаются, что делает невозможным перемещение пассивных капель на заданное расстояние.

**Во второй главе** исследуются вопросы, связанные с коллективными явлениями в активной эмульсии. Продемонстрировано, что ахиральные активные капли могут самоорганизовываться в вихревые структуры. Ключевую роль в возникновении режима коллективной динамической хиральности играет линейный размер области, ограничивающий движение капель и скорость их движения. Для возникновения режима коллективной динамической хиральности скорость капель в эмульсии должна быть выше некоторого нижнего предела. Устойчивый режим коллективной динамической хиральности, соответствующий неизменному направлению вращения капель в вихре, возникает лишь в том случае, если размер области, ограничивающий движение капель, больше некоторого нижнего предела. При уменьшении линейного размера области, режим коллективной динамической хиральности становится неустойчивым, направление движения капель в вихрях периодически изменяется.

**В третьей главе** исследовалась проблема роста кристалла в активной эмульсии. Для выращивания кристалла использовалась активная эмульсия масло-в-воде, где

монодисперсные капли октана диаметром 70 мкм были диспергированы в водном растворе анионного стабилизатора ДСН. Для активации эмульсии применялся водный раствор аммиака. За счет диффузии аммиака из водной фазы в капли масла, распределение концентрации аммиака на межфазной поверхности, движущейся капли оказывается не равномерным. В силу зависимости межфазного натяжения от концентрации аммиака, возникает течение Марангони вблизи поверхности капли. Путем изменения концентрации аммиака в водном растворе, можно варьировать скоростью движения капель в эмульсии в диапазоне порядка величины, что имеет существенное значение для исследования кинетики кристаллизации. Скорость роста кристалла определяется конкуренцией между процессами присоединения и отрыва капель от поверхности кристалла. С ростом скорости движения капель в эмульсии возрастает частота соударения капель с поверхностью кристалла, что способствует увеличению частоты присоединения капель к поверхности кристалла. Вместе с тем, от скорости движения капель в эмульсии зависит величина сдвиговых напряжений, под действием которых капли могут отрываться от поверхности кристалла.

**В четвёртой главе** диссертации рассматриваются вопросы перемещения капель в эмульсии с помощью магнитных наночастиц. Для анализа этого способа перемещения эмульсионных капель использовалась эмульсия масло-в-воде, где в сплошной фазе эмульсии были диспергированы ферро магнитные наночастицы. В данной главе диссертации анализируется движение эмульсионных капель при вариации диаметра капель, вязкости сплошной фазы эмульсии, градиента магнитного поля и численной плотности капель в эмульсии. Особенность рассматриваемого здесь метода состоит в том, что МНЧ не внедрялись в капли, а были диспергированы в сплошной фазе эмульсии. Результаты данных исследований показывают, что механизм перемещения капель в эмульсии во многом зависит от того, являются ли МНЧ гидрофобными или гидрофильными. Гидрофобные МНЧ адсорбируются на поверхности капель, что приводит к образованию агломератов МНЧ-капля. Такие подвижные агломераты МНЧ-капля движутся в эмульсии с существенно большими скоростями, чем пассивные капли. Гидрофильные МНЧ в магнитном поле также образуют кластеры, однако они не адсорбируются на поверхности капель. В этом случае механизм перемещения капель в эмульсии сводится к тому, что подвижные магнитные кластеры увлекают окружающую их жидкость, а вместе с ней и капли.

**В пятой главе** диссертации рассматриваются вопросы возникновения осциллирующего движения капель в эмульсии при протекании в ней химических реакций. В данной главе диссертации демонстрируется пример системы, в которой наблюдалось возвратно-поступательного движения капель масла в эмульсии масло-в-воде вблизи межфазной поверхности воздух-вода при условии, что источник вещества, влияющего на межфазное натяжение, не движется вместе с активным объектом, а неподвижен в пространстве. Результаты исследований показывают, что при выполнении ряда условий в такой системе возможно возникновение возвратно-поступательного движения капель масла вблизи межфазной поверхности воздух-вода, которое возникает в результате периодического обращения течения Марангони на межфазной поверхности воздух-вода. Здесь анализируется динамика и условия возникновения возвратно-поступательного движения капель, при вариации состава и численной плотности капель в эмульсии. Существенной особенностью рассматриваемой здесь активной эмульсии состоит в том, что сам факт существования возвратно-поступательного движения тесным образом связан с коллективным взаимодействием капель между собой и при уменьшении численной плотности капель в эмульсии ниже некоторого критического значения осцилляции вырождаются.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**Актуальность темы диссертации.** Существенный прогресс в области микро и нанотехнологии способствовал созданию и развитию микро и наномоторов, которые

способны выполнять различные комплексные задачи. Мир микро/наномоторов чрезвычайно разнообразен, а широкий исследовательский интерес к этим системам обусловлен большим многообразием прикладных задач, которые можно решать с их помощью, в таких областях, как медицина, экология, при создании сенсоров, для деградации антибиотиков и борьбы с бактериями. В настоящее время разработаны или находятся в состоянии исследований большое многообразие микро/наномоторов: Янус микро/наномоторы, спиралевидные микромоторы, трубчатые микромоторы, активные капли, биогибридные роботы, микромоторы на основе оксидов металлов. Движение микро и наномоторов может быть обусловлено различными факторами: воздействием света, протеканием химических реакций, воздействием акустических, электрических и магнитных полей. Микромоторы представляют собой один из видов активной материи. Благодаря тому, что активные системы находятся вдали от состояния равновесия, они демонстрируют большое многообразие нетривиальных режимов коллективной динамики. Исследование таких систем представляет значительный интерес как с фундаментальной точки зрения, так и прикладной.

**Научная новизна.** Наиболее важными новыми результатами, полученными автором диссертации, является

– Предложен новый тип сверхбыстрой активной эмульсии, где движение капель связано с возникновением течения Марангони на межфазной поверхности капли. Такой тип активных капель может использоваться для перемещения пассивных капель и интенсификации химических процессов на микроуровне.

– Впервые показано, что ахиральные активные капли могут самоорганизоваться в хиральные вихревые структуры.

– На основе активной эмульсии впервые получен коллоидный кристалл. Установлено, что скорость роста кристалла в зависимости от скорости движения капель имеет максимум, что во многом подобно кинетике кристаллизации молекулярной жидкости, подчиняющейся закону Вильсона-Френкеля.

– Впервые продемонстрировано, что для перемещения капель в эмульсии могут использоваться магнитные наночастицы, которые диспергированы в сплошной фазе эмульсии.

– Проанализирована природа возникновения возвратно-поступательного движения капель вблизи межфазной поверхности эмульсии при протекании в ней химических реакций. Установлено, что такой тип активного движения в эмульсии возможен лишь в том случае, когда плотность капель в эмульсии превышает некоторое критическое значение.

**Теоретическая значимость работы.** В диссертации на основе феноменологических представлений предложены критерии, определяющие различные режимы вихревого движения капель, разработана модель для описания кинетики роста коллоидного кристалла на основе активных капель.

**Практическая значимость работы.** Магнитные наночастицы, диспергированные в сплошной фазе эмульсии, могут быть использованы в системах связанных с доставкой лекарств. После завершения процедуры доставки лекарств магнитные наночастицы могут быть легко удалены из организма. Полученные в работе результаты по кристаллизации в активной материи могут быть использованы при создании новых материалов, когда процесс их формирования протекает в существенно неравновесных условиях.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на четырёх всероссийских научных конференциях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 6 научных работ в ведущих зарубежных рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

**Личный вклад автора.** Диссертация обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. Вклад автора в совместно написанные работы заключается в следующем. Все экспериментальные установки, используемые в работах, были

разработаны и созданы лично автором. Во всех экспериментах автор лично проводил экспериментальные исследования, включая отладку экспериментальных и диагностических комплексов, проведение экспериментов, обработку и анализ полученных результатов. Автор участвовал в постановке научных задач, совместных обсуждениях при получении теоретических результатов, а также при подготовке рукописей к публикации.

Оценивая диссертационную работу, можно отметить наиболее значимые научные результаты.

- Проведено исследование механизма движения активных капель в эмульсии при возникновении на их поверхности течения Марангони. Проанализировано движения смеси активных и пассивных капель в эмульсии.

- Проведён анализ коллективных явлений, возникающих при движении капель в эмульсии. Получены вихревые структуры в активной эмульсии. Показано влияния основных параметров активной эмульсии на условия зарождения вихревых структур и их устойчивость.

- Исследование процесса кристаллизации активных капель. Проведён анализ кинетики кристаллизации и условий кристаллизации в активной эмульсии.

- Проведено исследование проблемы перемещения капель в эмульсии с помощью магнитных наночастиц.

- Показан механизм движения капель в плотной эмульсии, при протекании в ней химической реакции между медью и аммиаком.

#### **Замечания.**

1. В диссертации не указаны общие выводы, которые обобщают содержание отдельных глав.

2. В диссертации не приводится оценка числа Вебера.

3. Несмотря на то, что диссертация ориентирована на анализ фундаментальных механизмов и процессов, желателен расширить перечень потенциальных областей, где могут применяться полученные результаты.

Отмеченные выше недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., ред. 11.09.2021 г., а ее автор Судаков В. С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация в полном объеме доложена на Семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (протокол №87/6-2022 от 12.09.2022). Материалы диссертации обсуждены, и на основании положительного решения Семинара составлен настоящий отзыв.

Научный руководитель

Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения  
Российской академии наук

академик РАН  
630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Лаврентьева, д. 1, +7 (383)330-70-50,  
[aleks@itp.nsc.ru](mailto:aleks@itp.nsc.ru)

Алексеев Сергей Владимирович



Отзыв составил заведующий лабораторией  
интенсификации процессов  
теплообмена Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
теплофизики им. С. С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук  
член-корреспондент РАН,  
профессор, д.ф.-м.н.  
630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Лаврентьева, д. 1, +7 (383) 316-51-37,  
[kabov@itp.nsc.ru](mailto:kabov@itp.nsc.ru)

Кабов Олег Александрович

Подписи Алексеенко С.В. и Кабова О.А. удостоверяю  
Ученый секретарь ИТ СО РАН  
к.ф.-м.н.

Макаров М.С.

