

УДК 538.93

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОТРЫВ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

© 2023 г. П. А. Ряполов¹, *, Е. А. Соколов¹, Д. А. Калюжная¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Юго-Западный государственный университет”, Курск, Россия

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

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Исследован процесс отрыва газовых пузырьков в вертикальном канале, заполненном магнитной жидкостью, от газовой полости в неоднородном магнитном поле. Рассмотрено поведение межфазной границы воздух–магнитная жидкость в момент отрыва, приведены зависимости размера отрывающихся пузырьков от конфигурации магнитного поля, концентрации магнитной жидкости и толщины канала.

DOI: 10.31857/S0367676522700612, EDN: HFVMHG

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительное количество работ, посвященных динамике магнитно-жидкостных систем, содержащих газовые и жидкие немагнитные включения, в большинстве из них рассматривается влияние либо однородных магнитных полей [1–3], либо неоднородных магнитных полей простой конфигурации [4, 5]. В настоящее время почти нет работ, в которых рассматривались бы магнитно-жидкостные системы под воздействием неоднородных магнитных полей специальной конфигурации, содержащие область магнитного вакуума, в которой наблюдается магнитная левитация. Это объясняется сложностью эксперимента (магнитные жидкости оптически непрозрачны) [6, 7]. Прямое наблюдение за динамикой немагнитных включений в системах с магнитной жидкостью возможно только в тонких оптических прозрачных каналах или измерительных ячейках с использованием высокоскоростных систем видеозаписи.

Целью данной работы является исследование влияния на процесс отрыва газовых пузырьков в магнитной жидкости (МЖ) ее физических параметров, толщины канала, ограничивающего многофазную систему, и конфигурации магнитного поля. В качестве его источника используется комбинация из двух магнитов: постоянного кольцевой формы и электромагнита с управляемым источником питания. Полученные результаты послужат основой для развития систем “label-free” манипуляции немагнитными объектами в

магнитной жидкости с помощью магнитных полей [8–10].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проведен на установке, схема которой представлена на рис. 1. Плоский стеклянный канал 1, толщина которого варьировалась от 1 до 5 мм, установлен вертикально с помощью системы немагнитных крепежных элементов и заполнен образцом МЖ с помощью шприца

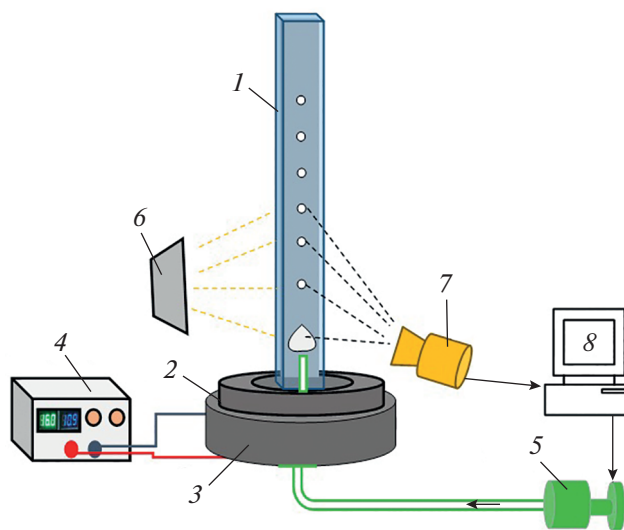


Рис. 1. Блок-схема специализированной экспериментальной установки.

с немагнитной иглой. В качестве источника неоднородного магнитного поля использован кольцевой постоянный магнит 2 (NdFeB $60 \times 24 \times 10$ мм), помещенный сверху электромагнита 3 и установленный соосно оси канала. Изменение магнитного поля электромагнита обеспечивает источник питания 4. Для подачи газа в область “магнитного вакуума” [8, 11] подведен гибкий капилляр от шприцевого насоса 5. В качестве источника света использован управляемый светодиодный осветитель 6. Запись динамики немагнитных газовых включений реализована в проходящем свете с помощью высокоскоростной камеры 7 (Nikon 1), подключенной к компьютеру 8.

Для обработки полученных видео и фотоизображений в программной среде National Instruments LabView разработан комплекс программ для управления экспериментальной установкой, обработки данных видеофиксации на основе алгоритмов машинного зрения, исследования динамики немагнитных включений в МЖ, а также поведения межфазной граница газ–МЖ в магнитожидкостных системах.

В работе исследованы магнитные жидкости на основе магнетита Fe_3O_4 , стабилизированного олеиновой кислотой. Керосин использовался в качестве жидкости-носителя. Образец МЖ-1 изготовлены в Ивановском государственном энергетическом университете. Образцы МЖ-2–МЖ-4 были получены путем разбавления МЖ-1 с помощью керосина ТС-1. Физические параметры образцов представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенного эксперимента по видеофиксации межфазной границы воздух–МЖ представлены на рис. 2 для образца МЖ3. Рассматривались этапы эволюции поверхности при отрыве воздушного пузырька от воздушной полости, находящейся в области “магнитного вакуума” неоднородного магнитного поля, создаваемого кольцевым постоянным магнитом. Момент отрыва показан на четвертом кадре.

Видно, что наибольшую площадь поверхности отрывающийся газовый пузырек имеет для наименьшей толщины канала в 1 мм, что можно объяснить влиянием поверхностного натяжения. Однако при пересчете на объем оторвавшегося пузырька, который определялся как разность площади левитирующей газовой полости до и после отрыва пузырька, умноженной на толщину канала, получается, что объем оторвавшегося пузырька увеличивается с увеличением толщины канала, что представлено на рис. 3а. На рис. 3б представлена зависимость объема отрывающегося пузырька для образцов МЖ1–МЖ4 от силы тока в электромагните. Эксперимент проведен в ка-

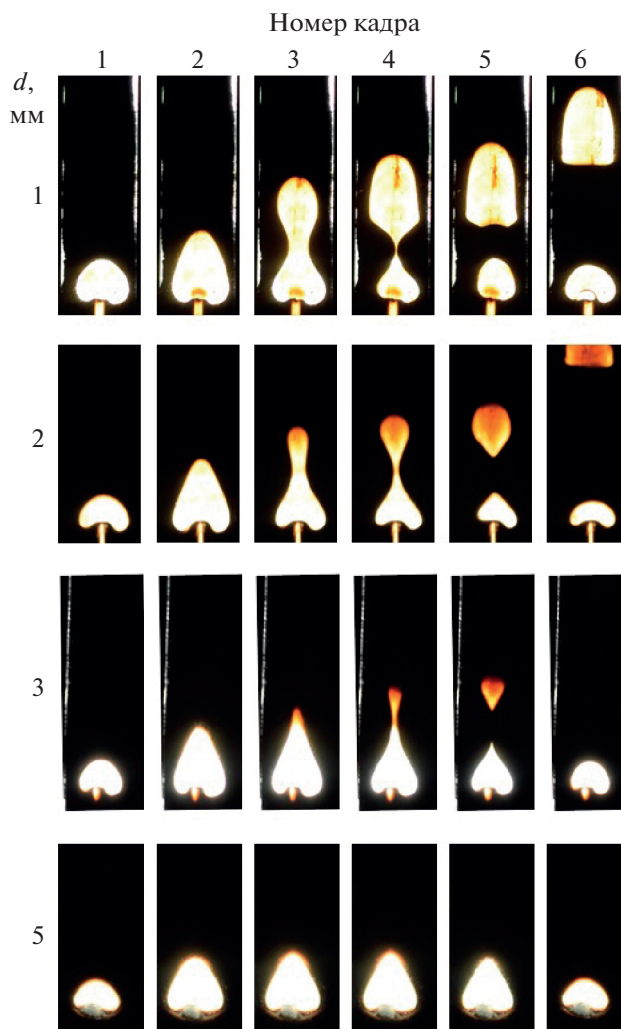


Рис. 2. Скоростная видеофиксация в образце МЖ3 динамики межфазной границы воздух–МЖ при отрыве пузырька от воздушной полости для различной толщины канала

нале толщиной 1 мм. Из графиков видно, что объем газового пузырька обратно пропорционален концентрации твердой фазы магнитной жидкости и силе тока в электромагните.

Механизм отрыва пузырька можно объяснить на основе конфигурации магнитного поля, результаты моделирования изолиний которого представлены на рис. 4. На них наложен контур

Таблица 1. Физические параметры образцов

	МЖ1	МЖ2	МЖ3	МЖ4
ρ , кг/м ³	1382	1078	936	853
φ , %	12.9	6.8	3.6	1.7
M_s , кА/м	49	24.1	12.5	6.1

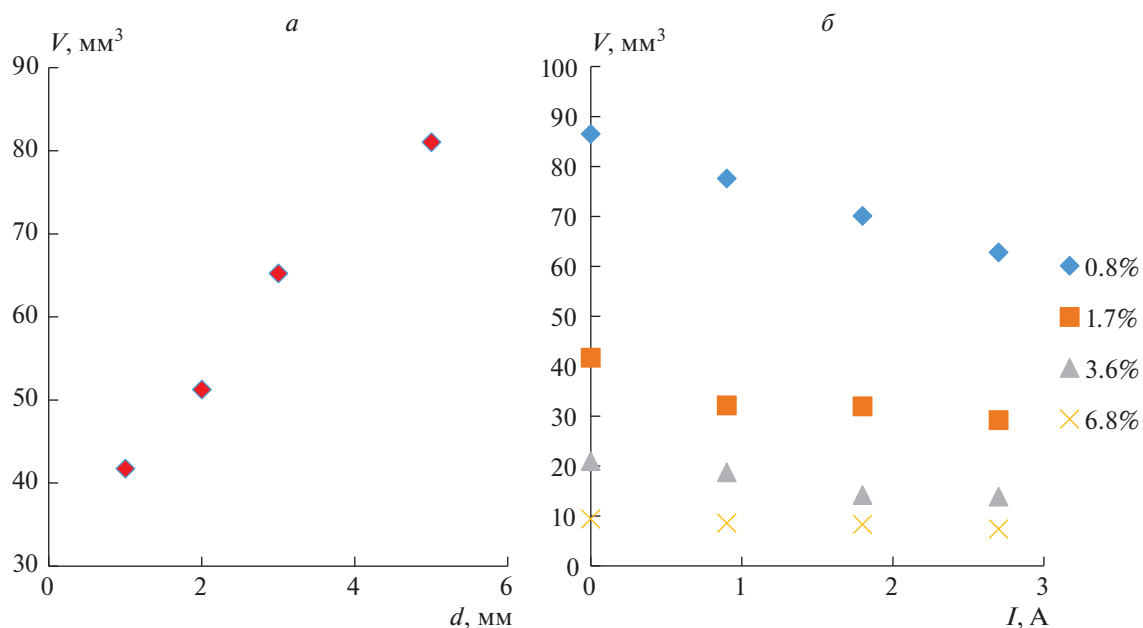


Рис. 3. Зависимость размера газовых пузырьков от толщины канала для образца МЖ3 (а), от силы тока в электромагните для образцов МЖ2–МЖ4.

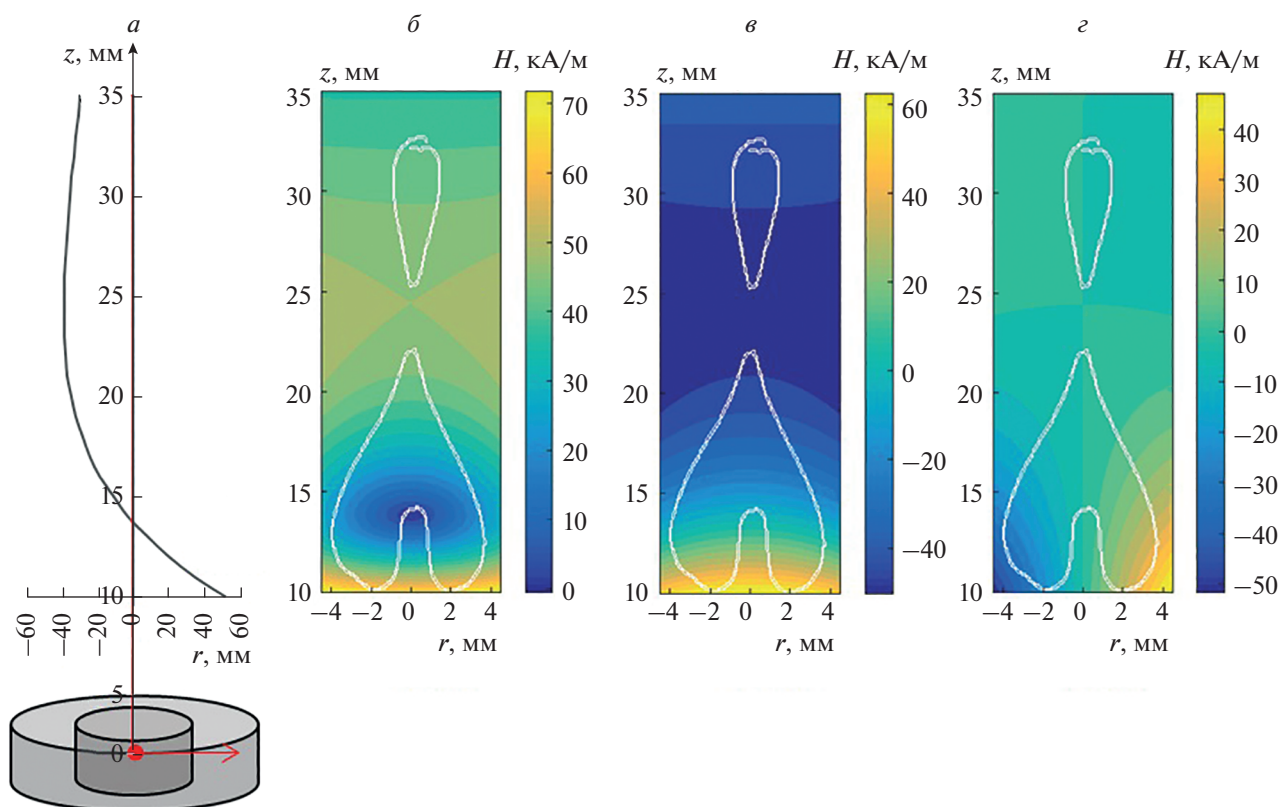


Рис. 4. Геометрия эксперимента (а), с расположением магнита, размеры которого представлены схематично, а также топология внешнего неоднородного магнитного поля в kA/m (его абсолютное значение (б), вертикальная (в) и радиальная (г) составляющие), совмещенная с изображением воздушной полости и пузырька в плоском канале, заполненном МЖ.

воздушной полости и оторвавшегося от нее газового пузырька. Из анализа результатов, представленных на рис. 2, видно, что воздух, поступающий из отверстия капилляра, образует полость, которая захвачена неоднородным магнитным полем внутри магнитной жидкости. В этой конфигурации магнитного поля немагнитный объект может занимать устойчивое положение только в области минимума напряженности магнитного поля, поскольку несжимаемая магнитная жидкость, притягиваемая к областям с большей величиной напряженности магнитного поля, приводит к созданию разрежения в области “магнитного вакуума” неоднородного магнитного поля. Приток воздуха вызывает вертикальное удлинение полости, что снова объясняется топологией магнитного поля. Из данных, представленных на рис. 4в, видно, что интенсивность осевой составляющей напряженности магнитного поля растет с удалением от области “магнитного вакуума”, где эта составляющая равна нулю, до достижения максимального значения 48.1 кА/м в области между значениями вертикальных координат примерно равных 20 и 28 мм. Из изображения межфазной границы воздух–МЖ видно, что вершина “шейки” воздушной полости, от которой происходит отрыв газового пузыря, находится именно в области максимального значения осевой составляющей неоднородного магнитного. При дальнейшем удалении осевая составляющая напряженности магнитного уменьшается, и пондеромоторная сила меняет направление, вытягивая газ из полости, образуя воздушный пузырь. Теперь к обычной плавучести воздушного пузырька в МЖ добавляется пондеромоторная сила, и пузырек должен всплыть. Однако отделение этого пузырька от основной полости задерживается, поскольку соединяющий их воздушный канал представляет собой туннель в МЖ, в котором магнитное поле практически тангенциально к поверхности МЖ, что обеспечивает стабилизацию последней в дополнение к капиллярным силам. Это позволяет с помощью управляемого источника магнитного поля регулировать объем пузыря в зависимости от взаимодействия между силами, стабилизирующими пузырек и перемычку. При дальнейшем наполнении пузырька соответствующим объемом воздуха он отделяется от полости и всплывает. В результате можно сделать вывод, что такую систему можно использовать не только для изучения фундаментальных явлений в гидродинамике магнитожидкостных систем, но и в качестве микродозатора или газового счетчика для приложений микрофлюидики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был исследован процесс отрыва пузырьков от воздушной полости в вертикальном канале в неоднородном магнитном поле, создаваемым комбинированным источником в виде постоянного магнита кольцевой формы и электромагнита. Было показано, что конфигурация неоднородного магнитного поля, физические параметры магнитной жидкости и толщина канала влияют на динамику процесса отрыва газовых пузырьков и их размер. Рассмотрен механизм отрыва газовых пузырьков в неоднородном магнитном поле, где определяющую роль играет пондеромоторная сила, которая меняет свое направление в неоднородном магнитном поле рассмотренной конфигурации. Экспериментально продемонстрирована возможность управления размером немагнитных газовых включений путем изменения параметров магнитного поля, концентрации магнитной жидкости и толщины канала, что может быть использовано в различных технических устройствах.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00311).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bashtovoi V., Kovalev M., Reks A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2005. V. 289. P. 382.
2. *Malvar S., Gontijo R.G., Cunha F.R.* // J. Eng. Math. 2018. V. 108. P. 143.
3. *Yamasaki H., Kishimoto T., Tazawa T. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 501. Art. No. 166446.
4. *Боев М.Л., Полунин В.М., Ряполов П.А. и др.* // Изв. вузов. Физ. 2014. Т. 57. № 10. С. 47; *Boev M.L., Polunin V.M., Ryapolov P.A. et al.* // Russ. Phys. J. 2014. V. 57. No. 10. P. 1348.
5. *Полунин П.А., Ряполов К.С., Рябцев К.С. и др.* // Изв. вузов. Физ. 2018. Т. 61. № 7(727). С. 147; *Polunin V.M., Ryapolov P.A., Ryabtsev K.S. et al.* // Russ. Phys. J. 2018. V. 61. No. 7. P. 1347.
6. *Rosensweig R.E.* Ferrohydrodynamics. N.Y.: Courier Corporation, 2013. 368 p.
7. *Закинян А.А., Бельх С.С., Закинян А.Р., Ерин К.В.* // Опт. журн. 2021. Т. 88. № 3. С. 61; *Zakinyan A.A., Belykh S.S., Zakinyan A.R., Yerin K.V.* // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. No. 3. P. 158.
8. *Gao Q.H., Zhang W.M., Zou H.X. et al.* // Mater. Horiz. 2019. V. 6. No. 7. P. 1359.
9. *Frenea-Robin M., Marchalot J.* // Magnetochem. 2022. V. 8. No. 1. P. 11.
10. *Cheng K. Guo J., Fu Y. et al.* // Sens. Actuators A. 2021. V. 322. Art. No. 112616.
11. *Sokolov E., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Ryapolov P.* // AIP Advances. 2022. V. 12. No. 3. Art. No. 035333.

Effect of the magnetic field configuration on the detachment of gas bubbles in a magnetic fluid

P. A. Ryapolov^{a, *}, E. A. Sokolov^a, D. A. Kalyuzhnaya^a

^a Southwest State University, Kursk, 305040 Russia

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

The process of detachment of gas bubbles in a vertical channel filled with a magnetic fluid from a gas cavity in uniform magnetic field is studied. The behavior of the air–magnetic fluid interface now of separation is considered and dependences of the size of the detached bubbles on the configuration of the magnetic field, concentration of the magnetic fluid, and channel thickness are shown.