

Гидродинамика и акустика газовых включений в магнитной жидкости в поле кольцевого магнита

П. А. Ряполов,^{*} В. М. Полунин,[†] Е. А. Соколов[‡]

Юго-Западный государственный университет

Россия, г. Курск, улица 50 лет Октября, 94, 305040

(Статья поступила 15.11.2019; подписана в печать 25.11.2019)

Для исследования процесса прессинга воздушной полости в магнитной жидкости под действием неоднородного магнитного поля кольцевого магнита создана экспериментальная установка, надежная возможностью скоростной видеосъемки, а также регистрации возникающих электромагнитных и акустических возмущений. Получены экспериментальные данные по прессингу воздушной полости в серии образцов магнитной жидкости с различной концентрацией частиц дисперсной фазы. Определены размеры образованных пузырьков и их распределение в зависимости от намагниченности жидкости. Проведенный теоретический анализ на базе результатов видеофиксации показал взаимосвязь физических параметров магнитной жидкости и конфигурации магнитного поля.

PACS: 75.50.Mm, 62.60.+v, 62.10.+s, 51.40.+p

УДК: 538.951, 538.9, 534.6

Ключевые слова: магнитная жидкость, взаимодействие полей, многофазные системы, акустомангнитная индикация, неоднородное магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают технологии «умных материалов», которые могут изменять свои параметры под внешними воздействиями. К числу таких материалов относятся и магнитные жидкости, их свойства (вязкость, текучесть, другие физические параметры) зависят от внешнего магнитного поля, более того, магнитные жидкости могут изменять форму открытой поверхности и направленно перетекать в магнитном поле определенной конфигурации, немагнитные тела в магнитной жидкости могут перемещаться силами магнитной левитации. Магнитные жидкости (МЖ) — это коллоидные растворы ферро- или ферримангнитных наночастиц, покрытые поверхностно активным веществом, в немагнитной жидкости-носителе [1, 2]. В отличие от ферросуспензий, данные системы обладают агрегативной устойчивостью, стабильны на протяжении десятков лет. МЖ, исследование которых предполагается в статье, получены с помощью метода химической конденсации [3], заключающемся в осаждении наночастиц магнетита из водного раствора солей железа с последующей их пептизацией.

Другим актуальным направлением является создание управляемых пространственно неоднородных магнитных полей для воздействия на разнообразие магнитные системы. Особый интерес представляют магнитные поля с областью нулевой напряженности магнитного поля, в которой градиент магнитного поля меняет свое направление. Эта уникальная область поз-

воляет управлять динамикой немагнитных включений в МЖ под воздействием внешнего неоднородного магнитного поля. Наиболее распространёнными подобными системами являются кольцевые постоянные магниты, используются также сборки постоянных магнитов, в которых область магнитного вакуума имеет различную конфигурацию [4].

Тепло-массообмен и акустические явления (включая динамику пузырей) в многофазных средах исследованы в многочисленных публикациях и изложены в работах [5, 6, 7]. В данных классических монографиях подробно рассмотрены физико-математические модели динамики гетерогенных систем, процессов тепло- и массопереноса и акустики в каналах, но среда, рассматриваемая в данных работах, не обладает магнитными свойствами и не находится под действием внешних магнитных полей.

Исследования газовых включений: пузырьков и полостей в МЖ представляет интерес благодаря возможности управления с помощью внешнего магнитного поля. В области исследования динамики газовых включений предметом экспериментальных исследований является влияние магнитного поля на форму, скорость движения пузырей, распад газовых струй [8, 9, 10]. В теоретическом плане популярным методом для интерпретации подобных систем является метод volume of fluid (VOF) [11, 12, 13], с помощью которого проведено теоретическое моделирование формы газовых пузырьков в магнитном поле, в том числе и во внешних однородных магнитных полях. В большинстве указанных работ рассматривается взаимодействие магнито-жидкостных систем с газовыми включениями с однородными магнитными полями, только в работе [8] исследуется влияние неоднородного магнитного поля, создаваемого кольцевым электромагнитом, на деформацию и скорость пузырьков в МЖ. В предыдущих работах [14, 15] проведены исследования динамики га-

*E-mail: r-piter@yandex.ru

†E-mail: polunin-vm1@yandex.ru

‡E-mail: vgeniysokolov1@yandex.ru

зовых включений в магнитном коллоиде, заполняющем цилиндрическую трубку диаметром 12 мм, в неоднородном магнитном поле кольцевого магнита. Предложен оригинальный акусто-магнитный механизм регистрации колебаний стенки газового пузырька в МЖ. Однако, эксперименты были проведены в оптически непрозрачной системе, что затрудняло экспериментальную интерпретацию полученных результатов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ, УСТАНОВКА, ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗЦОВ

Идея эксперимента заключается в следующем: если в горизонтальный контейнер (трубку или плоский канал), заполненный МЖ снизу подвести кольцевой магнит, то на некотором расстоянии между поверхностью жидкости и поверхностью кольцевого магнита происходит захват порции газа жидкостью. Дальнейший медленный (0.02 мм/с) подъем магнита приводит к захвату пузырьков газа и образованию полости большего размера, герметизация которой затем нарушается. Восстановление перемычки (герметизация полости) происходит при последующем опускании магнита. В процессе опускания магнита с постоянной скоростью 0.8 мм/с перемычка за счет перетекания МЖ превращается в сплошной столбик. При дальнейшем опускании магнита до уровня, находящегося ниже поверхности дна, воздушная полость прижимается неоднородным магнитным полем к доньшку, после чего происходит отрыв газовых пузырьков [14, 15].

Экспериментальная установка (рис. 1 а) содержит контейнер 1 (трубка из оргстекла внутренним диаметром 12 мм в случае магнито-акустического эксперимента или плоский стеклянный канал толщиной 2 мм и шириной 10 мм), заполненный МЖ 2, жестко закреплен на алюминиевой конструкции. В области «магнитного вакуума» кольцевого магнита 3 удерживается воздушная полость 4, от которой при придавливании ко дну за счет перемещения магнита с помощью винтовой передачи с шаговым двигателем 5 отделяются пузырьки воздуха 6. Возмущения магнитного поля, вызванные колебаниями стенок пузырька, регистрируется катушкой индуктивности 7, установленной на магните коаксиально контейнеру. Для регистрации колебаний в жидкости используется пьезопластинка 8. Сигналы от датчиков усиливаются системой усилителей 9, оцифровываются осциллографом 10 и обрабатываются на ПК 11 в специально разработанной в LabView программе. Для видеофиксации используется осветитель 12 и высокоскоростная камера 13, настроенная для съемки в проходящем свете.

В работе использовался редкоземельный кольцевой магнит (сплав NdFeB) с внутренним и внешним диаметрами 24 мм и 60 мм, соответственно, и толщиной 10 мм. Моделирование магнитного поля кольцевого магнита выполнено в программной среде MATLAB [15] (рис. 1 б).

В качестве исследуемых образцов использовалась концентрационная серия коллоидов, полученная разбавлением образца МЖ-1 керосином (табл. 1).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВИДЕОФИКСАЦИИ ДИНАМИКИ ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

В работе проведен эксперимент по видеофиксации межфазной границы воздух — МЖ при придавливании воздушной полости (рис. 2). Рассматривались этапы эволюции поверхности полости во время отрыва пузырька для образцов МЖ1-4. По изменению формы и размера полости определялся размер отделившегося пузырька.

Электродинамическая модель «слабомагнитных тел», используемая для построения изображения воздушной полости в непрозрачной МЖ, основана на построении системы изолиний модуля напряженности магнитного поля и последующем выборе кривых изолиний, соответствующих расположению воздушной полости и напряженности магнитного поля на границе МЖ-воздух [16]. На рис. 1 б показана моделируемая поверхность полости внутри непрозрачной МЖ. Видно, что поверхность воздушной полости в тонком слое МЖ в исходном состоянии и после отрыва пузырька достаточно хорошо воспроизводит поверхность полости, смоделированной в рамках электродинамической модели. Верхняя часть межфазной границы жидкость-воздух практически повторяет геометрию изолиний модуля напряженности магнитного поля. Перед отрывом пузырька воздушная полость вытягивается вдоль оси, образуется «шейка», от которой происходит отрыв газового пузырька.

Одним из факторов, определяющим форму свободной поверхности МЖ в магнитном поле, являются ponderomotive силы [16]:

$$-\nabla p + \mu_0 M \nabla H = 0 \text{ или } -p + \mu_0 \int_{H_0}^H M dH = const, \quad (1)$$

где p — давление в жидкости, μ_0 — магнитная постоянная.

Если к жидкости применим линейный закон намагничивания $M = \chi H$, то

$$-p + \frac{1}{2} \mu_0 \chi (H^2 - H_0^2) = const, \quad (2)$$

В любом случае, включая ситуацию, при которой жидкость находится в магнитном насыщении $M = const$, свободная поверхность жидкости, определяемая условием $p_s = const$, будет соответствовать значениям $H_s = const$, то есть совпадать с изолиниями напряженности магнитного поля [16].

Если за точку отсчета напряженности магнитного поля взять точку, в которой она равна нулю, $H_0 = 0$, то

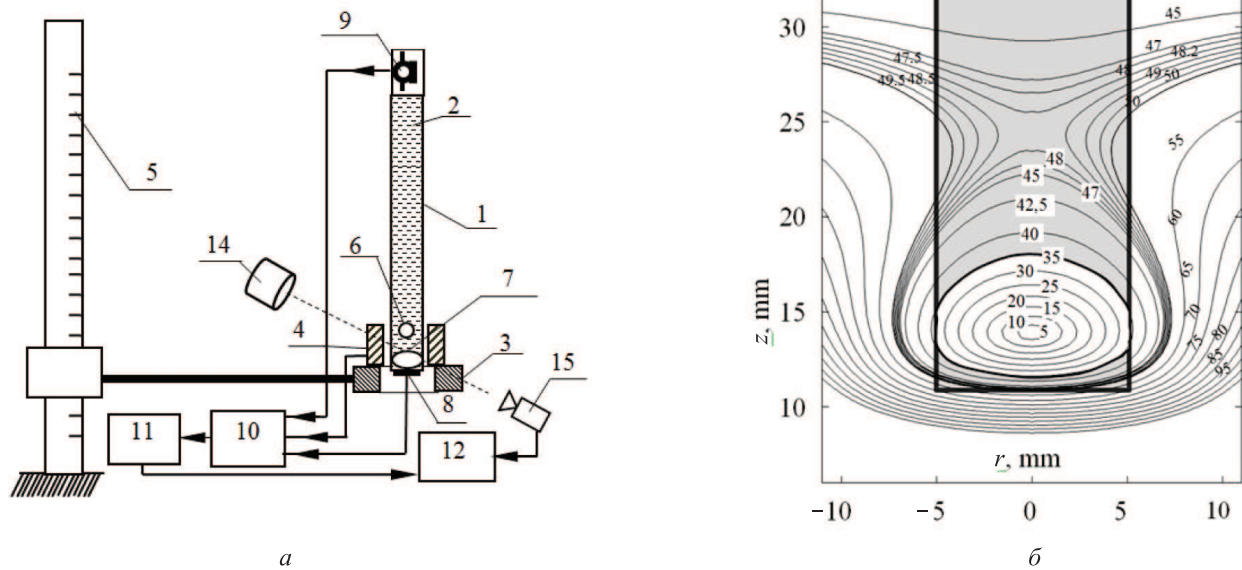


Рис. 1: Экспериментальная установка: а — блок-схема, б — моделирование магнитного поля кольцевого магнита

Таблица 1: Физические параметры образцов

	МЖ-1	МЖ-2	МЖ-3	МЖ-4
Плотность МЖ, ρ , кг/м ³	1245	1058	952	870
Концентрация объемная φ , %	10.56	6.32	3.93	2.08
Намагниченность насыщения M_s , кА/м	43.3	20.7	12.9	9.2
Вязкость МЖ, мПа·с	31.8	4.15	2.45	1.8

перепад давления, вызванный понеромоторными силами можно определить как:

$$\Delta p = \mu_0 M H_s, \quad (3)$$

Отрыв пузырька от газовой полости происходит вследствие изменения перепада давления, обусловленного магнитными силами, силой тяжести и силой поверхностного натяжения.

Для оценки вклада каждого из этих компонентов в приращение давления рассмотрим отрыв первого пузырька от образцов МЖ-1, МЖ-4. Примем, что: коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 2 \cdot 10^{-2}$ Н/м; высота столбика МЖ, $h = 15 \cdot 10^{-2}$ м; напряженность магнитного поля определяется изолинией, ограничивающей полость; радиусы искривления поверхности для каждого из образцов выделены на рис. 2 видеофиксации полости; толщина канала 2 мм; намагниченность жидкости представлена в таблице 1. Получаем, что перепад давления, обусловленный магнитными силами, согласно формуле 3: $\Delta p_1 = 2.2 \cdot 10^2$ Па, $\Delta p_4 = 3.5 \cdot 10^2$ Па. Перепад давления, вызванный силой тяжести: $\Delta p_{g1} = 1.3 \cdot 10^3$ Па, $\Delta p_{g4} = 1.8 \cdot 10^3$ Па. Перепад давления, обусловленный поверхностным натяжением $\Delta p_{\sigma 1} = 7.1$ Па, $\Delta p_{\sigma 4} = 2$ Па.

Если гидростатический перепад давления в пределах опыта не изменяется, то именно давление, связанное с пондеромоторными силами действия неоднородного магнитного поля, обуславливает выход на «критическое» значение давления в воздушной полости и отрыв пузырьков.

3. АКУСТИКА ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Для изучения взаимодействия физических полей при придавливании воздушной полости в МЖ неоднородным полем кольцевого магнита осуществляется фиксация электромагнитных колебаний катушкой индуктивности и сигнала от пьезоэлемента (рис. 3).

Верхний сигнал получен с катушки индуктивности, а нижний — с пьезоэлемента. Развертка осциллограммы по горизонтали на каждое деление составляет 5 мс. Из осциллограмм видно, что сигналы имеют одинаковую частоту заполнения. Относительно высокая частота заполнения принятых импульсов связана с тем, что при отрыве пузырька от воздушной полости в МЖ его стенки совершают быстропеременные радиальные ко-

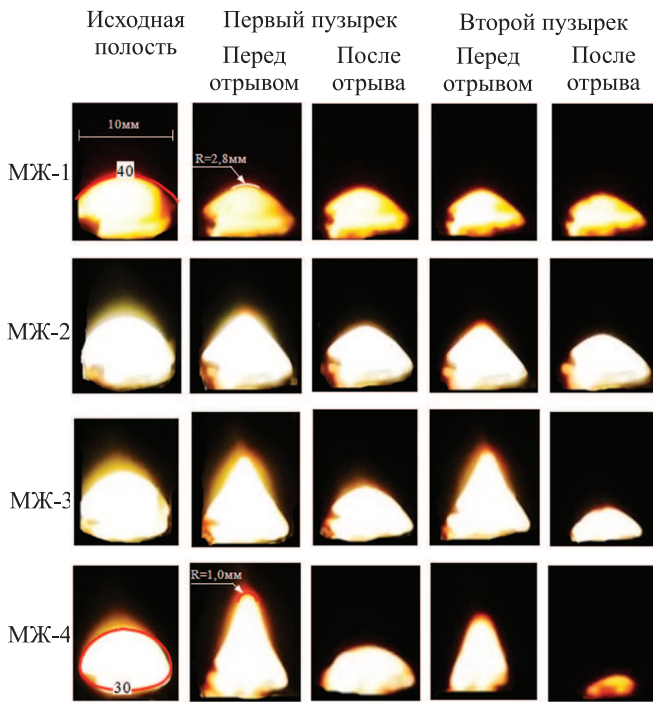


Рис. 2: Результаты видеофиксации межфазной границы воздух-МЖ при придавливании воздушной полости

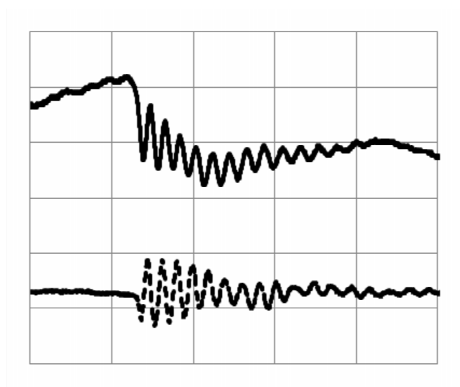


Рис. 3: Пример осциллограммы, фиксируемой при прорыве пузырька

лебания.

Полученная экспериментально зависимость частоты заполнения сигнала от номера оторвавшегося пузырька представлена на рис. 4. Погрешность определения частоты колебаний составила порядка 5%.

Из известной работы [7] частота колебаний стенок всплывающего пузырька определяется из выражения:

$$\nu = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}, \quad (4)$$

где R_0 — радиус пузырька, P_0 — гидростатическое давление, $\gamma = C_p/C_v$ — отношение удельных теплоемко-

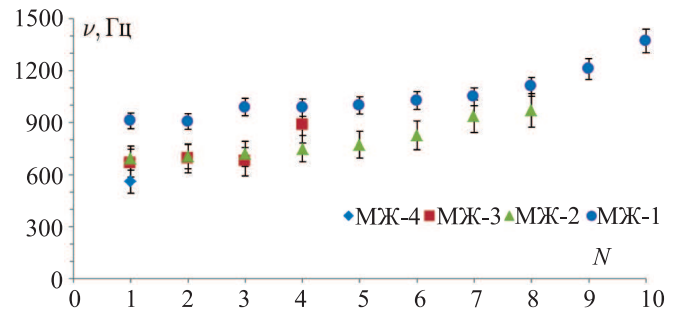


Рис. 4: Зависимость частоты принятого сигнала от номера оторвавшегося пузырька

стей газа в пузырьке, ρ — плотность МЖ.

Откуда:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}. \quad (5)$$

Для рассматриваемого случая учтено, что $P_0 \gg 2\sigma/R_0$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения МЖ).

На основе экспериментальных данных (рис. 4) и выражения (2) построены зависимости среднего размера пузырьков от их порядкового номера и концентрации МЖ (рис. 5 а, б). Вместе с тем, на основе данных видеофиксации также получены зависимости размера пузырька от времени отрыва (рис. 5 в) и концентрации (рис. 5 г). При сравнении зависимостей (рис. 5 а, б, в, г) видно, что оба эксперимента (акустомагнитная индикация размеров пузырька по частоте колебаний в трубке и по данным видеофиксации в плоском канале) дают сопоставимые по порядку величины данные о размере всплывающих в МЖ пузырьков.

Для обоих экспериментов характерно то, что для малоconцентрированных МЖ образуется относительно малое количество газовых пузырьков, но при этом их диаметр больше. Для концентрированных МЖ, наоборот, наблюдается образование большого числа пузырьков маленького диаметра. Для МЖ с малой концентрацией характерен также большой разброс значений как размера пузырька, так и времени его отрыва. Если в эксперименте с видеофиксацией в плоском канале для образца МЖ-1 с намагниченностью насыщения 43.3 кА/м от воздушной полости до ее исчезновения отделяется 5 пузырьков, то для МЖ-4 с намагниченностью насыщения 9.2 кА/м наблюдается всего 2 пузырька. В эксперименте с акустомагнитной индикацией оторвавшихся пузырьков в трубке для образца МЖ-1 регистрируется только 1 пузырек, а для образца МЖ-4 регистрируется 10 пузырьков. Можно сказать также, что с уменьшением намагниченности используемого образца МЖ отделение каждого следующего пузырька приводит к изменению объема воздушной полости на большую величину.

На качественном уровне можно показать, что причиной такой тенденции является изменение объема пор-

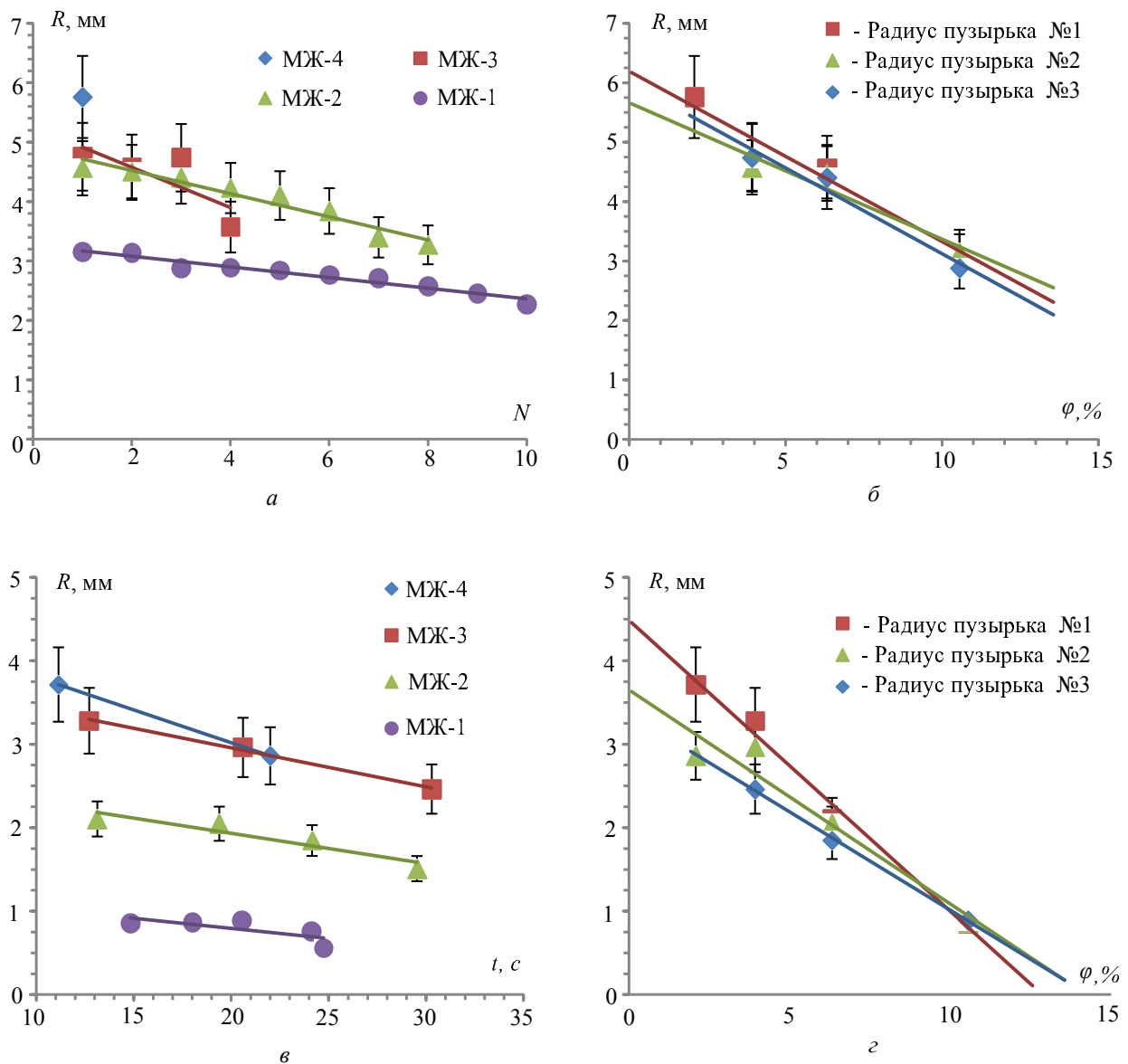


Рис. 5: Зависимость радиуса пузырька от порядкового номера, времени отрыва и концентрации: a, b — акустимагнитная индикация, v, z — видеофиксация

ции воздуха, уходящей из воздушной полости, при которой происходит переход свободной поверхности между изолиниями напряженности магнитного поля. Выше из проведенных оценок перепада давления получено, что именно давление, связанное с пондеромоторными силами, обуславливает выход на «критическое» значение давления и отрыв пузырька от воздушной полости. В соответствии с выражением (3) переход поверхности с изолинии 1 на изолинию 2 сопровождается приращением давления:

$$\Delta p_{1-2} = \mu_0 M (H_{s1} - H_{s2}). \tag{6}$$

С другой стороны известно, что давление газа в оторвавшемся сферическом пузырьке повышается по срав-

нению с давлением в полости на величину капиллярного скачка давления

$$\Delta p_r = 2\sigma/R, \tag{7}$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения МЖ, R — радиус пузырька.

Прорыв пузырька будет иметь место тогда, когда эти перепады давления сравниваются между собой $\Delta p_{1-2} = \Delta p_r$, что определяет собой радиус образующегося пузырька:

$$R = 2\sigma/\mu_0 M (H_{s1} - H_{s2}). \tag{8}$$

Таким образом, с увеличением M уменьшается радиус отрывающегося пузырька, что согласуется с экспериментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована динамика придавливания воздушной полости в МЖ неоднородным магнитным полем кольцевого магнита, при которой от полости отделялись газовые пузырьки. Для детализации механизма отрыва пузырьков от газовой полости поставлен эксперимент по видеофиксации раздела фаз газ - МЖ в плоском тонком канале. Показано, что межфазная граница выстраивается вдоль изолинии модуля напряженности магнитного поля. В качестве причины отрыва пузырьков рассматривается изменение перепада давления внутри газовой полости, обусловленного как магнитными силами, так и силой тяжести и поверхностным натяжением. Произведена оценка вклада каждого из компонентов. Перепад давления в жидкости, обусловленный магнитными силами в пределах области «магнитного вакуума», на несколько порядков превышает перепад давления, обусловленный силами поверхностного натяжения.

Экспериментально осуществлялась фиксация частоты электромагнитных колебаний, вызванных возмуще-

нием магнитного поля колебаниями стенок всплывающего пузырька в МЖ. На основе двух экспериментов (акустомагнитная индикация размеров пузырька по частоте колебаний в трубке и по данным видеофиксации в плоском канале) построены зависимости размера пузырька от порядкового номера и концентрации МЖ, которые дают сопоставимые по порядку величины данные. Для обоих экспериментов характерно то, что для малоцентрированных МЖ наблюдается образование малого количества газовых пузырьков большого диаметра. Для концентрированных МЖ, наоборот, имеет место большое количество пузырьков с относительно малым размером. Получено соотношение, показывающее тенденцию уменьшения радиуса пузырьков с увеличением концентрации (намагниченности насыщения) МЖ.

Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ. Код проекта 3.8949.2017/БЧ, № 3.2751.2017/ПЧ и гранта Президента РФ МК-1393.2019.8.

-
- [1] Шлюмис М. И. // УФН. 1974. **112**. №. 3. С. 427.
 - [2] Rosensweig R. E. New York, Melbourne. 1985.
 - [3] Бибик Е. Е. // Коллоидный журнал. 1973. **35**. №. 6. С. 1141.
 - [4] Dunne P., Adachi T., Sorrenti A., Coey J. M. D., Doudin B., Hermans T. ChemRxiv Preprint. 2018.
 - [5] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. в 2-х частях. М.: Наука, 1987.
 - [6] Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1959.
 - [7] Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008.
 - [8] Ishimoto J., Okubo M., Kamiyama S., Higashitani M. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 1995. **38**. N. 3. P. 382.
 - [9] He Y. Q., Bi Q. C., Shi D. X. // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2011. **7**. N. 4. P. 357.
 - [10] Bashtovoi V., Kovalev M., Reks A. // Journal of magnetism and magnetic materials. 2005. **289**. P. 350.
 - [11] Korlie M. S., Mukherjee A., Nita B. G., Stevens J. G., Trubatch A. D., Yecko P. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. **20**. N. 20. 204143.
 - [12] Tian X. H., Shi W.-Y., Tang T., Feng L. ISIJ International. 2015. ISIJINT-2015-493.
 - [13] Dizaji A. S., Mohammadpourfard M., Aminfar H. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. **449**. P. 185.
 - [14] Polunin V. M., Ryapolov P. A., Ryabtsev K. S., Postnikov E. B., Bridskiy A. V., Sokolov E. A., Khudyakov A. N. Air cavity captured by magnetic fluid in magnetic vacuum of annular magnet. 2018.
 - [15] Polunin V. M., Ryapolov P. A., Ryabtsev K. S., Kobelev N. S. // Russian Physics Journal. 2018. **61**. N. 7. P. 1347.
 - [16] Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н., Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: ИВТАН. 1985.

Hydrodynamics of gas bubbles in a flat channel filled by a magnetic liquid in a nonuniform magnetic field

P. A. Ryapolov^a, V. M. Polunin^b, E. A. Sokolov^c

Southwest State University (SWSU). Kursk 305040, Russia

E-mail: ^apolunin-vm1@yandex.ru, ^br-piter@yandex.ru, ^cevgeniysokolov1@yandex.ru

Magnetic, acoustic and thermophysical phenomena in magnetofluid systems have found application in the design of magnetofluid sealants, shock absorbers, sensitive triaxial accelerometers, density meters, and a number of other progressive devices. This explains the interest in studying these effects. In recent years, due to the rapid development of microfluidics, there are more and more works on the dynamics of magnetic fluids in channels of various shapes, under various influences of external physical fields. However, the properties of the levitating gas cavity, as well as magnetic, acoustic and thermophysical phenomena accompanying the dynamic

movements of gas cavities and bubbles in the MJ have been studied very superficially, although potentially of great scientific and practical interest.

To conduct experiments, a special installation was created using a system of high-speed video recording of the experiment results, as well as the registration of electromagnetic and acoustic disturbances with subsequent processing.

The dynamics of bubbles capture by magnetic fluid in the region of «magnetic vacuum» of the ring magnet is investigated. The data on the influence of the concentration of magnetic fluid on the strength of magnetic fluid jumpers under the influence of external pressure are obtained. This information can be useful for the development of a test bench for the magnetic fluid used in the dock, where the fluid experiences a similar effect.

For a series of samples of magnetic fluid, an experiment on the pressure of the air cavity was carried out, as a result of which gas bubbles were separated. Electromagnetic and acoustic disturbances arising from the ascent of a non-magnetic bubble in the MJ were recorded. On the basis of these data the sizes of bubbles are determined by known expressions, distribution of bubbles on the sizes is constructed. The obtained data are compared with the results of video recording. Conclusions about the influence of the physical parameters of the magnetic fluid and the configuration of the magnetic field on the diameter of the resulting bubbles.

PACS: 75.50.Mm, 62.60.+v, 62.10.+s, 51.40.+p

Keywords: magnetic fluid, interaction of fields, multiphase systems, acoustomagnetic indication, inhomogeneous magnetic field.

Received 15 November 2019.

Сведения об авторах

1. Полунин Вячеслав Михайлович — доктор физ. -мат. наук, профессор;
e-mail: polunin-vm1@yandex.ru.
 2. Ряполов Петр Алексеевич — канд. физ. -мат. наук, доцент каф. НТОиПФ; e-mail: r-piter@yandex.ru.
 3. Соколов Евгений Александрович — лаборант каф. НТОиПФ; e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru.
-