

Оригинальная статья / Original article

УДК 532.23:532.61:537.63

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-98-108>

Распад слоя магнитной жидкости на жидкой и твердой подложке в вертикальном магнитном поле

К. А. Хохрякова^{1✉}

¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ул. Академика Королева, д. 1, г. Пермь 614018, Российская Федерация

✉ e-mail: bca@icmm.ru

Резюме

Цель данной работы – экспериментально изучить процесс распада горизонтального слоя магнитной жидкости, лежащего на твердой и жидкой не смачиваемой подложке, на упорядоченную систему капель под воздействием вертикального пространственно однородного магнитного поля.

Методы. В эксперименте исследуемые жидкости в виде двухслойной системы, заполняющей цилиндрическую стеклянную кювету, помещались на горизонтальную площадку в центре катушек Гельмгольца, подключенные к источнику постоянного тока. Развитие неустойчивости свободной поверхности слоя магнитной жидкости отслеживалось с помощью скоростной цифровой видеокамеры, установленной сверху над системой катушек.

Результаты. Определена зависимость критической напряженности магнитного поля от толщины разрываемого слоя и магнитной восприимчивости магнитной жидкости, расположенной как на твердой, так и на жидкой подложке. По сравнению со случаем твердой подложки разрыв слоя магнитной жидкости на жидкой подложке происходил при меньших значениях критической напряженности поля. При этом развитие неустойчивости свободной поверхности слоя магнитной жидкости на твердой подложке происходит при напряженностях поля, в два раза больших напряженности неустойчивости межфазной поверхности слоя на жидкой подложке.

Заключение. Использование жидкой подложки позволяет разорвать такие слои магнитной жидкости, деформация которых на твердой подложке ограничивается лишь периодическим возмущением поверхности. Величина критической напряженности, приводящей к разрушению сплошного слоя на жидкой подложке, увеличивается с ростом толщины этого слоя. Возрастание магнитной восприимчивости магнитной жидкости ведет к снижению величины критической напряженности поля.

Ключевые слова: жидкая подложка; магнитная жидкость; магнитное поле; поверхностное натяжение; неустойчивость поверхности.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Структурообразование, гидродинамика и магнитомеханика дисперсий нано- и микрочастиц ферромагнетика в жидких и вязкоупругих матрицах (коллоиды, полимерные растворы, гели)» № АААА-А20-120020690030-5.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Хохрякова К. А. Распад слоя магнитной жидкости на жидкой и твердой подложке в вертикальном магнитном поле // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 98–108. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-98-108>.

Поступила в редакцию 20.09.2023

Подписана в печать 28.10.2023

Опубликована 25.12.2023

The Disintegration of Magnetic Fluid Layer on Liquid and Solid Substrates in Vertical Magnetic Field

Cristina A. Khokhryakova¹✉

¹ Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science
1 Akademika Koroleva Str., Perm 614018, Russian Federation

✉ e-mail: bca@icmm.ru

Abstract

The purpose of this work is to experimentally study the process of decomposition of a horizontal layer of a magnetic fluid lying on a liquid non-wettable substrate into an ordered system of drops under the influence of a vertical magnetic field.

Methods. In the experiment, the studied liquids in the form of a two-layer system filling a cylindrical glass cuvette were placed on a horizontal platform in the center of the Helmholtz coils connected to a direct current source. The development of magnetic fluid layer free surface instability was monitored using a high-speed digital video camera installed at the top of the coil system.

Results. The dependence of the critical strength of the magnetic field on the thickness of the torn layer and the magnetic susceptibility of the magnetic fluid is determined. The obtained experimental data are compared with the results of existing theoretical studies of the instability of the magnetic fluid layer. Compared to the case of a solid substrate, the rupture of the magnetic fluid layer on a liquid substrate occurred at lower values of the critical field strength. In this case, the development of instability of the free surface magnetic fluid layer on a solid substrate occurs at field strengths twice as high as the instability strength of the interface of the layer on a liquid substrate.

Conclusion. The use of a liquid substrate makes it possible to break such layers of the magnetic fluid, the deformation of which on a solid substrate is limited only by a periodic perturbation of the surface. The magnitude of the critical strength leading to the disintegration of a continuous magnetic fluid layer on a liquid substrate increases with increasing thickness of this layer. An increase in the magnetic susceptibility of the magnetic fluid leads to a decrease in the critical field strength.

Keywords: liquid substrate; magnetic fluid; magnetic field; surface tension; surface instability.

Funding: The work was carried out within the framework of the state budget topic "Structure formation, hydrodynamics and magnetomechanics of dispersions of nano- and microparticles of a ferromagnet in liquid and viscoelastic matrices (colloids, polymer solutions, gels)" No. AAAA-A20-120020690030-5.

Conflict of interest: The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Khokhryakova C. A. The Disintegration of Magnetic Fluid Layer on Liquid and Solid Substrates in Vertical Magnetic Field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(4): 98–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-98-108>

Received 20.09.2023

Accepted 28.10.2023

Published 25.12.2023

Введение

К числу наиболее ярких проявлений специфических свойств магнитной жидкости можно отнести неустойчивость ее свободной поверхности во внешнем магнитном поле. При достижении некоторого критического значения H_c составляющей

магнитного поля, ортогональной к свободной поверхности, последняя становится неустойчивой по отношению к малым возмущениям [1]. Неустойчивость проявляется в формировании упорядоченной системы конических пиков, получившей название «цветок Розенцвейга» в честь первооткрывателя этого явления [2].

Возникновение подобной системы объясняется тем, что при деформации поверхности собственное (размагничивающее) поле магнитной жидкости под пиками снижается, а вблизи впадин увеличивается. Как результат суммарная напряженность поля, определяемая действием сторонних источников и жидкости, под пиками возрастает, а вблизи впадин уменьшается. Вследствие этого магнитная жидкость перетекает в область пространства, где напряженность выше [3].

К настоящему времени неустойчивость Розенцвейга полубесконечного горизонтального слоя магнитной жидкости в ортогональном однородном магнитном поле достаточно широко изучена теоретически [4; 5] и экспериментально [6; 7]. Типичным проявлением такого рода неустойчивости на свободной поверхности феррожидкости является система пиков, образующих гексагональную пространственную структуру [8]. Высота и форма пиков определяются условием равенства трех давлений: магнитного (с одной стороны), гидростатического и капиллярного (с другой стороны).

Похожие пространственные структуры наблюдались в результате распада тонких пленок магнитной жидкости (≤ 50 мкм), расположенных на твердой подложке [9], либо внутри некоторого объема несмешивающейся жидкости [10], а также на межфазной поверхности двух несмешивающихся магнитных жидкостей [11].

Влияние вертикального магнитного поля на достаточно толстые (≥ 3 мм) слои магнитной жидкости, лежащие на твердой подложке, как правило, ограничивается их деформацией с образованием гексагонального рельефа либо системы параллельных ребер [12; 13]. Использование жидкой подложки для подобных слоев позволило бы им деформироваться одновременно с двух сторон вплоть до распада

на капли. В то же время еще в классической работе [2] были описаны результаты экспериментов с феррожидкостью, расположенной поверх слоя более тяжелой либо под слоем более легкой немагнитной несмешивающейся жидкости (воды). Развитие неустойчивости наблюдалось в виде формирования системы пиков феррожидкости, пронзающих слой контактирующей немагнитной жидкости. Исследование было существенно осложнено из-за непрозрачности феррожидкости. Подобный эффект наблюдался и при нанесении тонкой пленки магнитной жидкости на органической основе на поверхность воды в открытом стакане и включении поля, перпендикулярного поверхности [14]. Процесс разрушения пленки был облегчен благодаря жидкой подложке и сопровождался интенсивным отталкиванием возникающих капель с разбрызгиванием их из стакана.

Теоретически задача о неустойчивости слоя магнитной жидкости конечной толщины, окруженного сверху и снизу различными средами, была рассмотрена в [15]. Получено дисперсионное уравнение для волновых возмущений в линейном приближении, условия возникновения неустойчивости описаны в виде функции плотности и поверхностного натяжения контактирующей среды. Задача была решена для двух приближений: слой МЖ, ограниченный твердой поверхностью и воздухом (классическая неустойчивость Розенцвейга), и слой МЖ с двумя свободными поверхностями.

Экспериментально было показано [16], что в вертикальном магнитном поле быстрее всего развивается неустойчивость на межфазной границе в случае, когда слой магнитной жидкости располагается поверх немагнитной. Отметим, что в данной работе наблюдение велось со стороны верхней, свободной поверхности слоя и возникновение неустойчивости

слоя не сопровождалось его разрушением на отдельные структуры.

Расширение диапазона толщин слоя магнитной жидкости, разрушаемого вертикальным однородным магнитным полем, предложено в теоретической работе [17], в которой рассмотрен горизонтальный слой феррожидкости, зажаты между двумя немагнитными жидкостями, образуя так называемую «сэндвич-структуру». Линейный и слабонелинейный анализ неустойчивости такой структуры показал, что энергия системы минимальна при некоторой амплитуде возмущений обеих межфазных поверхностей слоя магнитной жидкости. В результате развития деформаций поверхностей слой магнитной жидкости разрушается с образованием структуры в виде отдельных капель.

Вопрос об устойчивости слоя магнитной жидкости и форме его поверхности [18] остается актуальным и на сегодняшний день ввиду широкого практического применения МЖ в различных технических устройствах и технологиях [19].

Выполненное нами исследование направлено на экспериментальное доказательство тезиса о том, что жидкая подложка понижает устойчивость двухслойной системы в вертикальном однородном магнитном поле. Отметим, что перспективность исследований в этом направлении была показана ранее в [20].

Материалы и методы

В эксперименте использовались три магнитные жидкости (МЖ) на основе керосина, далее называемые МЖ 1, МЖ 2 и МЖ 3, имеющие одинаковую плотность, но разную начальную магнитную восприимчивость, обусловленную размерами частиц твердой магнитной фазы и их объемной концентрацией. В качестве жидкой подложки для слоя магнитной жидкости был выбран перфтороктан из-за его высокой плотности и низкого поверхностного натяжения. Физико-химические свойства жидкостей слоя и подложки, использованных в эксперименте, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства жидкостей, использованных в эксперименте

Table 1. Physic-chemical properties of liquids used in the experiment

Жидкости Fluids	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Поверхностное натяжение σ , мН/м Surface tension σ , mN/m	Вязкость ν , сСт Viscosity ν , cSt	Начальная магнит- ная восприимчи- вость χ_0 Initial magnetic sus- ceptibility χ_0	Намагничен- ность насыще- ния M_s , кА/м Saturation magnetization M_s , kA/m
МЖ 1 MF 1	1,37	23,5	6,0	7,0	50,0
МЖ 2 MF 2	1,37	25,0	23,0	2,0	36,7
МЖ 3 MF 3	1,37	28,0	15,0	5,2	45,2
Perfluoro- octan C ₈ F ₁₈	1,76	15,8	0,8	—	—

Измерение поверхностного натяжения используемых в эксперименте жидкостей, включая перфтороктан, было проведено с помощью тензиометрической установки Sigma 701 фирмы *Biolin Scientific* методом отрыва кольца [21]. Динамическая вязкость жидкостей определялась с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда. Магнитные свойства феррожидкостей, используемых в эксперименте, контролировались путем измерения дифференциальной магнитной восприимчивости [22].

Система жидкостей заполняла стеклянную кювету в виде короткого вертикального цилиндра диаметром $D_1 = 59,4$ мм и $D_2 = 89,0$ мм. Толщина слоя МЖ определялась как $h = m/\rho S$, где m – масса жидкости; $S = \pi D^2/4$ – площадь слоя; D – внутренний диаметр кюветы. Массу жидкости и, соответственно, толщину слоя определяли взвешиванием шприца с МЖ на электронных весах до и после ее

введения в кювету. Таким образом, толщина слоя МЖ h изменялась в пределах от 1 до 4 мм. Толщина перфтороктана 1 (рис. 1, а) в несколько раз превышала толщину слоя МЖ 2, изменяясь соответственно от 10 до 15 мм.

В ходе опытов кювета 3 помещалась на горизонтальную площадку между вертикально ориентированными катушками Гельмгольца 4. Ось кюветы совпадала с осью катушек. Напряженность H магнитного поля, создаваемого катушками, регулировалась с помощью стабилизированного источника питания GPR – 7550 D и рассчитывалась по формуле $H = 1,0493 I$. Относительная неоднородность вертикальной компоненты напряженности поля, измеренной на уровне свободной поверхности сплошного (недеформированного) слоя МЖ вдоль радиуса кюветы, не превышала 1% для кюветы с диаметром D_1 и 3% – для кюветы с диаметром D_2 (рис. 1, б).

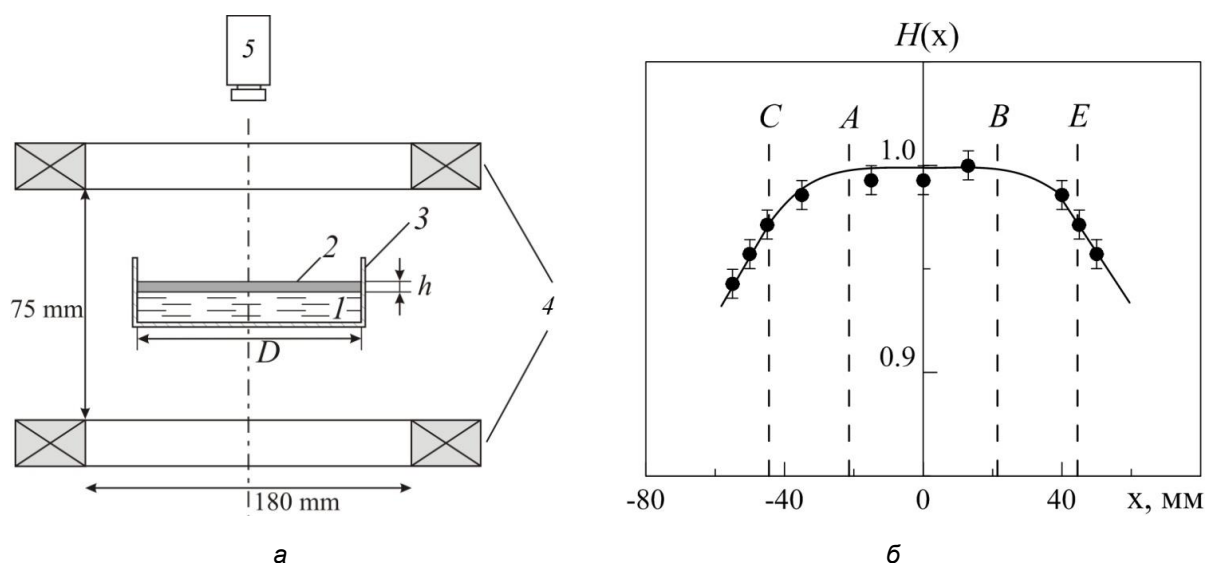


Рис. 1. Экспериментальная установка (а): 1 – жидкая подложка (перфтороктан); 2 – магнитная жидкость; 3 – стеклянная кювета с рабочими жидкостями; 4 – катушки Гельмгольца; 5 – камера. Распределение напряженности поля катушек Гельмгольца (б) по их диаметру в плоскости кюветы (линии АВ соответствуют D_1 , линии СЕ – D_2), полученное с помощью датчика Холла

Fig. 1. Experimental setup: (a) 1 – liquid substrate (perfluorooctane); 2 – magnetic fluid; 3 – glass cuvette with liquids in it; 4 – Helmholtz coils; 5 – camera (б). The distribution of the field intensity of Helmholtz coils along their diameter in the plane of the cuvette (lines АВ corresponds to D_1 , lines СЕ – D_2) obtained with the Hall Effect sensor

Для регистрации рельефа исследуемых жидкостей использовалась видеокамера 5, установленная над катушками Гельмгольца. В поле кадра дополнительно проецировались данные о силе тока, протекающего через обмотку катушек. Опыты были выполнены при температуре системы жидкостей и окружающей среды $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждения

В первой серии опытов исследуемый слой магнитной жидкости располагался на твердой смачиваемой поверхности дна кюветы (рис. 2, а). Варьируя толщину этого слоя и постепенно наращивая вели-

чину вертикально ориентированного магнитного поля, в эксперименте фиксировался момент наступления неустойчивости свободной поверхности H_f^* в виде периодической системы пиков (рис. 2, в). Перед распадом слоя МЖ на твердой подложке наблюдалась неустойчивость поверхности в виде концентрических окружностей (рис. 2, б), аналогично наблюдаемым в периодически меняющемся вертикальном поле [23]. Таким образом, неустойчивость межфазной границы «жидкость – твердая подложка» при некотором H_i^* происходит раньше неустойчивости свободной поверхности H_f^* . Для жидкой подложки наступление обоих типов неустойчивости ожидается при меньших значениях напряженности поля.

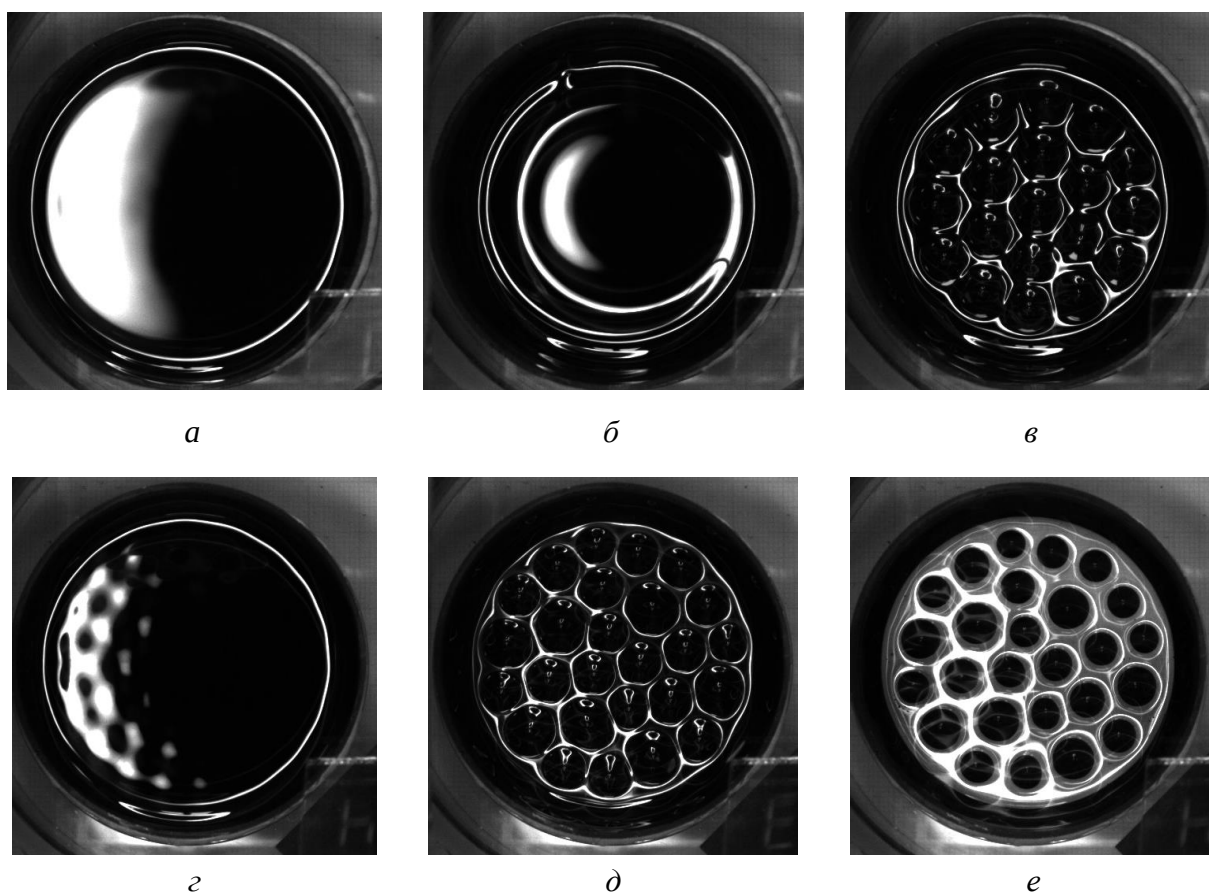


Рис. 2. Распад слоя МЖ 2 толщиной $h = 3,3$ мм на твердой (а–в) и на жидкой (z–e) подложке под действием вертикального магнитного поля H , кА/м: а – 0; б – 8,7; в – 9,4; z – 5,5 = H_i^* ; д – 8,7; е – 8,8 = H_i^* ; $D_1 = 59,4$ мм

Fig. 2. Disintegration of the MF 2 layer of thickness $h = 3.3$ mm on solid (a–v) and liquid substrate (r–e) under the action of a vertical magnetic field H , kA/m: а – 0; б – 8.7; в – 9.4; z – 5.5 = H_i^* ; д – 8.7; е – 8.8 = H_i^* ; $D_1 = 59.4$ mm

Как было обнаружено ранее [20], отсутствие специального демпфирования экспериментальной установки создает условия для возникновения возмущений на свободной и межфазной поверхностях магнитной жидкости в виде гравитационно-капиллярных волн. Действие вертикального магнитного поля усиливает эти возмущения и приводит к формированию на свободной и межфазной поверхностях слоя МЖ рельефа в виде системы упорядоченных ячеек, как и в случае твердой подложки [4] при некотором характерном H_f^* (рис. 2, ε). При этом степень деформации нижней границы слоя оказывается существенно выше, что подтверждает выводы [17], т.к. перепад плотности и величина ее межфазного натяжения оказываются меньше, чем соответствующие параметры для свободной поверхности МЖ. Разница обнаруживается при оценке количества «холмов» при наступлении неустойчивости межфазной границы «жидкость – жидкость» и количества капель,

образовавшихся при неустойчивости свободной поверхности слоя МЖ при H_f^* (рис. 2, δ).

Дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к нарушению сплошности слоя и формированию упорядоченной системы отдельных капель феррожидкости (рис. 2, e). Образующие упорядоченную структуру капли имеют вид плавающих конусов, погруженных вершиной в жидкость подложки. При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля неустойчивость испытывала уже свободная поверхность капель и на ней пороговым образом возникали пики, как у известного «цветка Розенцвейга».

По сравнению со случаем твердой подложки [6] разрыв слоя магнитной жидкости на жидкой подложке происходил при значительно меньших значениях критической напряженности H_f^* [24], т.к. для этого достаточно, чтобы суммарная амплитуда возмущений обеих поверхностей слоя превысила его толщину (рис. 3).

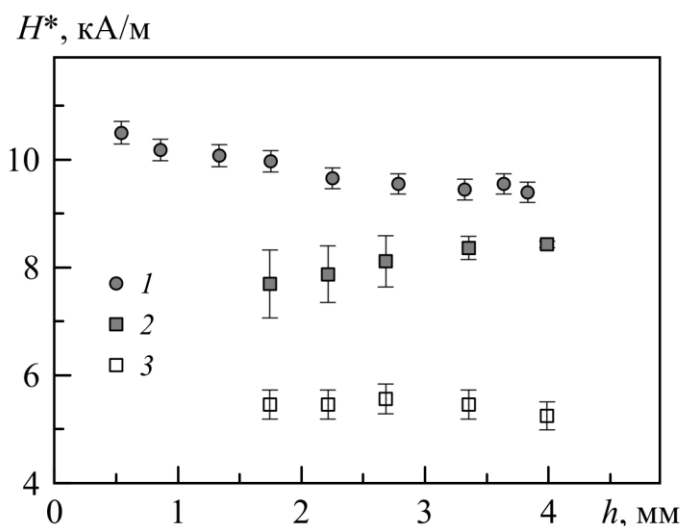


Рис. 3. Критическая напряженность магнитного поля H^* в зависимости от толщины слоя магнитной жидкости h , расположенного на твердой (1) и на жидкой подложке (2 – H_f^* , 3 – H_i^*) для МЖ 2 с начальной магнитной восприимчивостью $\chi_0 = 2,0$ в кювете диаметром $D = 59,4$ мм

Fig. 3. Critical magnetic field strength H^* versus the magnetic fluid layer thickness h , located on a solid (1) and liquid substrate (2 – H_f^* , 3 – H_i^*) obtained for MF 2 with the initial magnetic susceptibility $\chi_0 = 2.0$ in a cuvette of $D = 59.4$ mm

Критические значения напряженности поля H_f^* распада слоя на твердой подложке (см. рис. 3, кривая 1) в 2 раза превосходят значения неустойчивости межфазной поверхности H_i^* слоя магнитной жидкости на жидкой несмачиваемой подложке (кривая 3). При этом зависимость $H(h)$ для твердой подложки явно имеет тенденцию к плавному снижению (кривая 1) по сравнению с таковой для жидкой подложки (кривая 2).

Для более детального анализа влияния свойств жидкостей в двухслойной системе на наступление неустойчивости был получен массив значений $H^*(h)$ для раз-

личных МЖ (рис. 4). Отметим, что критическая напряженность поля H_f^* медленно возрастает с исходной толщиной слоя (рис. 4) для всех использованных в эксперименте магнитных жидкостей, расположенных на жидкой несмачиваемой подложке. Более существенное влияние оказывает величина магнитной восприимчивости феррожидкости. В частности, трехкратное увеличение магнитной восприимчивости вызывает снижение критической напряженности поля примерно в два раза. В то же время значение H_f^* очень слабо зависит от диаметра кюветы, что позволяет при необходимости проводить сопоставление со случаем полубесконечного слоя.

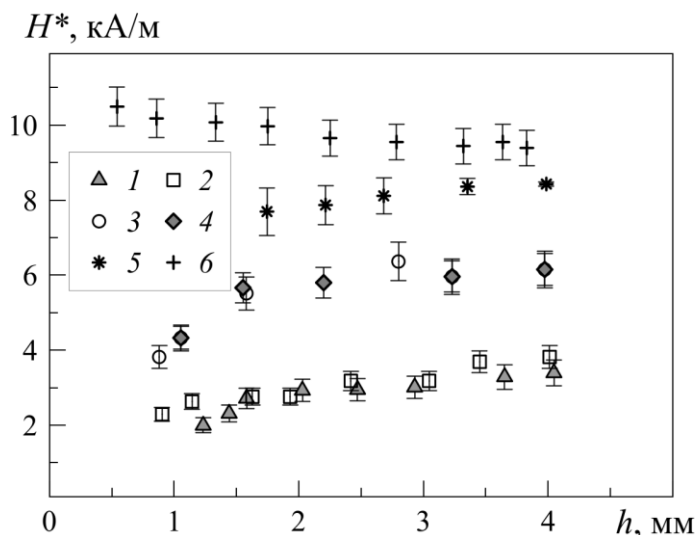


Рис. 4. Критическая напряженность магнитного поля H_i^* в зависимости от толщины слоя магнитной жидкости h . Начальная магнитная восприимчивость χ_0 : 1, 2 – 7,0; 3, 4 – 5,2; 5, 6 – 2,0; 1, 3, 5, 6 – D , мм: 59,4; 2, 4 – 89,0 [20; 23]; слой МЖ 2 на жидкой подложке (5), слой МЖ 2 на твердой подложке (6)

Fig. 4. Critical magnetic field strength H_i^* versus the thickness of the magnetic fluid layer h . Initial magnetic susceptibility χ_0 : 1, 2 – 7.0; 3, 4 – 5.2; 5, 6 – 2.0; 1, 3, 5, 6 – D , mm: 59.4; 2, 4 – 89.0 [20; 23]; layer of MF 2 on a liquid substrate (5), layer of MF № 2 on a solid substrate (6)

Заключение

Использование жидкой подложки позволяет разорвать такие слои магнитной жидкости, деформация которых на твердой подложке ограничивается лишь периодическим возмущением поверхности.

Величина критической напряженности, приводящей к разрушению сплошного слоя на жидкой подложке, увеличивается с ростом толщины этого слоя. Возрастание магнитной восприимчивости магнитной жидкости ведет к снижению величины критической напряженности поля.

Список литературы

1. Gailitis A. Form of surface instability of a ferromagnetic fluid // *Magnetohydrodynamics*. 1969. Vol. 5, no. 1. P. 68–70.
2. Cowley M. D., Rosensweig R. E. The interfacial stability of a ferromagnetic fluid // *J. Fluid Mech.* 1967. Vol. 30, pt. 4. P. 671–688.
3. Blum E., Cebers A., Maierov M. *Magnetic Fluids*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 1997. 428 p.
4. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // *Успехи физических наук*. 1974. Т. 17. С. 153–169.
5. Bashtovoi V. G. Instability of a stationary thin layer of a magnetizable liquid // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1978. Vol. 19, is. 1. P. 65–69.
6. Berkovsky B., Bashtovoi V. Instabilities of magnetic fluids leading to rupture of continuity // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1980. Vol. 16, is. 2. P. 288–297.
7. Bacri J.-C., Salin D. First-order transition in the instability of a magnetic fluid interface // *J. Physique Lett.* 1984. Vol. 45. P. L-559–L-564.
8. Normal field instability and patterns in pools of ferrofluid / A. G. Boudouvis, J. L. Puchalla, L. E. Scriven, R. E. Rosensweig // *J. Magn. Magn. Mater.* 1987. Vol. 65, is. 2–3. P. 307–310.
9. Диканский Ю. И., Закирян А. Р., Мкртчян Л. С. Неустойчивость тонкого слоя магнитной жидкости в перпендикулярном магнитном поле // *Журнал теоретической физики*. 2010. Т. 80, вып. 9. С. 38–43.
10. Chen C.-Y., Li C.-S. Ordered microdroplet formations of thin ferrofluid layer breakups // *Phys. Fluids*. 2010. Vol. 22, is. 1. P. 014105.
11. Bacri J.-C., Perzynski R., Salin D. Instability of a ferrofluid film // *C. R. Acad. Sci. Paris*. 1988. Vol. 307, is. II. P. 699–704.
12. Barkov Yu. D., Bashtovoi V. G. Experimental investigation of instability of flat layers of magnetized liquid // *Magnetohydrodynamics*. 1977. Vol. 13, no. 4. P. 497–500.
13. Richter R., Lange A. Surface instabilities of ferrofluids // *Lect. Notes Phys.* 2009. Vol. 763. P. 157–247.
14. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. New York: Cambridge University Press, 1985. 357 с.
15. Bashtovoi V. G. Instability of a thin layer of a magnetic fluid with two free boundaries // *Magnetohydrodynamics*. 1977. Vol. 13, no. 3. P. 277–280.
16. Баштовой В. Г., Краков М. С., Рекс А. Г. Неустойчивость плоского слоя магнитной жидкости в закритической области магнитного поля // *Магнитная гидродинамика*. 1985. № 1. С. 19–24.
17. Rannacher D., Engel A. Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure // *Phys. Rev. E*. 2004. Vol. 69. P. 066306(1–8).
18. Моцар А. А., Рекс А. Г., Ряполов П. А. Форма поверхности магнитной жидкости с ферромагнитным цилиндром в однородном магнитном поле // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 1. С. 134–149. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-134-149>.
19. Залетило А. А., Рекс А. Г. Форма и устойчивость локального теплопередающего магнитожидкостного покрытия на пластине // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, no. 2. С. 150–163. <http://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-150-163>.
20. Bushueva C. A. Drop structures formed by ferrofluid in the uniform magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2013. Vol. 49, no. 2. P. 191–195. <http://doi.org/10.22364/mhd.49.3-4.64>.
21. Мизёв А. И., Брацун Д. А., Шмырова А. И. Влияние конвекции на формирование адсорбированной плёнки ПАВ при динамическом изменении площади поверхности раствора // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2016. Т. 9, № 3. С. 345–357. <http://doi.org/10.7242/1999-6691/2016.9.3.28>.
22. Косков М. А., Лебедев А. В., Иванов А. С. О методе дифференциальной прогонки для получения кривых намагничивания ферроколлоидов // *Известия Юго-Западного государственного*

университета. Серия: Техника и технологии. 2023. № 3. С. 89–104. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>

23. Khokhryakova (Bushueva) C., Kostarev K., Shmyrova A. Deformation of ferrofluid floating drop under the action of magnetic field as method of interface tension measurement // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. Vol. 101. P. 186–192.

24. Khokhryakova C. A., Kolesnichenko E. V. Stability of a ferrofluid layer on a liquid substrate // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1809. Art. no. 12021(6). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1809/1/012021>.

References

1. Gailitis A. Form of surface instability of a ferromagnetic fluid. *Magnetohydrodynamics*, 1969, vol. 5, no. 1, pp. 68–70.
2. Cowley M. D., Rosensweig R. E. The interfacial stability of a ferromagnetic fluid. *J. Fluid Mech.*, 1967, vol. 30, pt. 4, pp. 671–688.
3. Blum E., Cebers A., Maiorov M. *Magnetic Fluids*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 1997. 428 p.
4. Shliomis M. I. Magnitnye zhidkosti [Magnetic fluids]. *Physics-Uspekhi*, 1974, vol. 17, pp. 153–169.
5. Bashtovoi V. G. Instability of a stationary thin layer of a magnetizable liquid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1978, vol. 19, is. 1, pp. 65–69.
6. Berkovsky B., Bashtovoi V. Instabilities of magnetic fluids leading to rupture of continuity. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1980, vol. 16, is. 2, pp. 288–297.
7. Bacri J.-C., Salin D. First-order transition in the instability of a magnetic fluid interface. *J. Physique Lett.*, 1984, vol. 45, pp. L-559–L-564.
8. Boudouvis A. G., Puchalla J. L., Scriven L. E., Rosensweig R. E. Normal field instability and patterns in pools of ferrofluid. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1987, vol. 65, is. 2–3, pp. 307–310.
9. Dikansky Y. I., Zakinyan A. R., Mkrtchyan L. S. Neustoichivost' tonkogo sloya magnitnoi zhidkosti v perpendikulyarnom magnitnom pole [Instability of a thin layer of a magnetic fluid in a perpendicular magnetic field]. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 2010, vol. 55 (9), pp. 1270–1274.
10. Chen C.-Y., Li C.-S. Ordered microdroplet formations of thin ferrofluid layer breakups. *Phys. Fluids*, 2010, vol. 22, is. 1, pp. 014105.
11. Bacri J.-C., Perzynski R., Salin D. Instability of a ferrofluid film. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1988, vol. 307, is. II, pp. 699–704.
12. Barkov Yu. D., Bashtovoi V. G. Experimental investigation of instability of flat layers of magnetized liquid. *Magnetohydrodynamics*, 1977, vol. 13, no. 4, pp. 497–500.
13. Richter R., Lange A. Surface instabilities of ferrofluids. *Lect. Notes Phys.*, 2009, no. 763, pp. 157–247.
14. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. New York, Cambridge University Press, 1985. 357 c.
15. Bashtovoi V. G. Instability of a thin layer of a magnetic fluid with two free boundaries. *Magnetohydrodynamics*, 1977, vol. 13, no. 3, pp. 277–280.
16. Bashtovoi V. G., Krakov M. S., Reks A. G. Instability of a flat layer of magnetic liquid for supercritical magnetic fields. *Magnetohydrodynamics*, 1985, no. 1, pp. 14–18.
17. Rannacher D., Engel A. Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure. *Phys. Rev. E.*, 2004, vol. 69, pp. 066306.
18. Motsar A. A., Reks A. G., Rjapolov P. A. Forma poverkhnosti magnitnoi zhidkosti s ferromagnitnym tsilindrom v odnorodnom magnitnom pole [Surface shape of a magnetic fluid with a ferromagnetic cylinder in a uniform magnetic field]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023, vol. 13(1), pp. 134–149. <http://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-134-149>

19. Zaliatsila A. A., Reks A. G. Forma i ustoichivost' lokal'nogo teploperedayushchego magnitozhidkostnogo pokrytiya na plastine [Shape and stability of a local heat-transfer magnetofluid coating on a plate]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2023, vol. 13(2), pp. 150–163. <http://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-150-163>
20. Bushueva C. A. Drop structures formed by ferrofluid in the uniform magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 191–195. <http://doi.org/10.22364/mhd.49.3-4.64>
21. Mizev A. I., Bratsun D. A., Shmyrova A. I. Vliyanie konveksii na formirovanie adsorbiruvannoi plenki PAV pri dinamicheskom izmenenii ploshchadi poverkhnosti rastvora [Influence of convection on the formation of adsorbed film surfactants under dynamic changes in the surface area of solution]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred = Computational Continuum Mechanics*, 2016, vol. 9, pp. 345–357. <http://doi.org/10.7242/1999-6691/2016.9.3.28>
22. Koskov M. A., Lebedev A. V., Ivanov A. S. O metode differentsial'noi progonki dlya polucheniya krivyykh namagnichivaniya ferrokolloidov [On the differential sweep method for obtaining magnetization curves of ferrocolloids]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2023, no. 3, pp. 89–104. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>
23. Khokhryakova (Bushueva) C., Kostarev K., Shmyrova A. Deformation of ferrofluid floating drop under the action of magnetic field as method of interface tension measurement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 101, pp. 186–192.
24. Khokhryakova C. A., Kolesnichenko E. V. Stability of a ferrofluid layer on a liquid substrate. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1809, art. no. 12021(6). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1809/1/012021>

Информация об авторе / Information about the Author

Хохрякова Кристина Андреевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории динамики дисперсных систем, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: bca@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-9880-6111

Christina A. Khokhryakova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Researcher at the Laboratory of Disperse Systems Dynamics, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation, e-mail: bca@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-9880-6111