

УДК 538.951

**ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ
ЖИДКОСТЕЙ В ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА***Полунин Вячеслав Михайлович, д.ф.-м.н., профессор**(e-mail: poluninvm1@gmail.com)**Ряполов Петр Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент**(e-mail: r-piter@yandex.ru)**Рябцев Кирилл Сергеевич, аспирант,**(e-mail: ceed_13@mail.ru)**Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Россия**Моцар Александр Александрович, ассистент,**(e-mail: alexfx20@yandex.ru)**Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Беларусь*

Обсуждаются результаты экспериментального изучения захвата, транспорта и последующего разрушения воздушной полости на пузырьки магнитной жидкостью в области «магнитного вакуума» кольцевого магнита. Исследование выполнено с применением акустомагнитного метода. Получаемые пузырьки имеют относительно крупные размеры, что расширяет возможности управляемой магнитным полем дозированной подачи малых количеств газа в реактор.

Ключевые слова: магнитная жидкость, газожидкостные системы, газовая упругость, пондеромоторная упругость

Введение

Уникальное сочетание способности магнитных жидкостей (МЖ) взаимодействовать с магнитным полем и текучести жидкости представляет не только научный интерес, но являются основой для многочисленных применений. В последнее десятилетие все в большей мере привлекают внимание исследователей вопросы использования микро- и нанодисперсных МЖ для решения специфических задач управляемого магнитным полем демпфирования вибраций, герметизации объемов газа, дозированной подачи малых порций газа в реактор, прерыватели и клапаны в микроразорах, относящиеся к проблематике микромасштабной мехатроники [1-6].

Для высококачественного мониторинга процесса дозированной подачи малых порций газа представляют интерес результаты исследования явления отрыва воздушного пузырька от полости, удерживаемой в МЖ и сдвинутой пондеромоторными силами магнитного поля, сопровождаемого появлением акустических и магнитных колебаний [7, 8]. При этом частота колебаний ν соответствует известному в теории акустической кавитации выражению для частоты радиальных колебаний пузырька воздуха [9]:

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

где R_0 – радиус пузырька, P_0 – гидростатическое давление, $\gamma = C_p/C_v$ – отношение удельных теплоемкостей газа в пузырьке, ρ – плотность МЖ.

В условиях эксперимента, подробно описанного в [10], воздушная полость, получена путем захвата управляемым потоком намагниченной жидкости порции воздуха с поверхности столбика МЖ. От воздушной полости, прижатой к доньшку трубки пондеромоторными силами магнитного поля, при достижении критического давления отрывается пузырек. Оказавшись за пределами «магнитного барьера», воздушный пузырек совершает упругие радиальные колебания в магнитном коллоиде, сопровождаемые возмущением магнитного поля.

Однако радиусы пузырьков, полученных в [7-8] в МЖ с различной вязкостью, находятся в пределах 1,1 – 2,2 мм. В прикладном аспекте возникает необходимость расширения диапазона размеров отделяемых пузырьков от полости. Поскольку речь идет об изучении новых возможностей взаимодействия МЖ с магнитным полем, то в исследованиях данного направления заинтересованы отрасли физической науки как физическая акустика и магнитная гидродинамика.

В настоящей работе для расширения диапазона размеров получаемых пузырьков используется участок магнитного поля с «нулевой» напряженностью кольцевого магнита – область «магнитного вакуума», а в качестве основного экспериментального метода исследования процесса захвата, транспорта и деления магнитной жидкостью воздушной полости применяется метод акустомагнитной индикации.

Экспериментальная установка и методика измерений

На рисунке 1 дано схематическое изображение экспериментальной установки.

На рисунке показаны: 1 – трубка с магнитной жидкостью, 2 – катушка индуктивности, 3 – кольцевой магнит, 4 – воздушная полость, 5 – пьезоэлемент, 6 – перемещающее устройство, 7 и 8 – усилители сигнала, 9 – цифровой осциллограф. Пьезоэлемент типа ПЭУ 16х2,0 с основной резонансной частотой 1 МГц помещен в электроизолирующий экран, изготовленный из тонкой медной фольги.

На рисунке 2 а показано положение магнита в процессе движения после перемещения его из начального положения.

Магнит поднимается с постоянной скоростью 0,8 мм/с вверх. При сокращении расстояния от поверхности магнита до свободной поверхности столбика МЖ поверхность жидкости начинает искривляться под воздействием магнитного поля (рисунок 2 б). Дальнейший медленный (~0,02мм/с) подъем магнита приводит к образованию полости большего размера (рисунок 2 d), герметизация которой затем нарушается (рисунок 2 е).

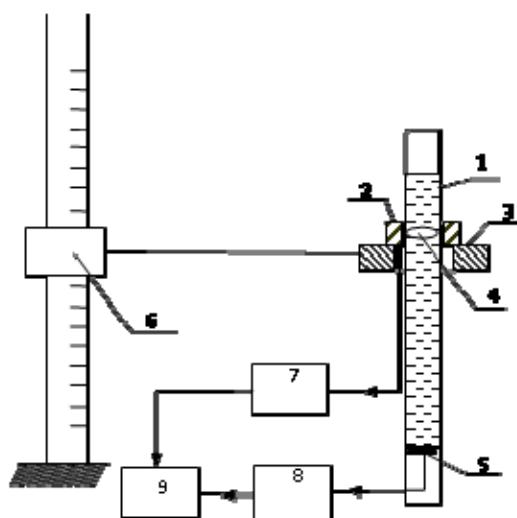


Рисунок 1 - Блок-схема экспериментальной установки

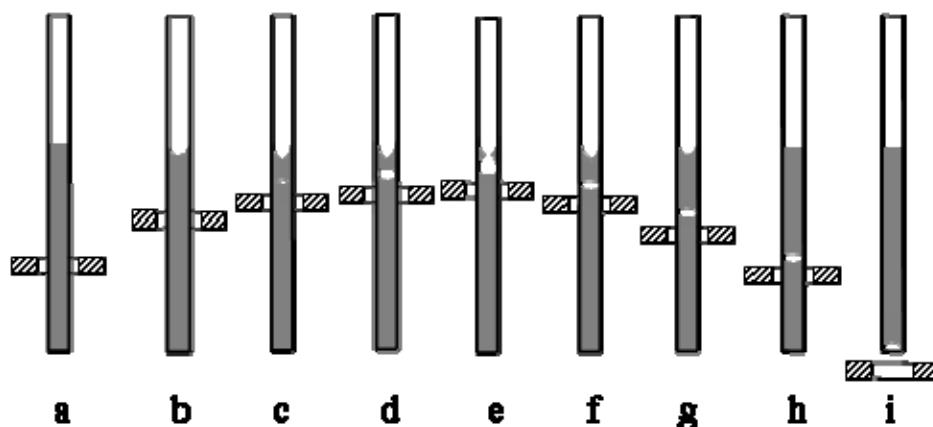


Рисунок 2 - Процесс захвата воздушной полости магнитной жидкостью

Восстановление перемычки (герметизация полости) происходит при последующем опускании магнита сразу или после небольшого на $\sim 2 - 3$ мм перемещения его вверх (рисунок 2 f). Подъем магнита на большую величину приводит к образованию второй воздушной полости (под магнитом) за счет проскальзывания первой полости вниз через магнитный барьер в центре магнита. В процессе опускания магнита с постоянной скоростью $\sim 0,8$ мм/с перемычка за счет перетекания МЖ превращается в сплошной столбик (рисунок 2 g), хотя свободная поверхность МЖ остается искривленной. При высоте столбика МЖ ≥ 90 мм поверхность жидкости выпрямляется (рисунок 2 h), а воздушная полость следует за магнитом, находясь по близости от «магнитного вакуума». При дальнейшем опускании магнита и выхода на уровень «ниже трубки с МЖ» воздушная полость прижимается неоднородным магнитным полем к доньшку (рисунок 2 i).

В качестве основного экспериментального метода исследования процесса захвата, транспорта и деления магнитной жидкостью воздушной полости применяется метод акустомагнитной индикации, основанный на получении осциллограмм акустических и магнитных колебаний системы магнитная жидкость – изолированная воздушная полость. При анализе осциллограмм, фиксируемых в измерительном блоке, применяется программа, разработанная в среде NI LabVIEW.

Результаты эксперимента и анализ полученных данных

На рисунке 3 приведены осциллограммы акустических и магнитных колебаний, сопровождающих отрыв пузырьков от полости. Прессинг полости, прижатой к доньшку трубки неоднородным магнитным полем, производится на скорости перемещения магнита - 0.01 мм/с. На рисунке показаны осциллограммы магнитных колебаний - сверху, а осциллограммы акустических колебаний - снизу. Интервал времени между вертикальными маркерами 10 мс, частота колебаний 925 Гц. Для расчета радиуса пузырька используется выражение (1), переписанное в виде:

$$R_0 = (2\pi\nu)^{-1} \sqrt{3\gamma P_0 / \rho}$$

В рассматриваемом случае учтено, что $P_0 \gg 2\sigma / R_0$, где σ - коэффициент поверхностного натяжения МЖ. Сделано также допущение об отсутствии влияния стенок трубки на течение жидкости при пульсациях пузырька. Частота пульсаций пузырька ν определяется стандартным способом с использованием длительности n - числа полных колебаний. Получено, что радиус пузырька, зафиксированного под номером 7 при дроблении захваченной полости, $\sim 3,2$ мм. Заметим, что в работах [7, 8] на МЖ с различной вязкостью, в которых захваченная воздушная полость находилась «под магнитом», отделившиеся пузырьки имели преимущественно более мелкие размеры.

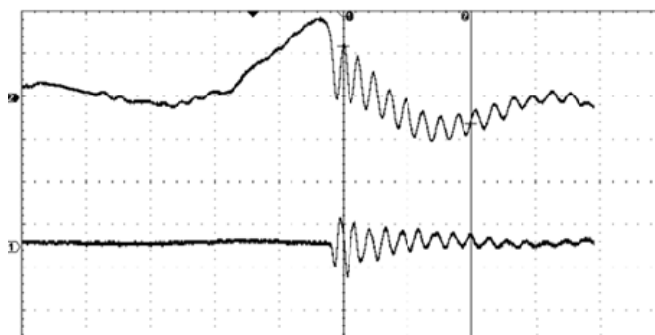


Рисунок 3 - Осциллограммы колебаний пузырька воздуха

По данным измерений частоты колебаний изучена также зависимость радиуса пузырька от его номера в порядке следования при дроблении захваченной воздушной полости. На рисунке 4 приведена зависимость радиуса пузырька R от его номера N в каждой серии измерений с отдельной полостью.

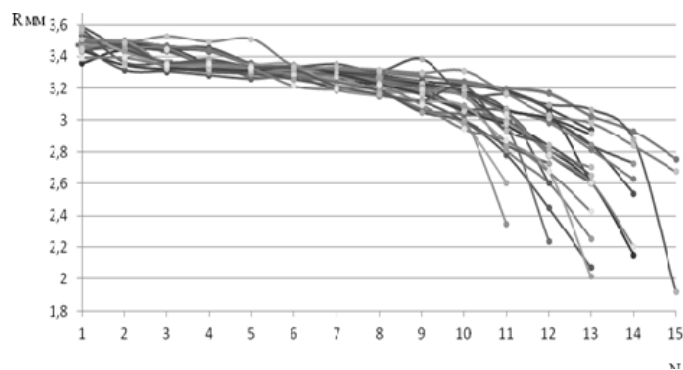


Рисунок 4 - Зависимость радиуса пузырька от его порядкового номера

Кружками показаны результаты измерений на базе данных для 350-ти пузырьков от 28 полученных воздушных полостей. Можно видеть, что радиусы первых в каждой серии оторвавшихся пузырьков находятся в пределах 3,3 – 3,6 мм. По мере сокращения объема полости (возрастание N) происходит уменьшение радиуса оторвавшегося пузырька R , что согласуется с результатами работ [7, 8].

Некоторые особенности процесса отрыва пузырька от полости на качественном уровне можно объяснить спецификой геометрии магнитного поля, в которой происходит образование полости и отрыв пузырьков от нее, а также кинетикой формы поверхности полости в перемещающемся магнитном поле. Отрыв происходит при равенстве силы поверхностного натяжения $F_\sigma = 2\pi r\sigma$ сумме архимедовой и пондеромоторной сил $F_\Sigma = \rho Vg + \mu_0 MV\nabla H$, достигаемом в данном случае при большем значении объема пузырька V . (Обозначения: g - ускорение свободного падения, M и ρ – намагниченность и плотность жидкости).

Высказанное в работе [8] допущение о влиянии кривизны поверхности полости на размеры пузырьков в данном случае объясняет значительное возрастание радиусов (с 1 мм до 3 мм) при использовании полости, захваченной в магнитном поле с «магнитным вакуумом», а также уменьшение размеров пузырьков в порядке их отрыва. Чем острее угол при вершине поверхности, тем меньше радиус шейки пузырька при его отрыве.

В процессе опускания магнита поверхность полости изменяет свою форму, переходя от более гладкой (округлой) формы к более вытянутой форме, иллюстрируемую переходом от изолинии 42,5 кА/м к изолинии 45 кА/м, с чем, по-видимому, связано уменьшение радиуса шейки отрывающегося пузырька и уменьшение объема пузырька.

Данная ситуация имеет сходство с процессом отрыва кавитационных пузырьков от поверхности излучателя с различной смачиваемостью [11]. Если жидкость слабо смачивает излучающую поверхность, то пузырьки должны расширяться вдоль поверхности, что затрудняет их отрыв силой радиационного давления.

Геометрия изолинии модуля напряженности магнитного поля отображает форму поверхности МЖ как [8], так и в настоящей работе, в том числе, на стадиях, предшествующей получению полости и отрыву пузырька. Отрыв более мелких по размерам пузырьков в [8] обусловлен «заостренной» конической формой поверхности полости. В то же время изолинии модуля напряженности в окрестности «магнитного вакуума», имеют форму, сходную с поверхностью эллипсоида, что способствует образованию более крупных пузырьков.

В 2017-м году исполняется столетний юбилей работы Рэлея по кавитации [12], в которой показана возможность жидкости с воздушными пузырьками «звучать». Имея ввиду магнитные жидкости, уместно дополнить список возможностей, в числе которых - генерация акустического и переменного магнитного поля, управляемость магнитным полем в устройствах макро - и микромасштабной мехатроники.

Заключение

В заключение сделаем несколько замечаний:

1. В качестве основного экспериментального метода исследования процесса захвата, транспорта и деления магнитной жидкостью воздушной полости применяется метод акустомагнитной индикации.

2. Диапазон размеров оторвавшихся от полости воздушных пузырьков расширен в сторону увеличения до $R \approx 3$ мм. Значительное увеличение размеров полученных пузырьков, а также тенденция уменьшения их в порядке отрыва от полости, возможно, связаны с особенностями формы полости и ее изменением в соответствии с концепцией «отображения» геометрией изолиний модуля напряженности магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 17-52-04025\17).

Список литературы

1. Wei Zhang, Jinghui Peng and Songjing Li Damping Force Modeling and Suppression of Self-Excited Vibration due to Magnetic Fluids Applied in the Torque Motor of a Hydraulic Servovalve // *Energies*, 2017, 10, pp. 749-759.
2. Lee J.H., Nam Y.J., Yamane R., Park M.K. Position feedback control of a nonmagnetic body levitated in magnetic fluid // *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. № 149. pp. 1–5.
3. Jie Yao, De Cai Li, Zhi Li Zhang, Jun Hui Zhang Study on the Structure of the Magnetic Fluid Damper // *Key Engineering Materials*, V.512-515 (2012), pp.1474-1478
4. Polunin V.M., Boev M.L., Myo Min Than, Ryapolov P.A. Experimental study of an air cavity held by levitation forces // *Magnetohydrodynamics*. 2012. V. 48, № 3, pp. 557-566.
5. Polunin V.M., Boev M.L., Karpova G.V., Myo Min Than. Elastic Properties of a Magnetic Fluid with an Air Cavity Retained by Levitation Forces // *Acoustical Physics*. 2013. Vol. 59. №1. P.56–61.
6. Емельянов С.Г., Полуниин В.М., Кобелев Н.С., Ряполов П.А., Шабанова И.А. Пат. 101818 Российская Федерация, МПК G 01 F 11/00. Дозатор газа [Текст] /; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2010119759/28; заявл. 17.05.2010. опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3. 6 с. ил.

7. Boev M.L., Polunin V.M., Ryapolov P.A., Karpova G.V., Prokhorov P.A. Oscillations of a Bubble Separated from an Air Cavity under Compression Caused by Magnetic Field in a Magnetic Fluid // *Acoustical Physics*. 2014, Vol. 60, №. 1, pp. 29–33.

8. Polunin V. M., Storozhenko A.M., Shabanova I.A., [et al.] Effect of magnetic field perturbation in Magnetic Fluid with Pulsating Bubbles // *Magnetohydrodynamics*. 2014. V. 50. №4, pp. 431-441.

9. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация / Тихоокеан. океанол. ин-т им. В.И. Ильичева ДВО РАН. – М.: Наука. 2008. С. 271.

10. Boev M. L., Polunin V.M, P.A. Ryapolov, [et al.] Instability of the Flow of a Magnetic Liquid Pushing Down an Air Cavity // *Russian Physics Journal*. 2015. V. 57. №10, pp 1348-1355.

11. Михайлов И.Г., Полунин В.М. О влиянии смачиваемости поверхности, излучающей ультразвук, на отрыв кавитационных пузырьков от неё // *Акуст. журн.* 1973. Т. 19. вып. 3. С. 462–463.

12. Rayleigh. On pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // *Philos. Mag.* 1917. Vol. 34. P. 94– 100.

Polunin Vyacheslav Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

(e-mail: poluninvml@gmail.com)

Southwest State University, Kursk, Russia

Ryapolov Petr Alekseevich, Ph.D., Associate Professor

(e-mail: r-piter@yandex.ru)

Southwestern State University, Kursk, Russia

Ryabtsev Kirill Sergeevich, graduate student,

(e-mail: ceed_13@mail.ru)

Southwestern State University, Kursk, Russia

Mozar Alexander Aleksandrovich, assistant,

(e-mail: alexfx20@yandex.ru)

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

CAPTURE AND SEPARATION OF AIR SPACE BY A MAGNETIC FLUID IN THE "MAGNETIC VACUUM" OF A RING MAGNET

Abstract. The results of an experimental study of the capture, transport, and subsequent destruction of the air cavity on bubbles by a magnetic fluid in the region of the "magnetic vacuum" of a ring magnet are discussed. The study was performed using the acoustomagnetic method. The resulting bubbles have relatively large dimensions, which expands the possibility of a controlled magnetic field of dosed supply of small amounts of gas to the reactor.

Keywords: magnetic fluid, gas-liquid systems, gas elasticity, ponderomotive elasticity