

## ДИНАМИКА СЛОЯ ФЕРРОЖИДКОСТИ НА ЖИДКОЙ ПОДЛОЖКЕ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ\*

К.А. Хохрякова (Бушуева), *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

К.Г. Костарев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.В. Лебедев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.И. Шмырова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Д.К. Паравина, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Экспериментально исследован распад горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке с образованием упорядоченной системы капель под действием однородного вертикального магнитного поля. Измерена зависимость критической напряженности поля, при которой происходит нарушение сплошности слоя, от его толщины, диаметра кюветы и магнитной восприимчивости феррожидкости. Показано, что количество возникающих капель, их распределение по размеру и пространственному периоду определяются скоростью нарастания напряженности поля.

Экспериментально исследовано воздействие вертикального осциллирующего магнитного поля на сплошной слой феррожидкости. Определена длина бегущей концентрической волны на поверхности слоя в зависимости от толщины слоя, диаметра кюветы и частоты поля. Экспериментально изучено действие переменного и постоянного вертикальных магнитных полей на горизонтальный слой феррожидкости. Обнаружено, что наложение малых осцилляций оказывает стабилизирующее действие на двухслойную систему.

**Ключевые слова:** *феррожидкость, двухслойные системы жидкостей, устойчивость свободной поверхности, поверхностное натяжение.*

С момента создания первых феррожидкостей основное внимание в области их гидродинамики было сосредоточено на двух направлениях исследований: устойчивости свободной поверхности слоя феррожидкости и поведении жидких двухфазных систем, в которых одна фаза обладает магнитными свойствами.

К настоящему времени устойчивость свободной поверхности горизонтального слоя феррожидкости во внешних магнит-

ных полях изучена достаточно хорошо как аналитически, так и численно [2, 3].

Деформация слоя феррожидкости с двумя свободными/межфазными границами была рассмотрена только теоретически [4]. Отсутствие экспериментальных работ связано, по-видимому, со сложностью подбора жидкости подложки, так как сама феррожидкость имеет достаточно большую плотность, а керосин хорошо растворяется в большинстве органиче-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ-Урал № 13-01-96041 и РФФИ № 16-01-00517.

ских жидкостей.

Цель исследования – экспериментальное изучение деформации и распада на пространственные структуры горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке под действием переменных магнитных полей. Актуальность данной работы связана с перспективой применения деформированной поверхности феррожидкости в качестве источника внутренних волн в жидкости, основы для оптических датчиков магнитного поля, других элементов оптических схем («жидких» линз, диафрагм и затворов), управляемых магнитным полем.

Наличие у слоя феррожидкости двух деформируемых границ резко снижает величину критической напряженности магнитного поля, при которой слой разрушается, превращаясь в упорядоченную систему капель или многоугольных фигур, эволюционирующих по мере изменения интенсивности, частоты и направления магнитного поля [1]. Подробно исследован распад горизонтального слоя феррожидкости, расположенного на немагнитной жидкой подложке, с образованием упорядоченной системы капель под действием однородного вертикального магнитного поля (рис. 1). Определен вид зависимости критической напряженности поля  $H_c$  (рис. 1, в), при которой происходит нарушение сплошности слоя, от его исходной толщины  $h$ , диаметра кюветы  $D$  и магнитной восприимчивости феррожидкости  $\chi$  (рис. 2).

Обнаружено, что возникающие капли

имеют форму полусфер, выступающих над поверхностью жидкости подложки и сопряженных с конусами, погруженными в подложку. 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. Анализ распределения количества капель по их диаметру показывает, что в системе сохраняются только длинноволновые возмущения, если увеличение напряженности магнитного поля от нуля до  $H_c$  происходит за время  $t^*$ , много большее вязкого времени для слоя феррожидкости  $\tau$  (рис. 3, а). При мгновенном нарастании напряженности поля до критического значения характер распределения капель по размерам изменяется, поскольку в данном случае поле успевает усилить более широкий спектр возмущений (рис. 3, б).

Также изучены пространственные характеристики возникшей капельной структуры для случаев медленного и быстрого увеличения напряженности поля. Измерение расстояний производилось не только между отдельной каплей и ее ближайшими соседями, но и между ней и всеми остальными каплями. Вид распределений, полученных для медленного нарастания поля (рис. 4, а), свидетельствует о наличии как ближнего, так дальнего порядка в исследованных пента- и гексагональных капельных структурах. Для случая быстрого нарастания поля в капель-

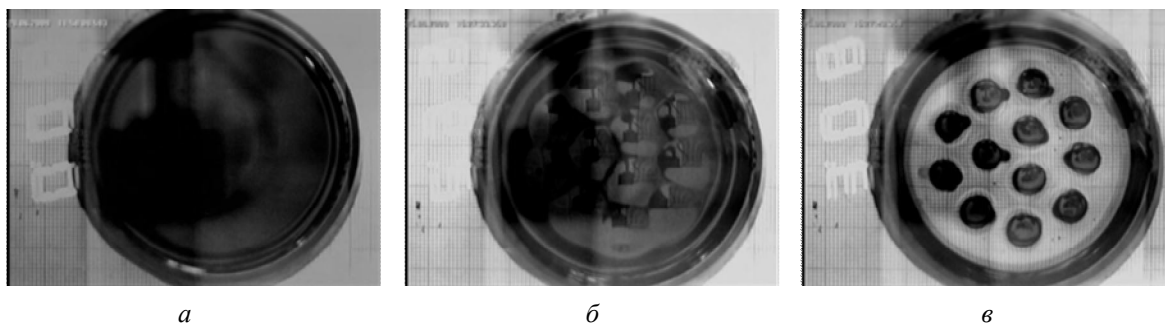


Рис. 1. Развитие деформации слоя феррожидкости под действием однородного вертикального магнитного поля. Толщина слоя  $h = 2,8$  мм. Напряженность поля  $H$ , кА/м: 0 (а); 3,2 (б); 3,3 (в). Диаметр кюветы  $D = 59,4$  мм

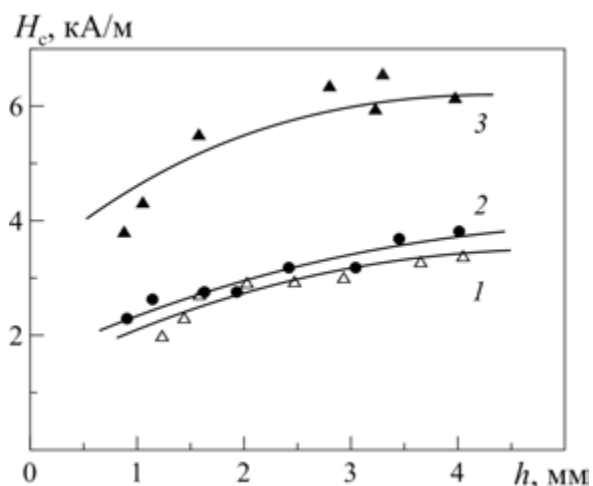


Рис. 2. Критическая напряженность магнитного поля в зависимости от толщины слоя феррожидкости с различной начальной магнитной восприимчивостью  $\chi$ : 2,0 (3); 7,0 (1, 2).  $D$ , мм: 59,4 (1, 3); 89,0 (2)

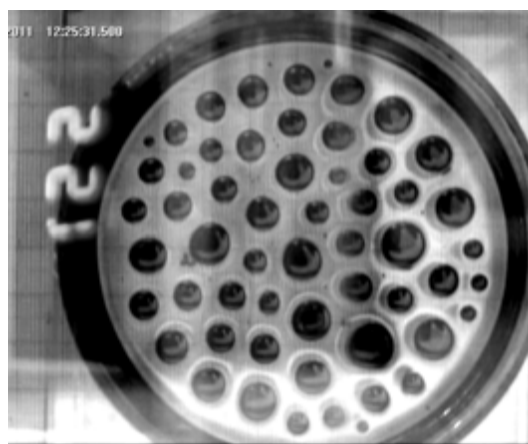
ных структурах наблюдается только ближний порядок (рис. 4, б), что объясняется возникновением капель различного размера, особенно на периферии кюветы.

Полученные данные подтвердили основные результаты теоретической работы Д. Раннахера и А. Энгеля [4].

Экспериментально исследовано влияние однородного вертикально осциллирующего магнитного поля на горизонтальный слой феррожидкости, расположенный на жидкой подложке в кювете в виде короткого вертикального цилиндра. Обнаружено, что при включении поля на поверхности слоя возникает волна, бегущая от периферии кюветы к ее центру в виде концентрических окружностей. Длина волны тем меньше, чем выше частота колебаний магнитного поля (рис. 5). Кроме того, длина волны увеличивается с



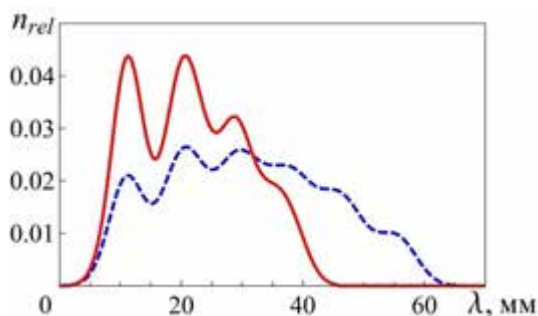
а



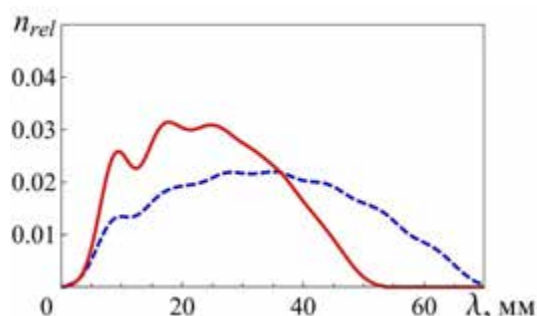
б

Рис. 3. Капельная структура, возникающая при разрыве слоя феррожидкости толщиной  $h = 2,4$  мм постоянным магнитным полем  $H_c = 3,2$  кА/м. Диаметр кюветы  $D = 89,0$  мм:

а)  $t^* > \tau$  ( $t^* = 93$  с,  $\tau = 13$  с); б)  $t^* < \tau$  ( $t^* \leq 1$  с,  $\tau = 13$  с)



а



б

Рис. 4. Пространственные периоды капельной системы, возникающей при разрыве слоя феррожидкости  $h = 2,9$  мм магнитным полем  $H_c = 3,7$  кА/м. Сплошная линия – для капель из центральной части кюветы, пунктирная линия – для всех капель в кювете  $D = 89,0$  мм.

а)  $t^* > \tau$ ; б)  $t^* < \tau$

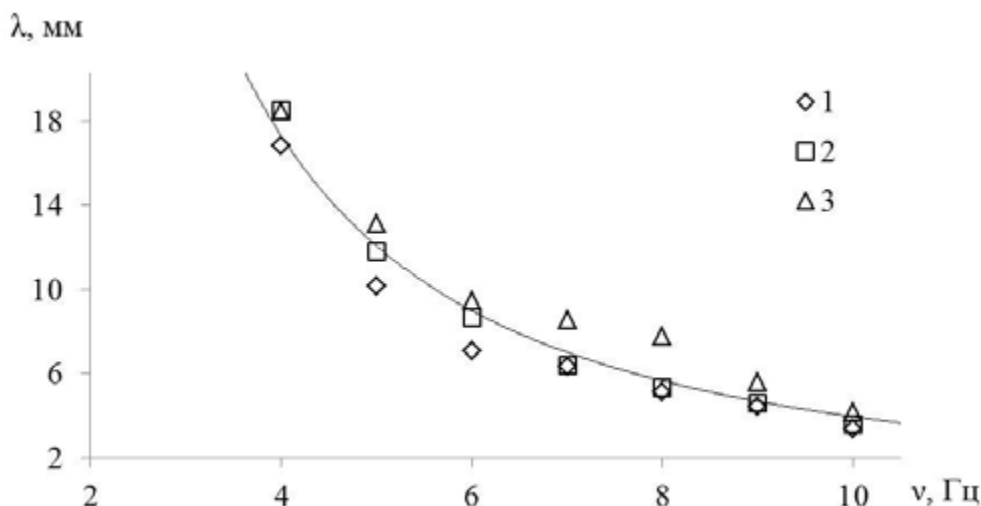


Рис. 5. Длины бегущей волны  $\lambda$  на свободной поверхности слоя феррожидкости в зависимости от частоты колебаний вынуждающей силы  $\nu$  при амплитуде напряженности магнитного поля  $H_m$ , кА/м: 3,7 (1); 3,3 (2); 3,0 (3)

размером кюветы. Максимальной амплитуды волна достигает в центре кюветы (рис. 6, б). При частоте колебаний напряженности магнитного поля  $\sim 7$  Гц формируется стоячая волна (рис. 6, в), причем частота, при которой она возникает, уменьшается с ростом толщины жидкой подложки.

Экспериментально исследовано взаимодействие осциллирующего и постоянного магнитных полей вертикальной ориентации при деформации горизонтального слоя феррожидкости. Накладывая на изначально действующее постоянное магнитное поле  $H$ , формирующее рельеф в виде упорядоченных ячеек на свободной поверхности слоя феррожидкости (рис. 7, а), переменное поле малой амплитуды  $H_m$  и частоты  $\nu$ , слой распадался на

систему капель при меньшем значении суммарного результирующего магнитного поля  $H_m + H < H_c$  (рис. 7, б, в).

Однако наложение малых осцилляций магнитного поля амплитудой  $H_m$  и частоты  $\nu$  (в отсутствии постоянной подмагничивающей компоненты  $H$ , см. рис. 7, з) оказывает стабилизирующее действие на двухслойную систему. При наложении на изначально действующее переменное магнитное поле постоянного во времени поля  $H$ , существенно повышалась величина напряженности суммарного поля  $H_m + H$ , при которой происходит нарушение сплошности слоя феррожидкости (рис. 7, д, е), по сравнению с критической  $H_c$ .

Результаты, полученные в ходе выполнения проекта, существенно расширя-

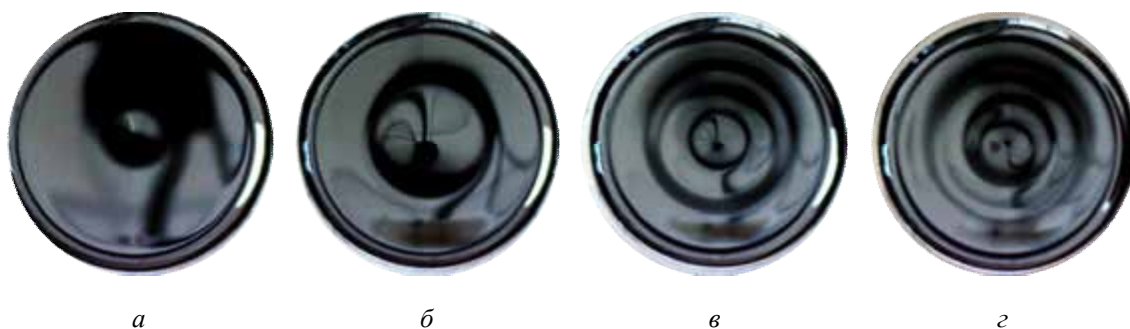


Рис. 6. Колебания свободной поверхности слоя феррожидкости на жидкости-подложке при амплитуде напряженности магнитного поля  $H_m = 3,7$  кА/м и частоте  $\nu$ , Гц: 1 (а); 4 (б); 7 (в); 8 (г)

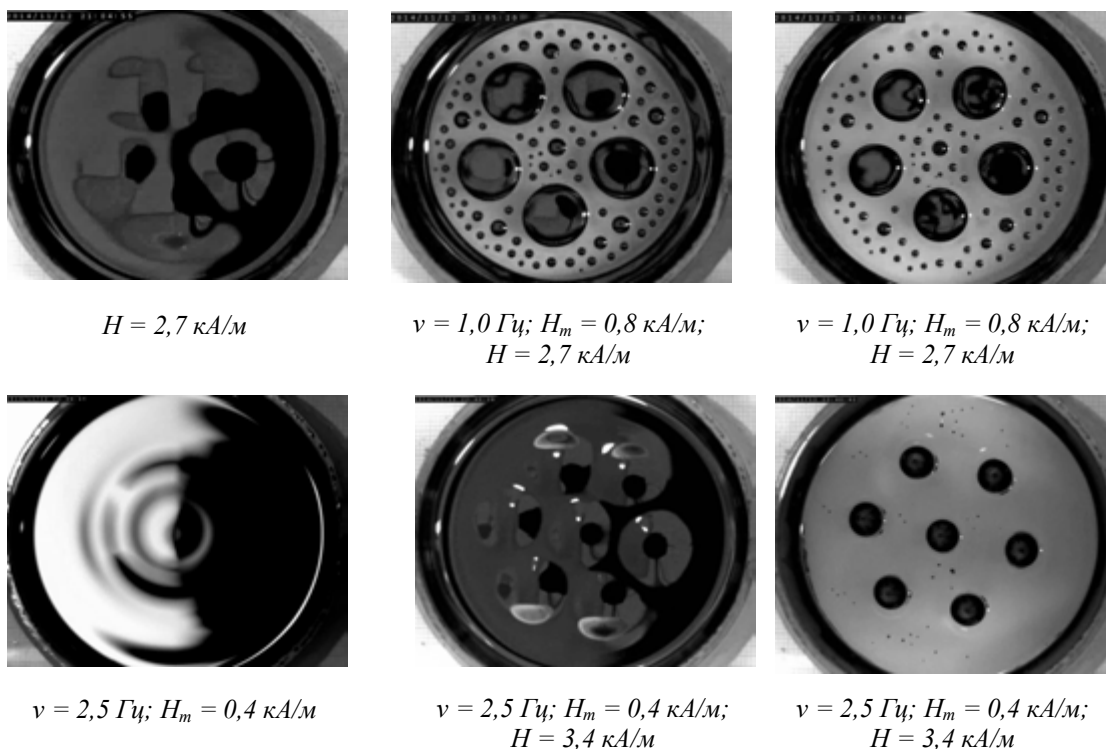


Рис. 7. Результат взаимодействия постоянного магнитного поля напряженностью  $H$  и переменного магнитного поля с амплитудой  $H_m$  и частотой осцилляций  $\nu$

ют представление об эволюции в магнитном поле многослойных систем с участием феррожидкости, в том числе в области сильных деформаций, формируют базу данных для верификации существующих математических моделей поведения слоя магнитной жидкости с двумя свободными

границами в условиях действия силы тяжести, могут послужить основой для разработки/усовершенствования оптических и звуковоспроизводящих устройств, а также систем подачи и регулирования расхода жидкостей.

**Библиографический список**

1. *Bushueva C.A.* Drop structures formed by ferrofluid in the uniform magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49. – № 2–4. – P. 191–195.
2. *Cowley M.D., Rosensweig R.E.* The interfacial stability of a ferromagnetic fluid // *J. Fluid Mech.* – 1967. – Vol. 30, p. 4. – P. 671–688.
3. *Gollwitzer C., Matthies G., Richter R., Rehberg I., Tobiska L.* The surface topography of a magnetic fluid: a quantitative comparison between experiment and numerical simulation // *J. Fluid Mech.* – 2007. – Vol. 571. – P. 455–474.
4. *Rannacher D., Engel A.* Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure // *Phis. Rev. E.* – 2004. – Vol. 69. – P. 066306.

**DYNAMICS OF THE FERROFLUID LAYER LYING ON A LIQUID SUBSTRATE UNDER THE ACTION OF ALTERNATING MAGNETIC FIELDS**

C.A. Khokhryakova (Bushueva)<sup>1</sup>, K.G. Kostarev<sup>1</sup>, A.V. Lebedev<sup>1</sup>, A.I. Shmyrova<sup>1</sup>, D.K. Paravina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*  
<sup>2</sup> *Perm State National Research University*

Disintegration of the horizontal ferrofluid layer on a liquid substrate accompanied by the formation of an ordered drop system under the action of a uniform vertical magnetic field was investigated experimentally. The critical intensity of the magnetic field at which the layer decays to

separate drops depends on the layer thickness, the diameter of the cell and the magnetic susceptibility of the ferrofluid. It was shown that the number of drops, their size distribution and spatial period are determined by the velocity of the field intensity growth.

The impact of a vertical oscillating magnetic field to the ferrofluid solid layer experimentally investigated. The length of concentric waves traveling on the surface of the layer depends on its thickness, the diameter of the cell and the field frequency. The action of alternating and constant vertical magnetic fields on the horizontal ferrofluid layer was studied experimentally. It has been found that the application of small oscillations has a stabilizing effect on the two-layer liquid system.

*Keywords:* ferrofluid, two-layer liquid system, stability of free surface, surface tension.

**Сведения об авторах**

*Хохрякова (Бушужева) Кристина Андреевна*, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: bca@icmm.ru

*Костарев Константин Геннадьевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией гидродинамической устойчивости, ИМСС УрО РАН; e-mail: kostarev@icmm.ru

*Лебедев Александр Владимирович*, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: lav@icmm.ru

*Шмырова Анастасия Ивановна*, инженер-исследователь, ИМСС УрО РАН; e-mail: lutsik@icmm.ru

*Паравина Дарья Константиновна*, студентка 4 курса, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: www.dashuna@bk.ru

*Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.*