

**В. М. Полунин**, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: poluninvm1@gmail.com)

**П. А. Ряполов**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: r-piter@yandex.ru)

**К. С. Рябцев**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ceed\_13@mail.ru)

**А. А. Моцар**, ассистент, Белорусский национальный технический университет (e-mail: alexfx20@yandex.ru) (Минск, Беларусь)

## **МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ С МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

*В статье представлены результаты исследования физических эффектов в газожидкостных системах с магнитной жидкостью, также рассматривается колебательная система из газовой полости и подвешенного в магнитном поле кольцевого магнита столбика магнитной жидкости. 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 газожидкостной системы «магнитная жидкость – изолированная воздушная полость». При анализе осциллограмм, фиксируемых в измерительном блоке, применяется программа, разработанная в среде NI LabVIEW. Получение в данной работе «единственной» воздушной полости и «простой» колебательной системы с определенной упругостью и инерционным элементом подтверждается возбуждением затухающих гармонических колебаний в системе «столбик магнитной жидкости – изолированная воздушная полость». В процессе исследования были получены значения для газовой и пондермоторной упругости, была представлена зависимость физических параметров от высоты магнитоожидкостного столбика. Результаты проведенных в работе исследований можно использовать для разработки перспективных амортизаторов и демпферов на основе перспективных малогабаритных систем на основе магнитоожидкостного активного элемента, подвешенного в магнитном поле кольцевого магнита с газовой полостью, расположенной в окрестности нижней грани магнита. Такие системы обладают определенными ограничениями по частоте и амплитуде колебаний, в связи с этим представляет интерес проведение исследования подобных систем с применением магнитных систем на основе редкоземельных компонентов.*

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, газожидкостные системы, газовая упругость, пондермоторная упругость.

**Ссылка для цитирования:** Магнитные эффекты в газожидкостных системах с магнитной жидкостью / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, К. С. Рябцев, А. А. Моцар // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 138–145.

\*\*\*

### **Введение**

Магнитные жидкости относятся к разряду умных материалов или smart-materials, а именно обладают возможностью управления физическими параметрами с помощью магнитного поля. Одними из основных перспективных вариантов применения магнитных жидкостей являются системы управляемого магнитным полем демпфирования вибраций, герметизации объемов газа, дозированной подачи малых порций газа в реактор [1–6].

Перспективными малогабаритными изделиями для гашения колебаний являются системы на основе магнитоожидкостного активного элемента, подвешенного в магнитном поле кольцевого магнита с газовой полостью, расположенной в окрестности нижней грани магнита [7–9]. Такие системы обладают определенными ограничениями по частоте и амплитуде колебаний, в связи с этим представляет интерес провести исследования подобных систем с приме-

нением магнитных систем на основе редкоземельных компонентов.

### Экспериментальная установка и методика измерений

На рисунке 1 дано схематическое изображение экспериментальной установки.

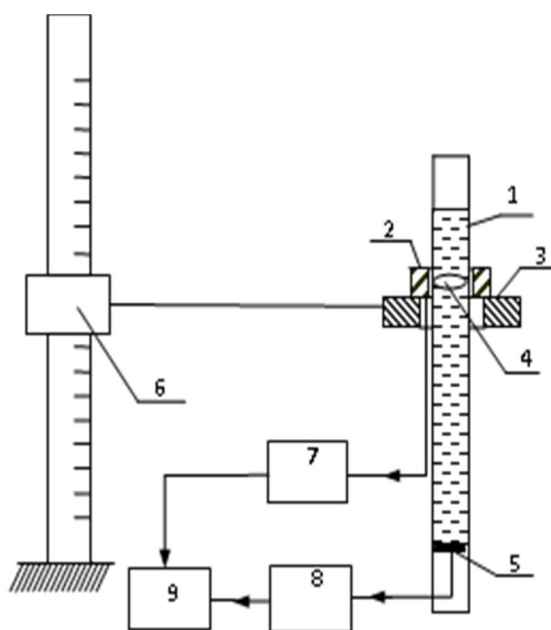


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – трубка с магнитной жидкостью; 2 – катушка индуктивности; 3 – кольцевой магнит; 4 – воздушная полость; 5 – пьезоэлемент; 6 – перемещающее устройство; 7 и 8 – усилители сигнала; 9 – цифровой осциллограф

Пьезоэлемент типа ПЭУ 16х2,0 с основной резонансной частотой 1 МГц

помещен в электроизолирующий экран, изготовленный из тонкой медной фольги.

На рисунке 2, *a* 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 (рис. 2, *b*). Дальнейший медленный (~0,02 мм/с) подъем магнита приводит к образованию полости большего размера (рис. 2, *d*), герметизация которой затем нарушается (рис. 2, *e*).

Восстановление перемычки (герметизация полости) происходит при последующем опускании магнита сразу или после небольшого на ~2–3 мм перемещения его вверх (рис. 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 ~0,8 мм/с перемычка за счет перетекания МЖ превращается в сплошной столбик (рис. 2, *g*), хотя свободная поверхность МЖ остается искривленной.

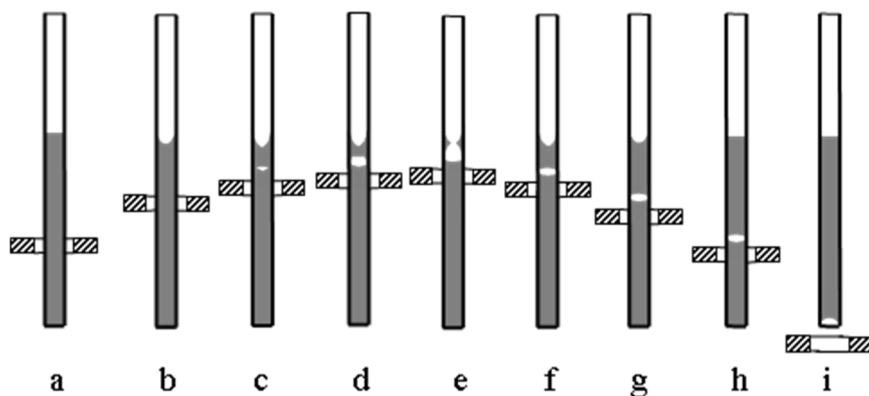


Рис. 2. Процесс захвата воздушной полости магнитной жидкостью

При высоте столбика МЖ  $\geq 90$  мм поверхность жидкости выпрямляется (рис. 2, *h*), а воздушная полость следует за магнитом, находясь поблизости от «магнитного вакуума». При дальнейшем опускании магнита и выхода на уровень «ниже трубки с МЖ» воздушная полость прижимается неоднородным магнитным полем к доньшку (рис. 2, *i*). В данном положении и проводятся дальнейшие исследования.

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.

Получение в данной работе «единственной» воздушной полости и «простой» колебательной системы с определенной упругостью и инерционным элементом подтверждается возбуждением затухающих гармонических колебаний в системе «столбик МЖ – изолированная воздушная полость».

### Результаты эксперимента и анализ полученных данных

На рисунке 3 показаны осциллограммы колебаний столбика МЖ высотой 90 мм, подпружиненного воздушной полостью объемом  $4,433 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>. Время между маркерами 40 мс, частота колебаний 86,5 Гц.

Частота колебаний столбика МЖ, зависящего над воздушной полостью, вычисляется по следующей формуле:

$$\nu = (2\pi)^{-1} \sqrt{(k_g + k_p + \delta_\eta) / \rho S h_f}, \quad (1)$$

где  $h_f$  – высота столбика жидкости;

$k_g$  и  $k_p$  – коэффициенты упругости газовой полости и пондеромоторной упругости;

$\delta_\eta$  – поправка на течение вязкой жидкости.

Коэффициент упругости газовой полости может быть представлен в виде [10]

$$k_g = \rho_g c^2 \cdot \frac{S^2}{V_0}. \quad (2)$$

Коэффициент пондеромоторной упругости  $k_p$ , обусловленный взаимодействием МЖ с неоднородным магнитным полем, подробно описан в [11, 12].

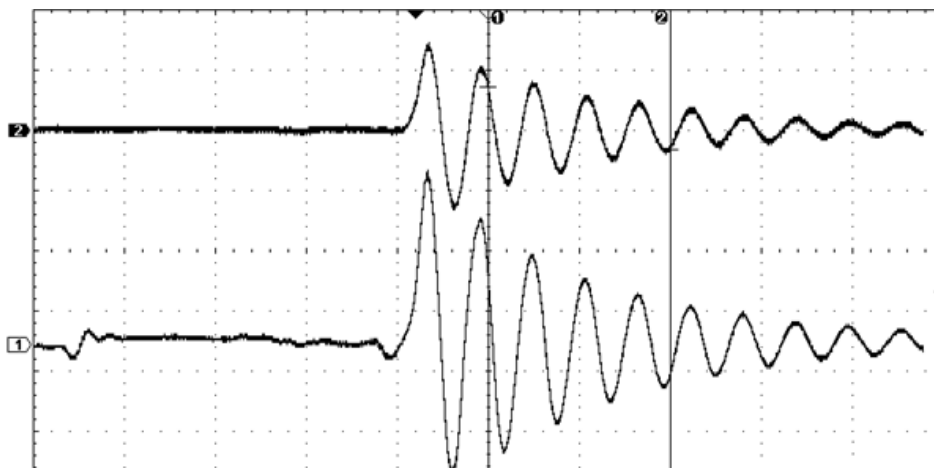


Рис. 3. Осциллограммы колебаний столбика МЖ над воздушной полостью

Поправка на течение вязкой жидкости получена в [13]:

$$\delta_{\eta} = -h_f d \sqrt{\pi^7 v^3 \eta \rho}. \quad (3)$$

В таблице 1 представлены значения частоты колебаний  $\nu$ , полученные экспериментально для столбиков МЖ различной высоты ( $h_f$  в м: 0,09; 0,10; 0,11; 0,12; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16), и набора объемов воздушной полости ( $h_0$  в мм: 3,77; 3,81; 3,83; 3,87; 3,92; 3,95; 3,97; 4,10; 4,20). Обращает на себя внимание «вполне ожидаемое» уменьшение  $\nu$  с увеличением  $h_f$  и практически независимость этого параметра при изменении  $h_0$ , которая обусловлена, как мы увидим, с упругостью колебательной системы.

Измеренные значения частоты колебаний  $\nu$  согласно (1) можно использовать для нахождения результирующей упругости  $k_{ex} = k_g + k_p + \delta_{\eta}$ :

$$k_{ex} = 4\pi^2 \nu^2 \rho S h_f. \quad (4)$$

Формула (1) в предположении отсутствия  $k_p$  и  $\delta_{\eta}$  имеет следующий вид:

$$\nu = (2\pi)^{-1} c \sqrt{\rho_g / \rho h_0 h_f}. \quad (5)$$

Принимая для  $t = 25$  °С скорость звука в воздухе  $c = 346,2$  м/с,  $\rho_g = 1,184$  кг/м<sup>3</sup>, по формуле (5) получим  $\nu = 90,4$  Гц, в то время как прямое измерение дает  $\nu = 86,5$  Гц. Этот факт указывает, что на результирующую упругость системы оказывает существенное влияние пондеромоторная упругость с поправкой на течение вязкой жидкости. Вместе с тем многочисленные известные результаты измерения и расчетов  $k_{ex}$  [4; 5; 18; 19] приводят к тому, что  $k_{ex} > k_g$ .

Для выяснения данного вопроса проведем расчет параметра  $|\delta_{\eta}|$ , воспользовавшись формулой (3) и значениями частоты из таблицы 1.

В таблице 2 представлены результаты расчета, выраженные в Н/м. Численное значение  $|\delta_{\eta}|$  находится в пределах  $330 \pm 20$  Н/м. Следовательно, на всех частотах поправка  $|\delta_{\eta}|$  вносит приблизительно одинаковый вклад в  $k_{ex}$ . Разность между  $k_{ex}$  и суммой ( $k_g + \delta_{\eta}$ ) представляет значение  $k_p$ .

Таблица 1

$h_f$ , м	$\nu$ , Гц								
	$h_0$ мм								
	3,77	3,81	3,83	3,87	3,92	3,95	3,97	4,10	4,20
0,09	86,5	86,9	87,2	87,6	86,4	86,0	86,0	87,0	88,2
0,10	82,5	82,2	84,5	82,6	81,5	82,5	82,6	81,6	85,6
0,11	78,4	77,6	80,0	78,8	77,0	78,1	78,1	78,3	78,6
0,12	74,9	74,3	75,9	75,5	74,3	75,7	74,4	74,4	74,1
0,13	72,2	71,7	73,0	72,2	71,0	71,8	70,7	71,2	70,9
0,14	69,6	68,5	71,0	69,5	69,0	68,7	68,8	69,1	68,4
0,15	67,1	66,6	68,0	66,2	65,9	66,0	65,8	66,8	64,5
0,16	65,3	64,2	65,8	64,3	63,9	63,9	63,0	63,9	63,3

Таблица 2

$h_f$ , м	$ \delta_\eta $ , Н/м								
	Высота полости $h_0$ мм								
	3,77	3,81	3,83	3,87	3,92	3,95	3,97	4,10	4,20
0,09	314	317	325	320	314	312	311	317	323
0,1	325	323	337	326	320	325	326	320	344
0,11	332	326	342	334	323	330	330	331	333
0,12	338	333	345	341	334	343	334	334	332
0,13	347	343	352	346	337	343	335	339	337
0,14	353	344	363	352	348	346	346	349	344
0,15	358	354	365	351	348	349	347	356	337
0,16	366	357	370	358	355	355	347	355	350

Определенная тенденция в изменении упругости  $k_{ex}$  с высотой столбика МЖ  $h_f$  при постоянном объеме полости ( $h_0 = \text{const}$ ) нами не выявлена. Возможно, изменения  $k_{ex}$  в зависимости от  $h_f$  в условиях эксперимента не выходят за пределы погрешности измерений.

В таблице 3 приводятся коэффициенты  $k_g$ , рассчитанные по формуле (2) (практически независимые от высоты столбика МЖ), и  $k_{ex}$ , усредненные по  $h_f$

в зависимости от  $h_0$ . Там же представлены значения  $(k_g + \delta_\eta)$  при различных значениях  $h_f$  и  $h_0$ .

С увеличением  $h_0$  (объема полости  $V_0$ ) происходит монотонное уменьшение  $k_g$ , а величина  $k_{ex}$  мало изменяется, оставаясь в пределах  $3710 \pm 50$  Н/м. Значение  $(k_g + \delta_\eta)$  по столбцам таблицы (при постоянных значениях  $h_0$ ) остается практически неизменным.

Таблица 3

$h_f$ , м ↓	$h_0$ , мм	3,77	3,81	3,83	3,87	3,92	3,95	3,97	4,1	4,2
	$k_g$ , Н/м	4260	4210	4190	4150	4090	4060	4040	3910	3820
	$k_{ex}$ , Н/м	3760	3700	3730	3760	3670	3710	3700	3710	3710
0,09	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3950	3890	3860	3840	3780	3750	3730	3590	3500
0,10	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3950	3890	3850	3820	3770	3730	3730	3590	3480
0,11	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3930	3880	3850	3820	3770	3730	3710	3580	3490
0,12	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3920	3880	3840	3810	3760	3720	3710	3560	3490
0,13	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3900	3870	3840	3800	3750	3720	3700	3570	3470
0,14	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3910	3870	3830	3800	3740	3710	3690	3560	3480
0,15	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3910	3860	3820	3800	3740	3710	3690	3550	3480
0,16	$(k_g + \delta_\eta)$ , Н/м	3890	3840	3820	3790	3730	3700	3720	3550	3470

По мере увеличения  $h_0$  происходит спад  $(k_g + \delta_\eta)$  с  $\sim 3950$  Н/м до  $\sim 3500$  Н/м. С увеличением  $h_0$  вначале разность  $k_{ex} - (k_g + \delta_\eta) < 0$  при  $h_0 = 3,95$  мм и  $3,97$  мм обращается в 0, а при  $h_0 = 4,1$  мм и  $4,2$  мм принимает положительные значения. Можно констатировать, что с увеличением высоты воздушной полости с  $3,77$  мм до  $4,2$  мм последовательно наблюдаются три случая:  $k_p < 0$ ;  $k_p = 0$ ;  $k_p > 0$ .

Пондеромоторная упругость полости малых размеров, находящейся в окрестности «магнитного вакуума», где магнитное поле состоит из полей с противоположной направленностью, имеет отрицательный знак, как и  $\delta_\eta$ . Поэтому результирующая упругость колебательной системы в противоположность ситуациям, описанным в [11; 12; 14; 15], имеет достаточно малые значения. Увеличение размеров полости приводит к удалению противоположных поверхностей полости и ослаблению действия силы отталкивания между ними. Конечно, сформулированный механизм формирования коэффициента  $k_p$  без аналитического подтверждения можно рассматривать лишь как предположение. Приведенный выше «противоречивый» результат несоответствия расчетного и экспериментального значений частоты колебаний (соответственно  $\nu = 90,4$  Гц и  $\nu = 86,5$  Гц) для полости малых размеров объясняется вкладом в результирующую упругость системы отрицательными по знаку  $k_p$  и  $\delta_\eta$ .

*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. Vol. 10. P. 749–759.

2. Position feedback control of a nonmagnetic body levitated in magnetic fluid / J. H. Lee, Y. J. Nam, R. Yamane, M. K. Park // *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. N 149. P. 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*. 2012. Vol. 512–515. P. 1474–1478.

4. Experimental study of an air cavity held by levitation forces / V. M. Polunin, M. L. Boev, Myo Min Than, P. A. Ryapolov // *Magnetohydrodynamics*. 2012. Vol. 48, N 3. P. 557–566.

5. Elastic Properties of a Magnetic Fluid with an Air Cavity Retained by Levitation Forces / V. M. Polunin, M. L. Boev, G. V. Karpova, Myo Min-Than // *Acoustical Physics*. 2013. Vol. 59. N 1. P. 56–61.

6. Пат. 101818 Российская Федерация, МПК G01 F 11/00. Дозатор газа / Емельянов С. Г., Полуин В. М., Кобелев Н. С., Ряполов П. А., Шабанова И. А.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2010119759/28; заявл. 17.05.2010. опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. 6 с. ил.

7. Oscillations of a Bubble Separated from an Air Cavity under Compression Caused by Magnetic Field in a Magnetic Fluid / M. L. Boev, V. M. Polunin, P. A. Ryapolov, G. V. Karpova, P. A. Prokhorov // *Acoustical Physics*. 2014. Vol. 60, N 1. P. 29–33.

8. Effect of magnetic field perturbation in Magnetic Fluid with Pulsating Bubbles / V. M. Polunin, A. M. Storozhen-

ко, I. A. Shabanova [et al.] // *Magneto-hydrodynamics*. 2014. Vol. 50, N 4. P. 431–441.

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

10. Рэлей Дж.У. Теория звука. 2-е изд. М.: ГИТТЛ, 1955. Т. 2. 475 с.

11. Полунин В. М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. С. 384.

12. Polunin V. Acoustics of nanodispersed magnetic fluids. London – New York: CRC Press, CISP, 2015. P. 472.

13. Упругость магнитной жидкости в сильном магнитном поле / В. М. По-

лунин, П. А. Ряполов, В. В. Платонов [и др.] // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63, № 4. С. 371–379.

14. Experimental study of an air cavity held by levitation forces / V. M. Polunin, M. L. Boev, Myo Min Than, P. A. Ryapolov // *Magneto-hydrodynamics*. 2012. Vol. 48, N 3. P. 557–566.

15. Elastic Properties of a Magnetic Fluid with an Air Cavity Retained by Levitation Forces / V. M. Polunin, M. L. Boev, G. V. Karpova, Myo Min Than / *Acoustical Physics*. 2013. Vol. 59, N 1. P. 56–61.

*Поступила в редакцию 10.10.17*

UDC 538.951

**V. M. Polunin**, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: poluninvm1@gmail.com)

**P. A. Ryapolov**, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: r-piter@yandex.ru)

**K. S. Ryabtsev**, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ceed\_13@mail.ru)

**A. A. Mozzar**, Assistant, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus) (e-mail: alexfx20@yandex.ru).

### MAGNETIC EFFECTS IN GAS-LIQUID SYSTEMS WITH A MAGNETIC FLUID

*The results of the investigation of physical effects in gas-liquid systems with a magnetic fluid are presented in the article, the oscillatory system from a gas cavity and a column of a magnetic fluid suspended in a magnetic field suspended from a magnetic field is also considered. As the main experimental method for studying the capture, transport and fission of a magnetic fluid in an air cavity, a method of acoustomagnetic indication is used, based on obtaining oscillograms of acoustic and magnetic oscillations of the magnetic fluid system-an isolated air cavity. When analyzing the oscillograms recorded in the measuring block, a program developed in the NI LabVIEW environment is used. Obtaining in this work a "single" air cavity and a "simple" oscillatory system with a certain elasticity and inertial element is confirmed by the excitation of damped harmonic oscillations in the column column magnetic fluid-an isolated air cavity. In the course of the study, values for gas and ponderomotive elasticity were obtained, the dependence of physical parameters on the height of the magneto-liquid column was presented. The results of the research carried out in the work can be used to develop promising shock absorbers and dampers based on magneto-liquid elements. Promising small-sized products for vibration damping are systems based on a magneto-liquid active element suspended in a magnetic field of a ring magnet with a gas cavity located in the vicinity of the lower face of the magnet. Such systems have certain limitations on the frequency and amplitude of the oscillations, and in this connection it is of interest to carry out a study of such systems using magnetic systems based on rare-earth components.*

**Key words:** magnetic fluid, gas-liquid systems, gas elasticity, ponderomotive elasticity.

**For citation:** Polunin V. M., Ryapolov P. A., Ryabtsev K. S., Mozzar A. A. Magnetic Effects in Gas-Liquid Systems with a Magnetic Fluid. Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 138–145 (in Russ.).

**References**

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 Servo Valve. *Energies*, 2017, vol. 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, no. 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*, 2012, vol. 512–515, 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, vol. 48, no. 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, no. 1, pp. 56–61.
6. Emel'yanov S. G., Polunin V. M., Kobelev N. S., Ryapolov P. A., Shabanova I. A. Dozator gaza. Patent RF, no. 2010119759/28, 2011.
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, no. 1, pp. 29–33.
8. Polunin V. M., Storozhenko A. M., Shabanova I. A., eds. Effect of magnetic field perturbation in Magnetic Fluid with Pulsating Bubbles. *Magnetohydrodynamics*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 431–441.
9. Sirotyuk M. G. *Akusticheskaya kavitaciya*. Moscow, Nauka Publ., 2008, p. 271.
10. Rehlej Dzh. U. *Teoriya zvuka*. 2<sup>th</sup> ed. Moscow, GITTL Publ., 1955, vol. 2, 475 p.
11. Polunin V. M. *Akusticheskie svoystva nanodispersnyh magnitnyh zhidkostej*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, p. 384.
12. Polunin V. *Acoustics of nanodispersed magnetic fluids*. London – New York: CRC Press, CISP, 2015, p. 472.
13. Polunin V. M., Ryapolov P. A., Platonov V. V., eds. *Uprugost' magnitnoj zhidkosti v sil'nom magnitnom pole*. *Akust. zhurn.*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 371–379.
14. Polunin V. M., Boev M. L., Myo Min Than, Ryapolov P. A. Experimental study of an air cavity held by levitation forces. *Magnetohydrodynamics*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 557–566.
15. 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, no. 1, pp. 56–61.