

На правах рукописи

Бушуева Кристина Андреевна

**ДЕФОРМАЦИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ
ФЕРРОЖИДКОСТИ НА ЖИДКОЙ ПОДЛОЖКЕ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Костарев Константин Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Смородин Борис Леонидович
(ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»)
доктор физико-математических наук,
профессор Иванова Алевтина Алексеевна,
(ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет»)

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН

Защита состоится 16 апреля 2015 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; тел: (342) 2378314; факс: (342) 2378487; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «____» февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

 Березин Игорь Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магнитные жидкости представляют собой устойчивые коллоидные растворы магнитных наночастиц в немагнитной жидкости-носителе. Благодаря своему составу магнитные жидкости обладают уникальным свойством изменять свою форму и перемещаться под действием магнитного поля. Такое поведение сразу же ввело магнитные жидкости в круг наиболее перспективных материалов второй половины XX века и предопределило их интенсивное изучение и широкое применение в различных областях науки и техники. В число наиболее популярных приложений магнитных жидкостей в области техники входят магнитожидкостные герметизаторы для изоляции опасных веществ от окружающей среды и уплотнители для устройств, эксплуатируемых в условиях вакуума, а также в контакте с агрессивными газами и жидкостями. Хорошо известны магнитожидкостные сепараторы для разделения шлама цветных металлов по плотности, тонкой очистки топлив и масел, локальной концентрации магнитных материалов в целях решения задач биомедицины, микрофлюидики и т.д.

Практическое применение магнитной жидкости предполагает оценку характера ее взаимодействия с различными жидкими и газообразными средами. Наиболее простой и перспективной системой для изучения такого взаимодействия является горизонтальный слой магнитной жидкости с верхней и нижней свободно деформируемыми границами – поверхностями контакта с немагнитными жидкостями либо газом. Поведение подобной системы под действием магнитного поля изучено мало. Одной из видимых причин ограниченного числа экспериментов явилось отсутствие прозрачной, химически нейтральной жидкости-подложки, несмешивающейся с магнитной жидкостью и имеющей по сравнению с ней бóльшую плотность. Ситуация изменилась после появления в свободном доступе группы фторорганических жидкостей, включая перфтороктан. Это обстоятельство и позволило экспериментально исследовать поведение слоя магнитной жидкости с двумя межфазными границами в магнитных полях различной ориентации. Были обнаружены распад слоя и возникновение новых равновесных пространственных форм, способных стать основой элементов для автоматизированных систем управления и контроля.

К настоящему времени широко известны три устойчивые формы, которые может принимать система двух несмешивающихся жидкостей в гравитационном поле – это капли, лежащие на свободной поверхности другой жидкости, либо под ее слоем на дне полости; двухслойная система жидкостей; два горизонтальных жидких слоя, один из которых имеет разрыв, примыкающий к стенке полости и, соответственно, частично повторяющий ее форму. Недавно описана еще одна устойчивая двухслойная конфигурация, в которой разрыв верхнего слоя не контактирует с границами полости, принимая в результате форму правильного круга. Разрыв имеет вид правильного круга, в пределах которого нижняя жидкость контактирует с газом. Отсутствие контакта границ подобного разрыва с твердой поверхностью делает его крайне чувствительным к воздействию со стороны магнитного поля и привлекательным объектом для экспериментального изучения, в частности, с целью создания «плоского» аналога газового пузырька в объеме непрозрачной магнитной жидкости. Экспериментальные методы изучения таких пузырьков, равно как и жидкостных включений, весьма ограничены, поэтому вопрос их развития является актуальным. При подтверждении гипотезы об аналогии поведения в магнитном поле пузырька воздуха и разрыва слоя магнитной жидкости значительно упрощается методика исследований, так как отпадает необходимость в сложной визуализации пузырька в непрозрачной среде для определения его положения и формы, также становится ненужным учет архимедовой силы.

Целью работы является экспериментальное изучение равновесных конфигураций, возникающих в результате совместного воздействия гравитационного и магнитного полей на горизонтальный слой феррожидкости на жидкой подложке и слой феррожидкости с устойчивым разрывом поверхности, а также сопоставление полученных результатов с известными теоретическими моделями с целью их верификации.

Научная новизна работы обусловлена изучением эволюции под действием магнитного поля двух относительно новых физических объектов – сплошного слоя феррожидкости конечной толщины на жидкой подложке и такого же слоя с устойчивым разрывом поверхности. В результате впервые описаны условия существования устойчивого разрыва слоя магнитной жидкости, продемонстрирована возможность его создания и закрытия с помощью магнитного поля. Подтверждена перспективность использования устойчивого разрыва для моделирования изменения формы включений в объеме феррожидкости под влиянием магнитного поля. Несомненно, новыми являются результаты изучения упорядоченных систем капель, возникающих при распаде слоя феррожидкости под действием магнитного поля.

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть применены при разработке датчиков и элементов установок, использующих изменение формы поверхности феррожидкости под действием внешнего магнитного поля. **Научное значение** работы заключается в верификации теоретических моделей, описывающих деформацию межфазной поверхности феррожидкости в магнитных полях различной ориентации, а также в использовании ее в качестве основы для решения ряда фундаментальных проблем физики жидких намагничивающихся сред и проблем устойчивости жидких слоев и пленок в полях внешних сил.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

- определение условий возникновения и существования устойчивых разрывов горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке;
- оценка влияния различных физико-химических свойств используемой пары жидкостей на критические параметры таких разрывов;
- изучение деформации устойчивого разрыва слоя феррожидкости на жидкой подложке под действием однородного магнитного поля, тангенциально направленного относительно поверхности слоя;
- сопоставление характера деформации пузырьков воздуха в объеме магнитной жидкости и устойчивого разрыва слоя феррожидкости в тангенциальном магнитном поле;
- создание устойчивого разрыва горизонтального слоя феррожидкости, расположенного на жидкой подложке, с помощью вертикального осесимметричного магнитного поля;
- исследование эволюции горизонтального слоя феррожидкости и упорядоченных капельных систем, возникающих в результате распада слоя под действием вертикального однородного магнитного поля;
- анализ зависимости размера и пространственного периода капель, образующих упорядоченную систему, от скорости нарастания напряженности магнитного поля;
- определение зависимости волнового числа капельных систем феррожидкости от напряженности магнитного поля; сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

Достоверность результатов исследований основывается на тщательной разработке методик проведения экспериментов, а также на сравнении полученных результатов с данными известных теоретических и экспериментальных работ.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих научных конференциях: XVI, XVII, XVIII Зимние школы по механике сплошных сред (Пермь, 2009, 2011, 2013 гг.); Fourth International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems For Ground And Space Applications (Novosibirsk, Russia, September 6–8, 2009 г.); II Всероссийская научная конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (Ставрополь, 14–17 сентября, 2009 г.); Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные переходы в сплошных средах» (Пермь, 4–5 декабря 2009 г.); XXXVIII Summer School “Advanced Problems in Mechanics” (Repino-St. Petersburg, Russia, July 1–5, 2010); 12th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF12) (Sendai, Japan, August 1–5, 2010); Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные переходы в сплошных средах» (Пермь, 26–27 ноября 2010 г.); Всероссийская научная школа молодых ученых «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил» (Москва, 30 ноября – 02 декабря 2010 г.); Euromech Colloquium 526 “Patterns in Soft Magnetic Matter” (Dresden, March 21–23, 2011 г.); IV и V Всероссийские конференции с участием зарубежных ученых (Бийск, 5–10 июля 2011 г., 29 июня – 4 июля 2014 г.); III Всероссийская научная конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (Ставрополь, 15–18 сентября 2011 г.); Российская конференция по магнитной гидродинамике (Пермь, 18–22 июня 2012 г.); Волны и вихри в сложных средах: Всероссийская научная школа молодых ученых (Москва, 3–5 декабря 2012 г.); 13th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-13) (New Delhi, India, January 7–11, 2013); Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2014 (Москва, 29 июня – 3 июля 2014); 16-я Международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Плес, 9–12 сентября 2014). Результаты исследований были представлены и обсуждены на Пермском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого (Пермский государственный университет, рук. проф. Д.В. Любимов, 2010, проф. Т.П. Любимова, 2013). Полностью диссертация обсуждалась на научном семинаре ИМСС УрО РАН (рук. акад. РАН В.П. Матвеевко).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 работ, включая 5 статей в журналах из списка ВАК и Web of Science [1–5], 11 статей в трудах конференций различного уровня и сборниках научных статей [6–16], 20 тезисов конференций. В этих работах экспериментальные исследования и обработка результатов выполнены диссертантом, обсуждение и анализ осуществлен совместно с научным руководителем диссертационной работы и соавторами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (125 наименований). Работа содержит 57 рисунков и 1 таблицу. Общий объем диссертации 109 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются актуальность и новизна исследования, сформулирована цель диссертации, представлено краткое содержание работы; перечислены полученные новые результаты, описано их практическое значение.

Первая глава диссертационной работы носит обзорный характер. В ней кратко описаны основные свойства магнитных жидкостей, актуальные задачи и современные методики изучения поведения магнитных жидкостей в полях внешних сил. Выполнен обзор работ, посвященных исследованию деформации капель и пузырьков воздуха в объеме феррожидкости. Изложены основные результаты изучения неустойчивости поверхности сплошного слоя магнитной жидкости в ортогональном магнитном поле.

Вторая глава диссертации посвящена экспериментальному изучению деформации разрыва горизонтального слоя феррожидкости, расположенного на жидкой подложке, под действием однородного тангенциально направленного магнитного поля [2].

В частности, в разделе 2.1 дано описание экспериментальной установки и методики измерений, определены условия возникновения и существования устойчивого разрыва слоя феррожидкости, исследовано влияние различных физико-химических свойств используемой пары жидкостей на критические параметры разрыва.

В качестве жидкости верхнего слоя в опытах использована магнитная жидкость, представлявшая собой коллоидный раствор наночастиц магнетита в керосине (далее феррожидкость или ФЖ), для подложки выбран перфтороктан C_8F_{18} . Для выяснения особенностей формирования устойчивых разрывов в слое феррожидкости выполнены опыты с керосином и дистиллированной водой, для которой в качестве подложки наряду с перфтороктаном использован четыреххлористый углерод CCl_4 .

В ходе опыта в кювете создавалась двухслойная система жидкостей (рис. 1, а), верхний слой которой затем разрывался с помощью кратковременной деформации его свободной поверхности узконаправленным потоком воздуха из иглы медицинского шприца. Исходная толщина разрываемого слоя 3 рассчитывалась по массе жидкости $h = m/(\rho S)$, где m – масса жидкости, ρ – ее плотность, $S = \pi D^2/4$ – площадь кюветы.

С целью выявления возможной специфики феррожидкости – как жидкости верхнего слоя – были получены зависимости диаметра d возникавшего разрыва от толщины исходного слоя h для керосина, феррожидкости и воды на подложке из C_8F_{18} (соответственно, кривые 1–3 на рис. 2), а также для воды на CCl_4 (кривая 4). Сравнение кривых показывает, что поведение разрыва слоя феррожидкости является типичным для двухслойных систем, у которых верхняя жидкость имеет большее поверхностное натяжение, чем нижняя. Так, с ростом толщины слоя диаметр разрыва феррожидкости монотонно уменьшается вплоть до схлопывания последнего пороговым образом при $h = h_{\max}$ (и соответствующем $d = d_{\min}$).

В разделе 2.2 изложены результаты изучения деформации горизонтального слоя феррожидкости с разрывом под действием тангенциально направленного магнитного поля.

В эксперименте использован ряд феррожидкостей, имевших равную плотность, но различную начальную магнитную восприимчивость χ_0 (ФЖ 1–3 с соответственно $\chi_0 = 5.2$; 2.0; 7.0). Кювета с двухслойной системой жидкостей 1 (рис. 3) помещалась

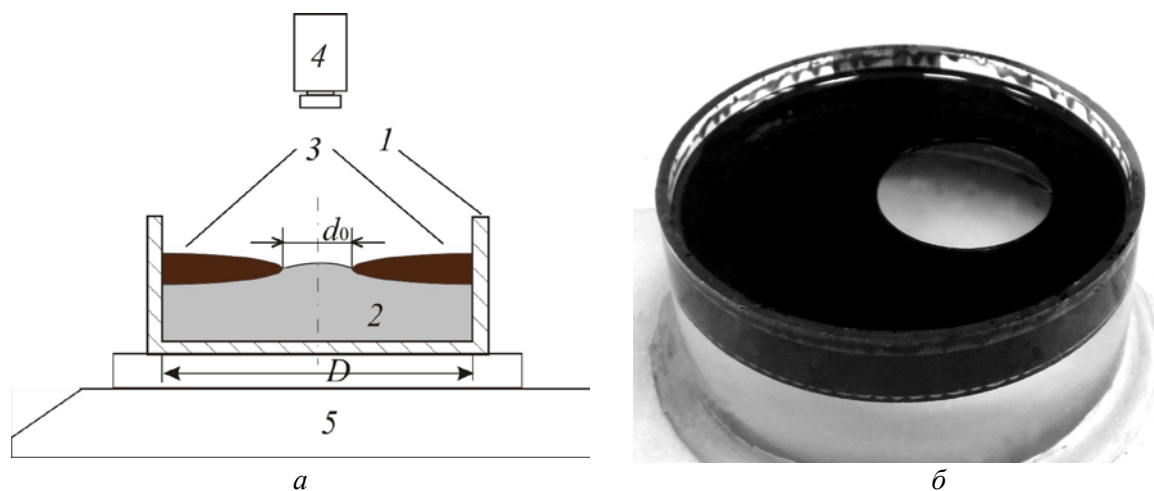


Рис. 1. Экспериментальная установка (а) и кювета (б)

1 – кювета цилиндрической формы, 2 – слой перфтороктана, 3 – слой феррожидкости с разрывом, 4 – видеокамера; 5 – электронные весы

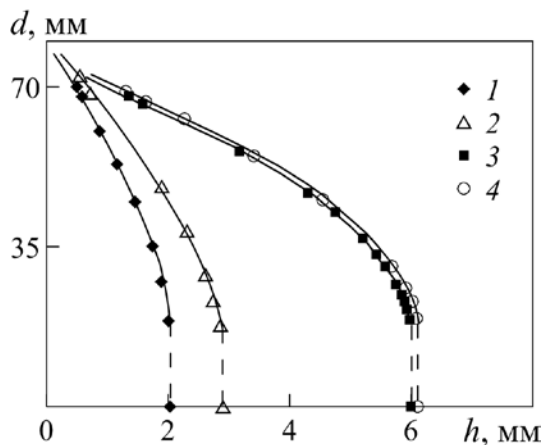


Рис. 2. Зависимость диаметра разрыва от начальной толщины верхнего слоя жидкости для различных пар жидкостей: керосин – C_8F_{18} (1), ФЖ 1 – C_8F_{18} (2), H_2O – C_8F_{18} (3) и H_2O – CCl_4 (4); внутренний диаметр кюветы $D = 75$ мм

ходило случайным образом либо вдоль поля, либо в противоположном направлении (однако в обоих случаях – в направлении снижения его напряженности H). Дальнейшее увеличение напряженности поля приводило к изменению формы разрыва с эллиптической на каплевидную вследствие его подхода к стенке полости (рис. 4, в) и последующему схлопыванию (при достаточно малых начальных диаметрах разрыва). Если разрыв имел большой начальный размер (рис. 4, з), то он, вытягиваясь, упирался в стенки кюветы (рис. 4, д). Свободные границы становились при этом почти параллельными направлению поля и придавали разрыву вид трапеции (рис. 4, е) [1].

Для характеристики формы разрыва использовался его эксцентриситет $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$, где a и b длины большой и малой осей разрыва, измеренных соответственно вдоль и поперек направления магнитного поля [7]. Результаты измерений показали, что эксцентриситет слабо зависит от начального диаметра разрыва, но достаточно сильно от напряженности приложенного поля вплоть до $H \sim 4$ кА/м (рис. 5). При этой напряженности завершается перестройка формы разрыва, эксцентриситет приближается к максимальному значению ($\sim 0.8 \div 0.9$) и его дальнейшее увеличение происходит очень медленно. Вертикальными штрихпунктирными линиями на рисунке разграничены области различных форм разрыва: участок $0 < H < H_1$ соответствует

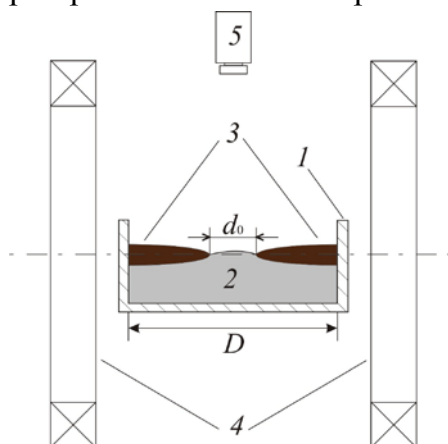


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – кювета; 2 – перфтороктан; 3 – феррожидкость; 4 – катушки Гельмгольца; 5 – видеокамера

на горизонтальную площадку, которая располагалась между катушками Гельмгольца 4 вдоль их оси симметрии. Изображение кюветы регистрировалось камерой 5, установленной над системой катушек.

Включение тангенциального магнитного поля приводило к возникновению объемной пондеромоторной силы, обусловленной локальным изменением магнитного поля в феррожидкости в окрестности устойчивого разрыва, который играл роль немагнитной полости. Действие этой силы вызвало изменение формы разрыва слоя с правильного круга на эллипс, вытянутый вдоль поля, с его одновременным смещением от центра к периферии кюветы (рис. 4, а и б). Смещение проис-

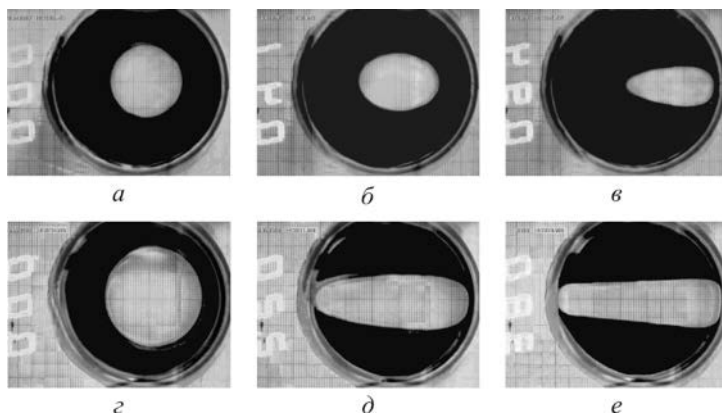


Рис. 4. Изменение формы разрыва слоя феррожидкости в тангенциальном магнитном поле. Напряженность поля H , кА/м: 0 (а), 0.9 (б), 2.0 (в), 0 (з), 5.0 (д), 8.0 (е); $D = 59.4$ мм

разрыву в виде эллипса; участок $H_I < H < H_{II}$ – плавному переходу разрыва от эллипса к "капле" или "трапеции"; участок $H_{II} < H < H_{III}$ – трапециевидной форме разрыва.

Относительная площадь устойчивого разрыва линейно зависит от толщины слоя феррожидкости за исключением области вблизи $h_{\max}$. При включении тангенциального магнитного поля эта зависимость сохраняет свой вид, несмотря на изменение формы разрыва (рис. 6). Так как феррожидкость является суперпарамагнетиком, то ее объем выстраивается вдоль магнитного поля, уменьшая площадь своего сечения в этом направлении. Следствием такого перераспределения в нашем случае является снижение толщины слоя за счет заполнения разрыва феррожидкостью при увеличении напряженности магнитного поля, что ведет к уменьшению площади разрыва. Кроме того, действие магнитного поля, вызывающего уменьшение толщины слоя феррожидкости, эквивалентно увеличению уровня гравитации, играющей роль дестабилизирующего фактора в устойчивости стационарного разрыва. Соответственно, с ростом напряженности поля разрыв должен смыкаться при меньших $h_{\max}$ и больших $d_{\min}$.

В диссертации Самонова В.М. [Самонов В.Е. Математическое моделирование движения тонкого слоя жидкости под действием поверхностных сил: дисс. канд. физ.-мат. наук. – Ставрополь, 2003. – 143 с.] для описания изменения формы разрыва тонкого бесконечного слоя феррожидкости на твердой подложке под действием тангенциально направленного магнитного поля предложено уравнение зависимости расстояния между фокусами разрыва в форме эллипса $c = 0.5\sqrt{a^2 - b^2}$ от напряженности поля H . Уравнение написано в предположении постоянства площади разрыва для случая слабых магнитных полей ($H \leq 1$ кА/м), при которых магнитная восприимчивость χ не зависит от напряженности поля. Результаты численного решения уравнения приведены на рис. 7 наряду с данными эксперимента, полученными для деформации разрыва слоя на жидкой подложке. Их сопоставление становится возможным благодаря совпадению условий численного и физического эксперимента. В частности, за счет малых поверхностных натяжений феррожидкости и перфтороктана, а также большого перепада их плотностей, слой феррожидкости оказывается тонким, а жидкая подложка в разрыве – почти недеформированной. Несмотря на сходный характер условий, из рис. 7 хорошо видно, что количественное сопоставление данных возможно только в области малых ($H \sim 2$ кА/м) напряженностей поля, при которых разрыв сохраняет форму эллипса, а изменение его относительной площади невелико.

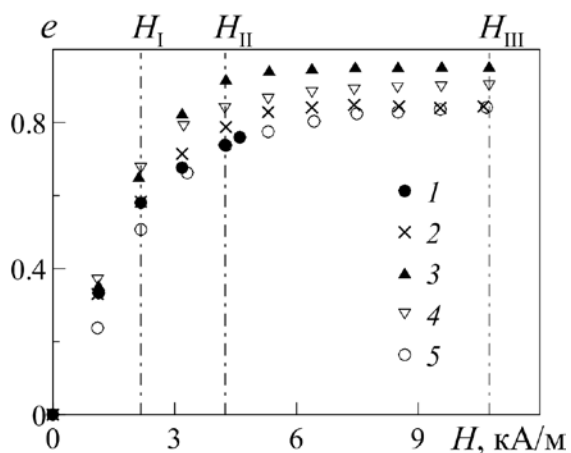


Рис. 5. Зависимость эксцентриситета разрыва слоя от напряженности магнитного поля для кюветы диаметром $D = 59.4$ мм. Начальный диаметр разрыва слоя d_0 , мм: 21.2 (1), 28.8 (2), 38.0 (3), 46.3 (4), 51.3 (5)

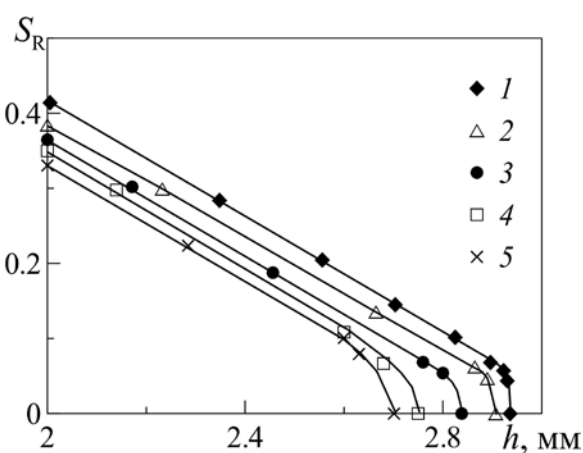


Рис. 6. Зависимость относительной площади разрыва от толщины слоя при напряженности поля H , кА/м: 0 (1), 3.2 (2), 6.4 (3), 8.5 (4), 10.6 (5).

В разделе 2.3 выполнен сравнительный анализ деформации газовых пузырьков в объеме феррожидкости и устойчивых разрывов ее горизонтального слоя под действием магнитного поля.

Для исследования деформации пузырьков воздуха в объеме феррожидкости использовалась кювета в виде зазора 1 толщиной 1.2 мм между двумя горизонтально расположенными стеклянными плоскопараллельными пластинками размером 60×60 мм (рис. 8). Зазор заполнялся феррожидкостью 3 и в его середину с помощью медицинского шприца вводился пузырек воздуха 2. В зависимости от своего размера пузырек принимал форму правильной сферы либо сплюсненного по вертикали сфероида. Затем кювета устанавливалась на площадку между катушками Гельмгольца и освещалась снизу рассеянным пучком света для визуализации границ пузырька.

Исследована деформация пузырьков воздуха с начальным горизонтальным диаметром от 2 до 15 мм. Включение магнитного поля вызывало изменение их формы со сферической на эллипсоидальную – вытянутую вдоль поля. Изменение формы пузырька является результатом действия внешнего градиента давления, индуцированного в феррожидкости искажением магнитного поля из-за появления немагнитного включения.

На рис. 9 приведено две серии кадров, описывающих деформацию пузырька воздуха (1) и устойчивого разрыва (2) под действием продольного магнитного поля. Хорошо видно, что изменение формы газового включения как со сферы на эллипсоид, так и с правильного круга на эллипс происходит постепенно с увеличением напряженности приложенного магнитного поля.

Измерения показали, что изменение эксцентриситета пузырьков воздуха с ростом напряженности магнитного поля происходит аналогично случаю деформации разрывов слоя при использовании одной и той же феррожидкости в кюветах различного диаметра (рис. 10).

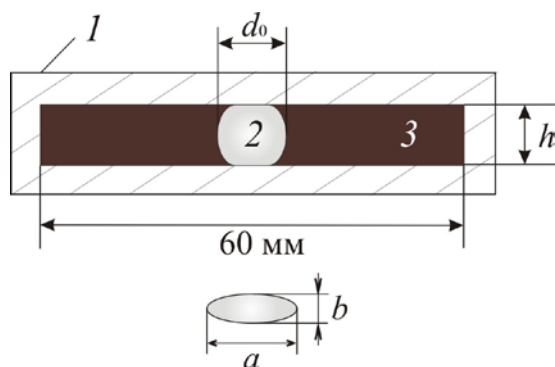


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: 1 – стеклянная кювета; 2 – пузырек воздуха с начальным диаметром d_0 , 3 – слой феррожидкости толщиной $h = 1.2$ мм

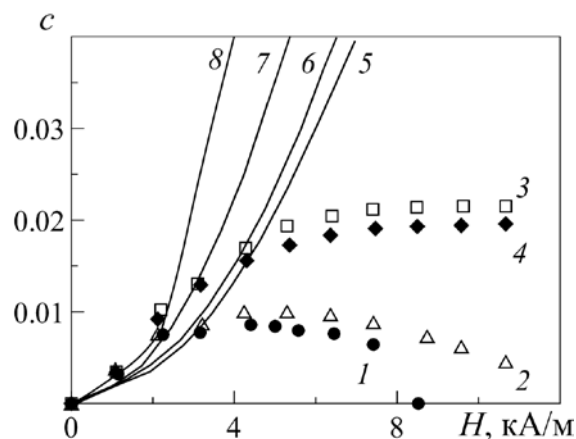


Рис. 7. Зависимость расстояния между фокусами деформированного разрыва от напряженности внешнего магнитного поля при $D = 42.8$ мм и начальных диаметрах разрыва d_0 , мм: 19.5 (1, 5), 21.0 (2, 6), 25.4 (3, 7), 33.9 (4, 8). 1–4 – опыты; 5–8 – соответствующий расчет

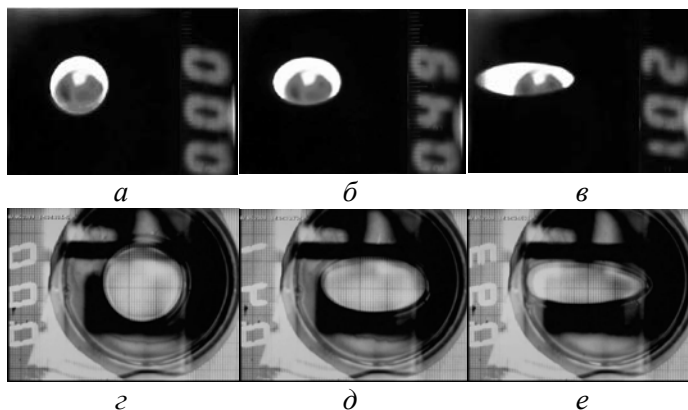


Рис. 9. Деформация пузырька воздуха (а–в) и устойчивого разрыва слоя (г–е) под действием однородного продольного магнитного поля напряженностью H , кА/м: 0 (а); 1.0 (б); 2.2 (в); 0 (г); 0.9 (д); 2.0 (е)

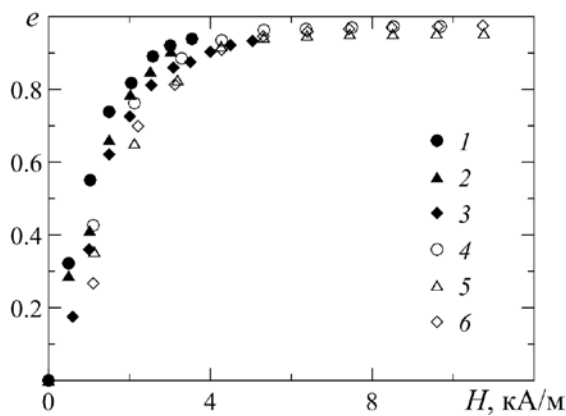


Рис. 10. Эксцентриситет пузырьков воздуха в ФЖ 2 и устойчивых разрывов слоя той же жидкости в зависимости от напряженности магнитного поля. Начальный диаметр пузырька воздуха d_0 , мм: 13.0 (1); 9.3 (2); 6.4 (3). Начальный диаметр разрыва d_0 , мм: 52.8 (4); 38.0 (5); 25.4 (6). Соответствующий диаметр кювет D , мм: 89.0 (4); 59.4 (5); 42.8 (6)

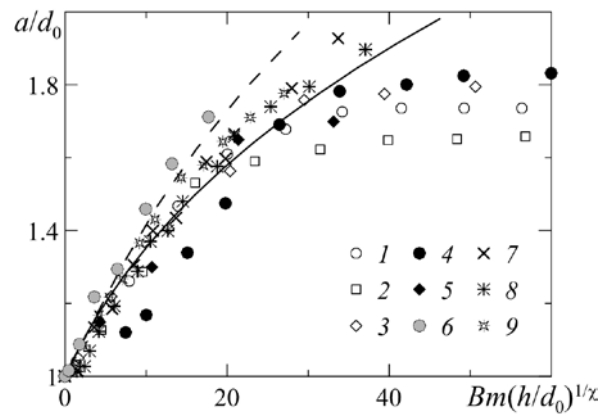


Рис. 11. Относительное удлинение пузырьков воздуха и разрывов слоя феррожидкости от магнитного числа Бонда $Bm(h/d_0)^{1/2}$. Начальный диаметр разрыва слоя ФЖ 2 d_0 , мм: 25.4 (1); 38.0 (2); 52.8 (3); ФЖ 1 – d_0 , мм: 45.0 (4); 51.5 (5). Начальный диаметр пузырька воздуха в слое ФЖ 2 d_0 , мм: 7.8 (6); ФЖ 1 d_0 , мм: 12.4 (7); 9.6 (8); 8.0 (9). Штриховая и сплошная кривые – соотношения (1) и (2)

Для характеристики действия магнитного поля в [Bashtovoi V., Pogiritskaya S., Reks A. Dynamics of deformation of magnetic fluid at drops in a homogeneous longitudinal magnetic field // JMMM. – 1999. – Vol. 201, № 1–3. – P. 300–302.] предлагается использовать зависимость формы газового включения от величины магнитного числа Бонда $Bm = \mu_0 M^2 d_0 / \sigma$, представляющего собой отношение скачка магнитного давления к давлению, создаваемому поверхностным натяжением σ (μ_0 – магнитная постоянная, M – намагниченность феррожидкости). В частности, для описания относительного удлинения немагнитных включений в магнитную жидкость предложено эмпирическое соотношение $a/d_0 = \left[1 + 0.15 Bm(h/d_0)^{0.6}\right]^{0.4}$ (1), в котором коэффициент h/d_0 введен для учета исходной деформации включения по вертикали.

Наиболее точно результаты нашего эксперимента описывает безразмерное соотношение вида $a/d_0 = \left[1 + 0.15 Bm(h/d_0)^{1/\chi}\right]^{1/\chi+1}$ (2), где d_0 – начальный диаметр включений. На рис. 11 представлена зависимость относительного удлинения пузырьков воздуха и разрывов слоя феррожидкости на жидкой подложке от произведения $Bm(h/d_0)^{1/\chi}$ для феррожидкостей с различной магнитной восприимчивостью.

Предложенная аппроксимация удовлетворительно описывает изменение формы как пузырьков, так и разрывов в продольном магнитном поле для феррожидкости с относительно высокой магнитной восприимчивостью, а также деформацию разрывов феррожидкости с малой χ [4]. Заметное отклонение наблюдается лишь для разрывов в области полей с $Bm(h/d_0)^{1/\chi} > 35$, что обусловлено развитием их асимметричной деформации в результате касания стенки кюветы. В свою очередь, влияние магнитного поля на форму пузырька в феррожидкости с малой магнитной восприимчивостью хорошо описывается соотношением (1).

Третья глава посвящена экспериментальному изучению деформации горизонтального слоя феррожидкости, расположенного на жидкой подложке, при включении вертикального осесимметричного магнитного поля.

Раздел 3.1. Как показано выше, устойчивый разрыв горизонтального слоя феррожидкости может быть деформирован до полного схлопывания под действием однородного продольного поля. Локальное уменьшение напряженности вертикального магнитного поля, напротив, должно приводить к обратному процессу – возникновению разрыва слоя феррожидкости. Для подтверждения гипотезы рассмотрен случай горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке в магнитном поле с локальным минимумом напряженности.

В разделе 3.2 описаны экспериментальная кювета и методика проведения эксперимента. В ходе опыта кювета цилиндрической формы устанавливалась внутри горизонтально расположенной кольцевой катушки с медным проводом, по которому затем пропусклся электрический ток (рис. 12). В качестве основной характеристики поля использовалась величина его напряженности H в центре катушки.

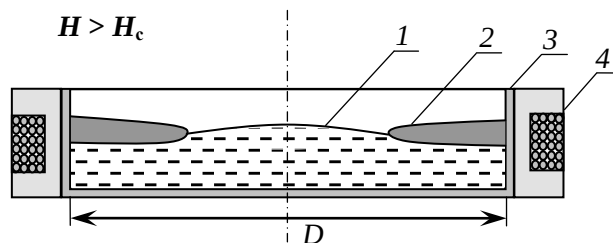


Рис. 12. Схема экспериментальной установки: 1 – перфтороктан; 2 – феррожидкость; 3 – кювета; 4 – катушка

В разделе 3.3 описан процесс формирования разрыва слоя феррожидкости на жидкой подложке. Включение неоднородного осесимметричного магнитного поля кольцевого тока, перпендикулярного поверхности слоя, вызывает перераспределение феррожидкости в кювете. Толщина слоя уменьшается в центре кюветы (в области минимальной напряженности поля) и увеличивается около ее боковой стенки, где напряженность выше. При достижении критической напряженности поля H_c пороговым образом возникает разрыв слоя (рис. 13, штриховые вертикальные линии со стрелкой). Дальнейшее поведение разрыва определяется характером изменения напряженности поля: ее рост приводит к увеличению диаметра созданного разрыва, а снижение – к его уменьшению с последующим закрытием (рис. 13, кривые 1 и 2) [3]. Возникший разрыв сохраняется после снятия поля (рис. 13, кривые 3 и 4), если исходная толщина слоя феррожидкости не превышает (85–90) % от максимальной толщины слоя $h_{\max}$ с устойчивым разрывом поверхности в отсутствие магнитного поля.

Критическая напряженность поля H_c линейно зависит от толщины исходного слоя феррожидкости (рис. 14). Отметим, что в кювете меньшего диаметра разрыв слоя той

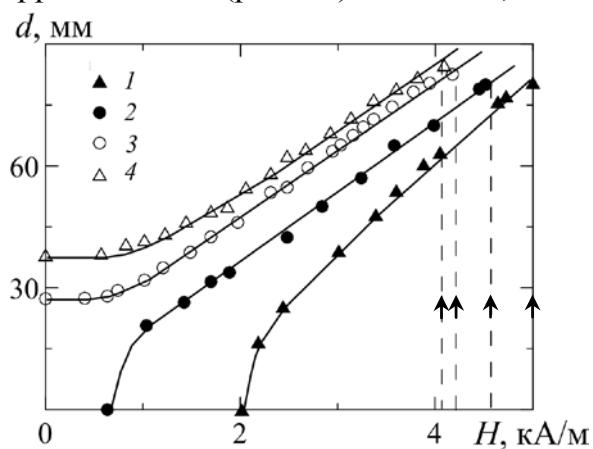


Рис. 13. Зависимость диаметра возникающего разрыва в кювете $D = 92.6$ мм от величины напряженности приложенного магнитного поля. Толщина разрываемого слоя h , мм: 3.5 (1), 2.7 (2), 2.6 (3), 2.4 (4)

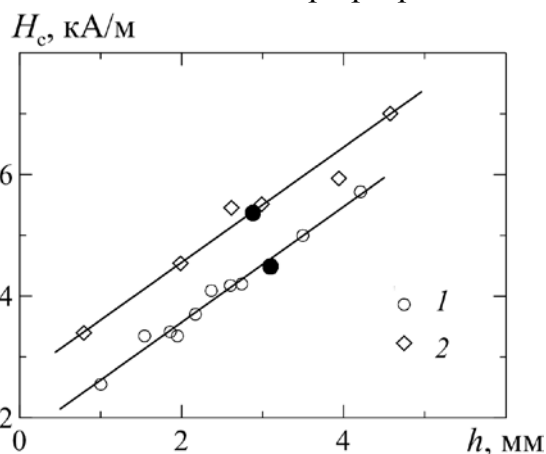


Рис. 14. Зависимость критической напряженности магнитного поля от исходной толщины слоя феррожидкости. Диаметр кюветы D , мм: 92.6 (1), 59.4 (2). Выделенные символы соответствуют слоям с $h = h_{\max}$

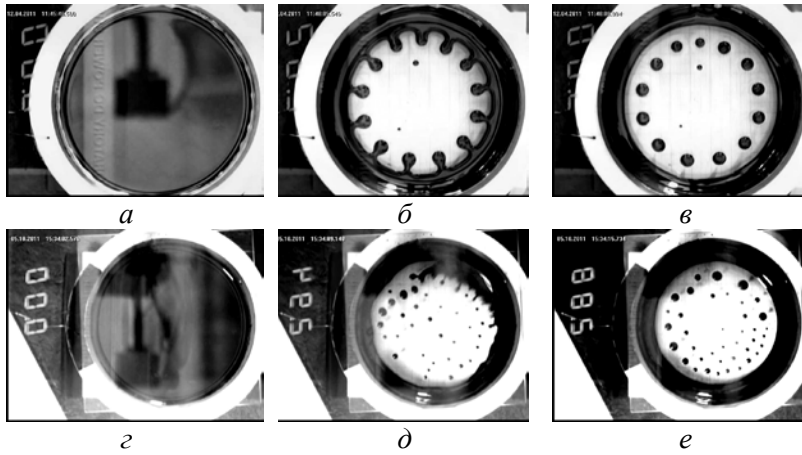


Рис. 15. Разрыв слоя феррожидкости толщиной $h = 5.0$ мм в кювете $D_1 = 92.6$ мм. Напряженность поля H , кА/м: 0 (а), 5.5 (б), 6.4 (в), 0 (г), 6.2 (д–е). Время с начала опыта t , с: 0 (а), 135 (б), 138 (в), 0 (г), 8 (д), 13 (е)

вдоль нее упорядоченной системы капель (рис. 15). Исследована зависимость количества возникающих капель от соотношения вязкого времени слоя феррожидкости $\tau = hD/4\nu$ и времени t^* формирования капельной структуры, определяемого интенсивностью изменения поля. В частности показано, что при значениях $t^* \geq \tau$ количество капель уменьшается, а их средний диаметр увеличивается.

На основе анализа результатов, описанных в главах 2 и 3, высказано предположение о возможности использования вертикального осесимметричного поля в паре с тангенциальным однородным полем для создания и последующего закрытия устойчивого разрыва слоя в рамках разработки датчиков магнитного поля и оптических элементов на основе феррожидкости.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию формирования упорядоченных систем капель, возникающих в результате распада горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке под действием однородного вертикального магнитного поля.

В разделе 4.1 описана экспериментальная установка и методика выполнения опытов. В отличие от опытов раздела 2.2, катушки Гельмгольца располагались горизонтально (для создания вертикально направленного магнитного поля).

В разделе 4.2 описан процесс распада сплошного слоя феррожидкости на систему упорядоченных капель. Относительно небольшая толщина слоя и отсутствие специального демпфирования экспериментальной установки создают условия для возникновения возмущений свободной и межфазной поверхности феррожидкости в виде гравитационно-капиллярных волн. Однородное вертикальное магнитное поле усиливает эти

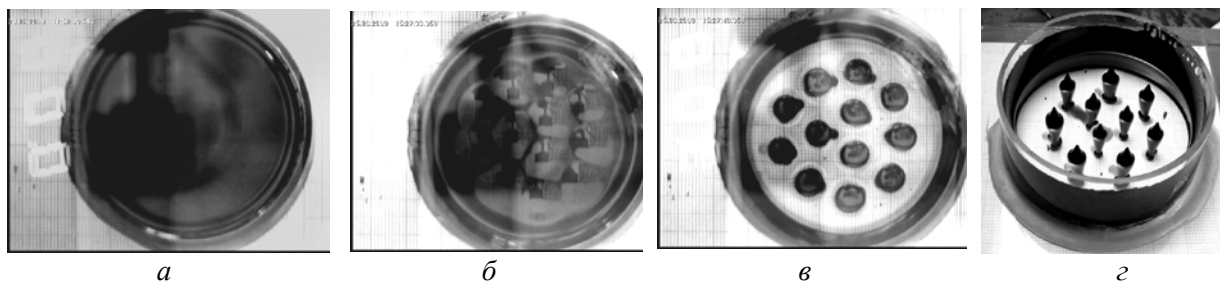


Рис. 16. Развитие деформации слоя под действием однородного вертикального магнитного поля. Толщина слоя $h = 2.8$ мм. Напряженность поля H , кА/м: 0 (а), 6.4 (б), 6.5 (в), 9.0 (г). Диаметр кюветы $D = 59.4$ мм

же толщины происходит при большей напряженности поля. Причиной этого служит уменьшение неоднородности магнитного поля вдоль радиуса малой кюветы.

Установлено, что увеличение начальной толщины слоя феррожидкости, равно как и напряженности поля, приводит к развитию неустойчивости границы возникающего разрыва с последующим формированием

возмущения и приводит к формированию на свободной поверхности слоя феррожидкости рельефа в виде пента- либо гексагональных ячеек (рис. 16). Подобный рельеф, но только с другим пространственным периодом, возникает и на границе с перфтороктаном. В результате, когда суммарная амплитуда возмущений обеих поверхностей слоя превышает его толщину, происходит разрыв слоя при критическом значении напряженности H_c магнитного поля. Критическая напряженность поля H_c медленно возрастает с исходной толщиной слоя (рис. 17). При этом сильное влияние на величину H_c оказывает величина магнитной восприимчивости феррожидкости (кривые 1 и 3), в отличие от диаметра кюветы (кривые 1 и 2).

Количество и величина возникающих капель определяется спектром гравитационно-капиллярных волн, существующих на свободной и межфазной поверхностях слоя феррожидкости во время нарастания напряженности магнитного поля до критического значения (рис. 18). Анализ распределения количества капель n по их диаметру d показывает, что в системе сохраняются только длинноволновые возмущения (рис. 18, а), если увеличение напряженности магнитного поля от нуля до H_c происходит за время t^* , много большее вязкого времени τ для слоя феррожидкости ($\tau = hD/4\nu$).

При $t^* < \tau$, когда сила тока сразу достигает величины, необходимой для создания магнитного поля, разрушающего слой, характер распределения капель по размерам изменяется (рис. 18, б). По виду распределения можно сказать, что в данном случае поле успевает усилить более широкий спектр возмущений. При этом в обоих рассмотренных случаях преобладают капли среднего размера.

Также было продемонстрировано влияние топологии исходного слоя феррожидкости на жидкой подложке (сплошной слой или слой с разрывом различного диаметра) на формирование системы капель в однородном вертикальном магнитном поле.

В разделе 4.3 проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с существующими на сегодняшний день теоретическими моделями неустойчивости поверхности слоя феррожидкости.

Для нахождения формы, принимаемой межфазными поверхностями феррожидкости под

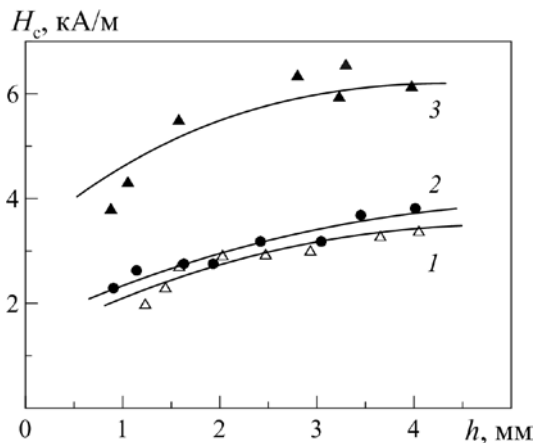


Рис. 17. Критическая напряженность магнитного поля в зависимости от толщины слоя феррожидкости с различной начальной магнитной восприимчивостью χ : 2.0 (3), 7.0 (1, 2). D , мм: 59.4 (1, 3), 89.0 (2)

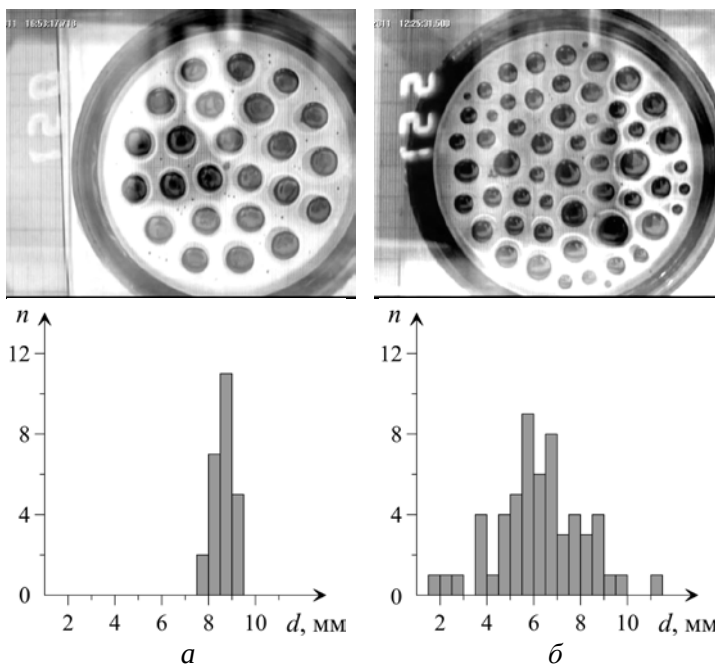


Рис. 18. Распределение количества капель по их диаметру при разрыве слоя $h = 2.4$ мм феррожидкости магнитным полем $H_c = 3.2$ кА/м. Диаметр кюветы $D_2 = 89.0$ мм. а) $t^* > \tau$ ($t^* = 93$ с, $\tau = 13$ с); б) $t^* < \tau$ ($t^* = 1$ с, $\tau = 13$ с)

действием постоянного вертикального магнитного поля, в работе Раннахера и Энгеля [Rannacher D., Engel A. Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69. – Iss. 6. – P. 066306] использовалось условие минимума полной энергии E , состоящей из гидростатической, поверхностной и магнитной компонент. Распад слоя происходит в момент, когда его полная энергия, являясь функцией напряженности магнитного поля H и волнового вектора возмущений поверхности k , становится равной нулю $E = 0$. Получаемая в этом случае нейтральная кривая $H^*(k)$ нами построена по выкладкам, представленным в работе Раннахера и Энгеля, для разрываемого слоя феррожидкости толщиной $h = 2.9$ мм, расположенного в экспериментальной кювете диаметром $D = 89$ мм (рис. 19). Для выбора единиц длины использовано волновое число $k_c = \sqrt{\rho g / \sigma}$, напряженности поля – $H_c = \sqrt{(1 + \chi)(2 + \chi)2\sqrt{\rho g \sigma} / \chi^2 \mu_0}$.

Как видно из рис. 19, полученные экспериментальные данные для критических величин напряженности магнитного поля и пространственного периода неустойчивости поверхности феррожидкости хорошо описываются теоретической моделью распада слоя магнитной жидкости на капли, разработанной Раннахером и Энгелем для «магнитожидкостных сэндвич-структур».

Обобщенные экспериментальные данные представлены на рис. 20 в виде зависимости безразмерной критической напряженности поля H_c^* , при которой возникает разрыв, от толщины разрываемого слоя h^* . Величина отклонения $H_c^*(h)$ от среднего значения (сплошная линия) при одинаковой толщине слоя достигает 10 % для феррожидкостей с различной магнитной восприимчивостью и разных кювет. Это отклонение объясняется большим временным интервалом между сериями опытов и, связанной с ним небольшой вариацией температуры окружающей среды и степени смачивания стенок кюветы (за счет усовершенствования процесса очистки кювет).

В **заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

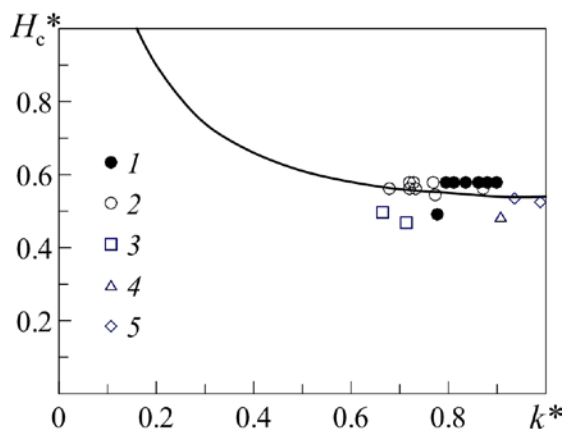


Рис. 19. Напряженность магнитного поля H_c^* в зависимости от волнового числа k для слоя феррожидкости толщиной $h = 2.9$ мм при $E = 0$. Сплошная линия – теория, точки – эксперимент: $\chi_0 = 7.0 - t^* > \tau$, $D = 89.0$ мм (1), $t^* < \tau$, $D = 89.0$ мм (2); $t^* > \tau$, $D = 59.4$ мм (3); $\chi_0 = 5.2 - t^* > \tau$, $D = 59.4$ мм (4); $\chi_0 = 2.0 - t^* > \tau$, $D = 59.4$ мм (5)

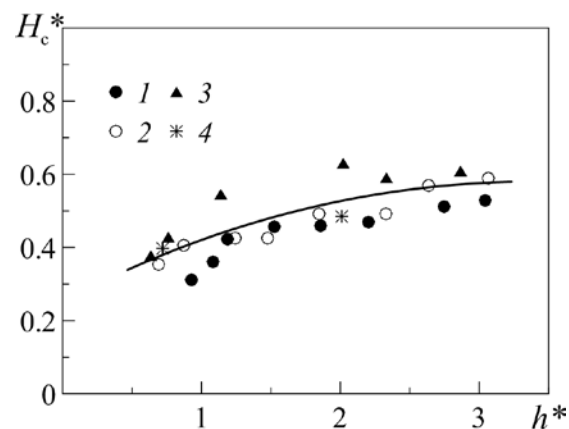


Рис. 20. Критическая напряженность магнитного поля H_c^* в зависимости от толщины слоя феррожидкости h^* в безразмерном виде. Начальная магнитная восприимчивость χ_0 : 2.0 (3), 7.0 (1, 2), 5.2 (4). Диаметр кювет D , мм: 59.4 (1, 3, 4), 89.0 (2)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы экспериментально исследована эволюция расположенного на жидкой подложке горизонтального слоя феррожидкости – как сплошного, так с устойчивым разрывом поверхности – под действием магнитных полей различной пространственной ориентации. В частности:

- Экспериментально определены условия возникновения и существования устойчивого разрыва горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке в отсутствие магнитного поля.
- Показано, что для создания подобного разрыва можно использовать осесимметричное вертикальное магнитное поле, а для закрытия – однородное тангенциально направленное. Возникновение разрыва происходит при достижении напряженностью поля определенного критического значения, зависящего от магнитной восприимчивости феррожидкости, толщины слоя и диаметра кюветы.
- Экспериментально исследовано влияние тангенциального поля на форму разрыва горизонтального слоя феррожидкости. Показано, что включение поля приводит к изменению формы разрыва с правильного круга на эллипс, вытянутый вдоль поля. С увеличением интенсивности поля эксцентриситет разрыва быстро возрастает, а его площадь медленно сокращается. Расстояние между фокусами разрыва – как функция напряженности поля – описывается степенной зависимостью, близкой к соответствующей зависимости для пузырька воздуха в объеме феррожидкости.
- Включение однородного вертикально направленного магнитного поля вызывает распад сплошного горизонтального слоя феррожидкости на упорядоченную систему капель. Показано, что количество капель, их распределение по размеру и пространственному периоду определяются скоростью нарастания напряженности поля.
- Вид зависимости критической напряженности магнитного поля от волнового числа возникающей системы капель подтверждает ранее полученные результаты теоретического исследования Раннахера и Энгеля, описавших развитие неустойчивости Розенцвейга в слое феррожидкости с двумя межфазными границами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. **Bushueva, C.A. Deformation of a layer of ferrofluid, lying on a liquid substrate, subjected to the action of the magnetic field / C.A. Bushueva, K.G. Kostarev, A.V. Lebedev // *Physics Procedia*. – 2010. – Vol. 9. – P. 205–209.**
2. **Бушуева, К.А. Поведение слоя феррожидкости с устойчивым разрывом поверхности под действием тангенциально направленного магнитного поля / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев // *Изв. РАН. МЖГ*. – 2011. – № 5. – С. 42–51.**
3. **Bushueva, C.A. Evolution of a ferrofluid floating layer under the influence of an inhomogeneous magnetic field / C.A. Bushueva, K.G. Kostarev, A.V. Lebedev // *Magnetohydrodynamics*. – 2011. – Vol. 47. – No. 2. – P. 207–212.**
4. **Bushueva, C.A. Deformation of gas bubbles and stable ruptures in a horizontal layer of ferrofluid under the action of the magnetic field / C.A. Bushueva, K.G. Kostarev // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49. – No. 1. – P. 3–10.**
5. **Bushueva, C.A. Drop structures formed by ferrofluid in the uniform magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49. – No. 2. – P. 191–195.**
6. **Бушуева, К.А. Стационарный разрыв слоя феррожидкости на жидкой подложке / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев, А.В. Шмыров // *Механика сплошных сред как основа современных технологий. Труды XVI Зимней школы по механике сплошных сред*. Пермь – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 4 с.**

7. Бушуева, К.А. Влияние продольного магнитного поля на стационарный разрыв горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев, А.В. Лебедев // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем. – Ставрополь, 2009. – С. 218–223.
8. Бушуева, К.А. Устойчивый разрыв горизонтального слоя феррожидкости, расположенного на жидкой подложке / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев // Конвективные течения...(вып.4), ПГПУ, Пермь, 2009, с. 187–204.
9. Бушуева, К.А. Поведение тонкого слоя феррожидкости с устойчивым разрывом поверхности в продольном магнитном поле // Неравновесные переходы в сплошных средах. Материалы всероссийской конференции молодых ученых. Пермь, 4–5 декабря 2009, с. 56–59.
10. Bushueva, C.A. Dynamics of a ferrofluid layer with a stable rupture of the surface / C.A. Bushueva, K.G. Kostarev // Proceedings of the XXXVIII Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanics (APM) 2010”, St. Petersburg (Repino), Russia, July 1–5, 2010, pp. 98–104.
11. Бушуева, К.А. Деформация устойчивого разрыва слоя феррожидкости на жидкой подложке под действием магнитных полей различной ориентации // Неравновесные переходы в сплошных средах. Материалы всероссийской конференции молодых ученых. Пермь, 26–27 ноября 2010, с. 59–66.
12. Бушуева, К.А. Деформация слоя феррожидкости на жидкой подложке под действием магнитного поля / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев, А.В. Лебедев // Труды XVII Зимней школы по механике сплошных сред (Электронный ресурс) – Пермь-Екатеринбург, 2011. Электрон. оптич. диск. (CD). 10 с.
13. Бушуева, К.А. Капельные структуры, возникающие при распаде слоя феррожидкости под действием однородного вертикального магнитного поля // Сборник научных трудов III Всерос. науч. конференции «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем», Ставрополь, 15–18 сентября, 2011, с. 18–23.
14. Бушуева, К.А. Капельные структуры, образуемые феррожидкостью в однородном магнитном поле / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев, А.В. Лебедев // Конвективные течения...(вып. 5), ПГПУ, Пермь, 2011, с. 159–170.
15. Бушуева, К.А. Пространственные формы, принимаемые феррожидкостью под воздействием неоднородного магнитного поля / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев, А.В. Лебедев // Конвективные течения...(вып. 5), ПГПУ, Пермь, 2011, с. 171–182.
16. Бушуева, К.А. Сравнительный анализ деформации газовых пузырьков и устойчивых разрывов горизонтального слоя феррожидкости под действием магнитного поля / К.А. Бушуева, К.Г. Костарев // Вестник пермского университета. Серия: Физика, Пермь, Вып. 3 (21), 2012, с. 24–29.