

УДК 538.93

## ПОВЕДЕНИЕ ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2023 г. П. А. Ряполов<sup>1</sup> \*, Е. А. Соколов<sup>1</sup>, Е. В. Шельдешова<sup>1</sup>,  
Д. А. Калюжная<sup>1</sup>, А. О. Васильева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное 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.

Представлены результаты исследования динамики газовых пузырьков, инжектируемых в магнитную жидкость под воздействием неоднородного магнитного поля в микроканалах четырех конфигураций. Получены зависимости размеров пузырьков от конфигурации магнитного поля и физических свойств магнитной жидкости. Полученные результаты могут найти применения в газовых счетчиках и дозаторах в микрофлюидике.

DOI: 10.31857/S0367676522700600, EDN: HFUBGC

### ВВЕДЕНИЕ

Поведение микрокапель и микропузырьков в микроканалах составляет основу капельной микрофлюидики [1–3], которая применяется для биологических, химических анализов или синтеза частиц. Данная технология также повышает скорость биологических и химических анализов за счет уменьшения объемов, в которых происходят такие процессы, как нагрев, диффузия, реализуется конвективное перемешивание. Управление размером и динамикой эмульсий осуществляется с помощью изменения расхода или конфигурации канала. Альтернативой может выступать использование жидких активных компонентов, которые могут менять свои свойства под внешними воздействиями. К таким компонентам относятся магнитные жидкости, сочетающие в себе текучесть и магнитный отклик и представляющие собой коллоидную систему магнитных наночастиц, покрытых поверхностно-активным веществом, диспергированных в жидкость-носитель [4–13]. Целью данной работы является исследование поведения под воздействием неоднородного магнитного поля газовых включений в магнитной жидкости в микрофлюидных чипах различной конфигурации, что может послужить основой для создания управляемых магнитным полем микрофлюидных дозаторов.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований была изготовлена специализированная экспериментальная установка. Ее блок-схема представлена на рис. 1. Микрофлюидный чип (1) с помощью системы креплений (на схеме не показана) размещается параллельно оси кольцевого постоянного магнита (2). Подача магнитной жидкости и немагнитной фазы осуществляется с помощью двухка-

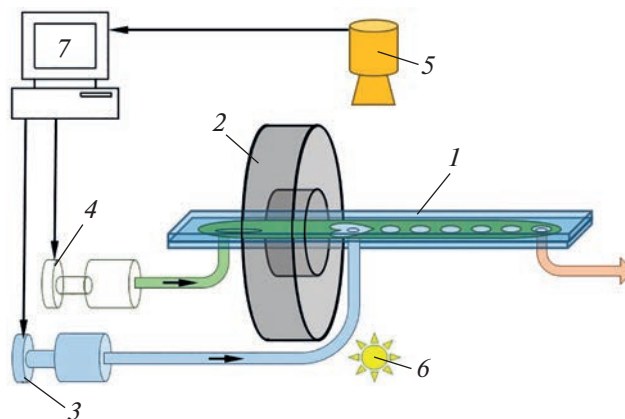


Рис. 1. Блок-схема специализированной экспериментальной установки. (1 – Микрофлюидный чип; 2 – постоянный магнит; 3, 4 – двухканальный шприцевой насос; 5 – микроскоп; 6 – осветитель; 7 – компьютер).

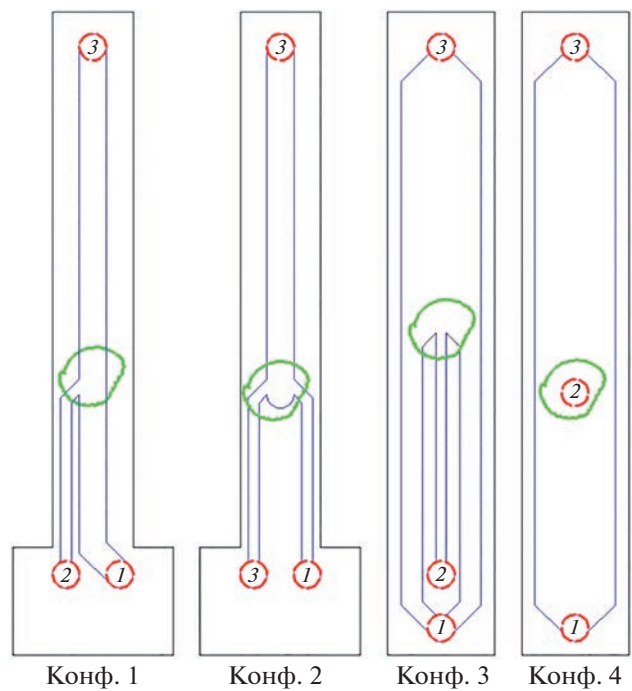


Рис. 2. Конфигурация микрофлюидных чипов (1 – коннектор подачи газа, 2 – коннектор подачи магнитной жидкости, 3 – выходной коннектор).

нального шприцевого насоса (3), (4) соответственно, изготовленного самостоятельно из деталей набора для сборки 3d принтера Ender по технологии, описанной в [14]. Динамика многофазной системы фиксируется с помощью микроскопа (5) в проходящем свете от осветителя (6), изображение передается на компьютер (7), через который осуществляется управление шприцевым насосом.

В качестве источника магнитного поля использовали неодимовые кольцевые постоянные магниты из сплава NdFeB (неодим–железо–бор) различной геометрии: Магнит 1 (наружный диаметр 60 мм, внутренний 24 мм, толщина 10 мм) и Магнит 2 (50 × 25 × 5 мм). Результаты моделирования изолиний модуля напряженности магнитного поля этих магнитов представлены в работе [12, 13]. Для данного типа магнитов характерна “область магнитного вакуума”, где осевая составляющая напряженности магнитного поля стремится к нулевому значению. Также выделяют на-

бор замкнутых изолиний модуля напряженности магнитного поля, который получил название рабочей области магнитной левитации (MagLev) [13, 15–17]. Данная область используется для управляемой динамики немагнитных включений в магнитожидкостных системах.

Микрофлюидные чипы были изготовлены на основе сэндвич-технологии с использованием пленки Parafilm® в качестве среднего слоя и стеклов в качестве обкладок [18–20]. Их конфигурация представлена на рис. 2.

Подача газа осуществлялась через коннектор 1, магнитная жидкость подавалась через коннектор 2, выход многофазной смеси производился через коннектор 3. Кольцевой магнит размещали таким образом, чтобы его область магнитной левитации (показана на рис. 2 зеленым) располагалась в месте соединения каналов для конфигураций 1–3 или коннектора 2 для конфигурации 4.

Были исследованы магнетитовые магнитные жидкости на водной основе, стабилизированные двойным слоем поверхностно-активного вещества из олеиновой кислоты и олеата натрия. Образец МЖ1 был синтезирован по методу химической конденсации в химической лаборатории ЮЗГУ. Образцы МЖ2–МЖ3 были получены разбавлением МЖ1. Физические параметры образцов представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Был проведен эксперимент по видеофиксации межфазной границы при отрыве воздушного пузырька в магнитной жидкости при различных конфигурациях каналов и расходе магнитной жидкости  $q_1$  и воздуха  $q_2$ . Поведение газовых пузырьков рассматривалось как в магнитном поле кольцевых постоянных магнитов № 1, № 2, так и без магнитного поля.

При исследовании динамики многофазной магнитной системы в каналах Т- и У-образной конфигурации № 1, № 2, соответственно, (рис. 2) течение воздуха носило струйный характер, дождаться отрыва капель не удалось. При конфигурации чипа № 3 (рис. 2) капельное течение наблюдалось для образца МЖ1 в магнитном поле обоих магнитов. Нам удалось добиться капельного течения только в магнитном поле магнита № 1 для образца МЖ2 конфигурации чипа № 3 (рис. 2). В более разбавленных образцах образования капель добиться не удалось. Причиной этому является конфигурация чипа № 3 (рис. 2), при которой канал 2 подачи немагнитной фазы проходит через кольцевой магнит, в середине которого магнитное поле максимально, что приводит к затеканию в него магнитной жидкости и образованию магнитно-жидкостной перемычки, которая разрушается при большом давлении, в результате чего происходит неконтролируемый вы-

Таблица 1. Физические параметры образцов

| № образца                | МЖ1    | МЖ2    | МЖ3    |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| $M_s$ , кА/м измерения   | 21.7   | 11     | 6.98   |
| $\Phi_{mag}$ , %, расчет | 4.9    | 1.9    | 1.3    |
| Плотность МЖ, кг/м³      | 1212.4 | 1082.0 | 1056.0 |
| Вязкость, сП             | 5.6    | 2.15   | 1.65   |

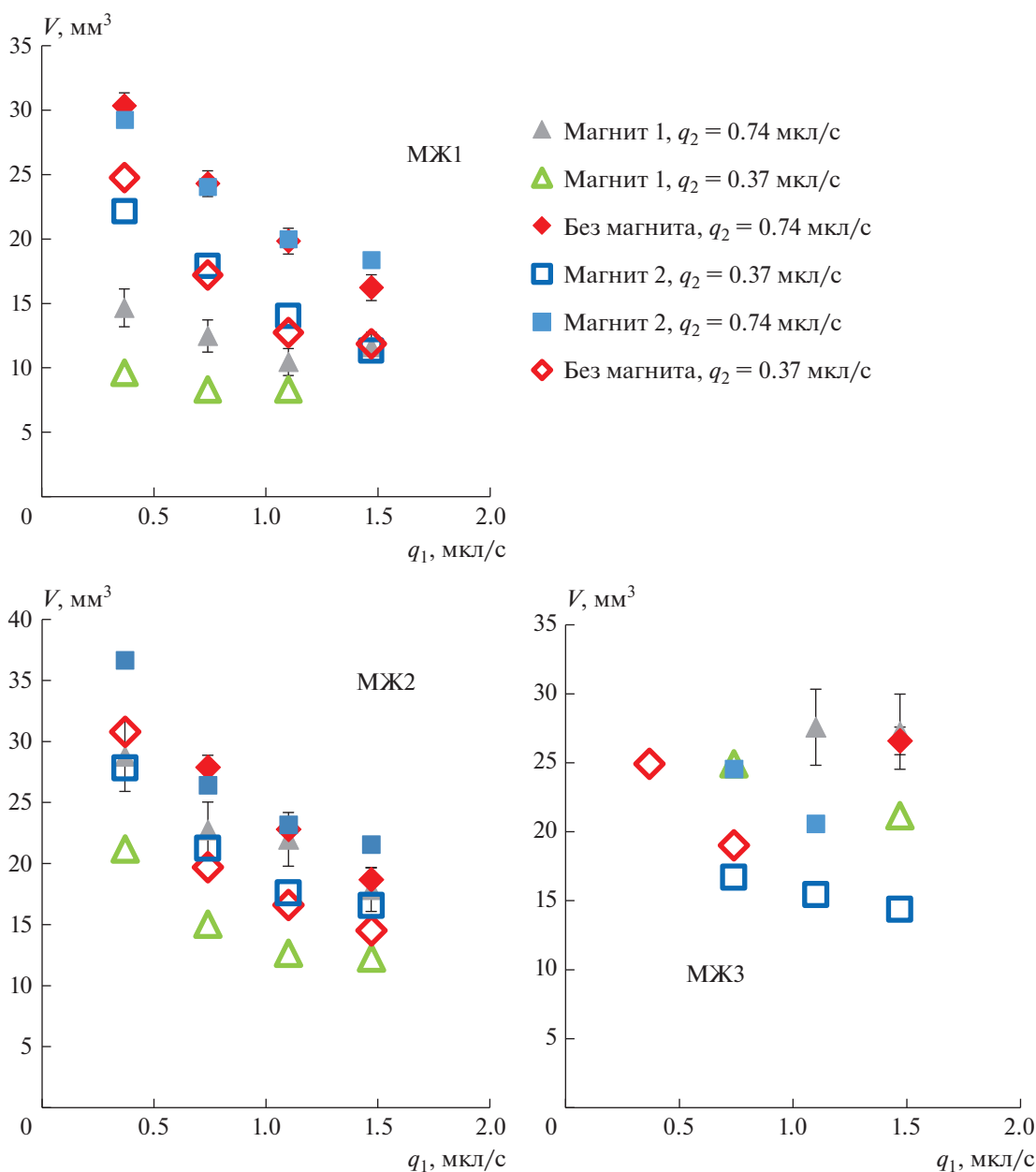
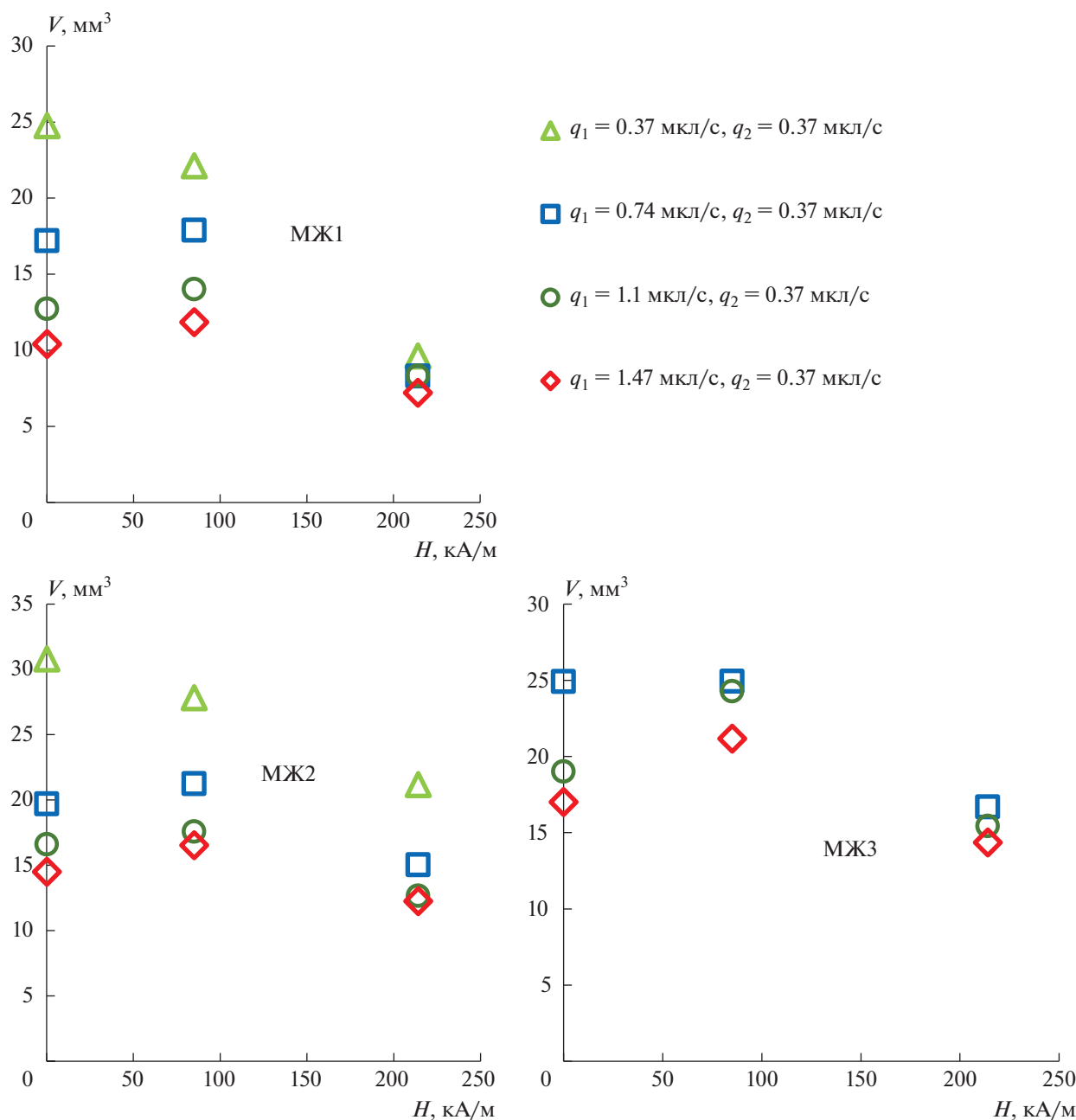


Рис. 3. Графики зависимости объема отрывающегося пузырька  $V$  от расхода магнитной жидкости  $q_1$ .

брос порции газа. Этим недостаткам лишена конфигурация чипа № 4 (рис. 2), в которой ввод немагнитной фазы осуществляется непосредственно через коннектор 2, расположенный в области магнитного вакуума кольцевого постоянного магнита. При таком расположении каналов удалось добиться капельного течения при всех концентрациях МЖ и конфигурациях магнитного поля. Графики зависимости объема отрывающегося пузырька  $V$  от расхода магнитной жидкости  $q_1$  и напряженности магнитного поля на поверхности магнита (214  $\text{kA/m}$  для магнита 1 и 85  $\text{kA/m}$  для магнита 2) представлены на рис. 3 и

4 соответственно. Графики получены для образцов МЖ1-МЖ3 при расходе воздуха  $q_2$  от 0.37 до 1.47  $\text{mL/s}$ . Объем отрывающихся пузырьков получен путем умножения толщины канала (0.13  $\text{mm}$ ) на площадь немагнитного включения, которая определяется на основе данных видеофиксации инструментальным микроскопом и последующей обработкой в программе, специально разработанной в NI LabView.

Из представленных на рис. 3 графиков видно, что для всех комбинаций магнитного поля и концентраций магнитной жидкости размер пузырька уменьшается по мере увеличения расхода магнит-



**Рис. 4.** Графики зависимости объема отрывающегося пузырька  $V$  от напряженности магнитного поля на поверхности магнита (214  $\text{kA/m}$  для магнита 1 и 85  $\text{kA/m}$  для магнита 2).

ной жидкости  $q_1$  и увеличивается при увеличении расхода воздуха  $q_2$ . Эти зависимости согласуются с известными работами по капельной микрофлюидике [1–4].

При воздействии магнитного поля (рис. 3) в случае малого расхода магнитной жидкости  $q_1 = 0.37$   $\text{mkl/s}$ , объем пузырька  $V$  уменьшается для всех концентраций МЖ. При увеличении расхода магнитной жидкости  $q_1$  происходит сначала увеличение объема пузырька  $V$  в магнитном поле магнита № 2, а потом резкое снижение в магнит-

ном поле магнита № 1. Наибольшее различие наблюдается в наименее вязком образце МЖ3.

Это можно объяснить влиянием магнитогидродинамических механизмов. При малом расходе магнитной жидкости ее течение выстраивается вдоль линий напряженности магнитного поля, смыкаясь в области координат  $z = 20–25$   $\text{mm}$ . При этом отрывается пузырек. Чем мощнее магнит, тем раньше происходит слияние струй и меньший размер оторвавшегося пузырька (зеленые треугольники на рис. 4). При увеличении расхода

магнитной жидкости в кольцевом постоянном магните 2 с меньшей напряженностью магнитного поля точка слияния струй магнитной жидкости смещается дальше от магнита, что приводит к некоторому увеличению размера пузырька. При использовании более мощного магнита 1 (напряженность магнитного поля на его поверхности в  $\sim 3$  раза больше) преобладают магнитогидродинамические механизмы, в результате чего размер пузырька уменьшается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена динамика газовых пузырьков в магнитной жидкости в микроканалах различной формы. Показано, что в Т- и У-образной конфигурации в неоднородном поле кольцевого магнита не удается добиться пузырьков течений. Режим гидродинамической фокусировки является единственной конфигурацией микрофлюидного чипа, при которой образуются пузырьки.

Подача немагнитной фазы в область магнитного вакуума позволяет добиться стабильных режимов при всех концентрациях магнитной жидкости и конфигурациях магнитного поля.

Рассмотрено поведение межфазной границы воздух — магнитная жидкость в момент отрыва пузырька, показано, что определяющее влияние на нее оказывает конфигурация магнитного поля.

Показано, что для всех комбинаций магнитного поля и концентраций магнитной жидкости размер пузырька уменьшается по мере увеличения расхода магнитной жидкости  $q_1$  и увеличивается при увеличении расхода воздуха  $q_2$ .

При увеличении напряженности магнитного поля и концентрации магнитной жидкости размер пузырька уменьшается, это позволяет организовать бесконтактное управление размером газовых включений, что может найти применения в газовых счетчиках и дозаторах в микрофлюидике.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Utada A.S., Fernandez-Nieves A., Stone H.A., Weitz D.A.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. No. 9. Art. No. 094502.
2. *Chen L., Yang C., Xiao Y. et al.* // Mater. Today Nano. 2021. V. 16. Art. No. 100136.
3. *Montanero J.M., Ganán-Calvo A.M.* // Rep. Prog. Phys. 2020. V. 83. No. 9. Art. No. 097001.
4. *Rosensweig R.E.* Ferrohydrodynamics. N.Y.: Courier Corporation, 2013. 368 p.
5. *Krakov M.S., Zakinyan A.R., Zakinyan A.A.* // J. Fluid Mech. 2021. V. 913. Art. No. A30.
6. *Berkovsky B., Bashtovoi V., Mikhalev V., Rex A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1987. V. 65. No. 2–3. P. 239.
7. *Sokolsky S.A., Solovyova A.Y., Zverev V.S. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2021. V. 537. Art. No. 168169.
8. *Solovyova A.Y., Elfimova E.A., Ivanov A.O.* // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. No. 6. Art. No. 064616.
9. *Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F., Khokhryakova C.A. et al.* // Phys. Fluids. 2021. V. 33. No. 11. Art. No. 112001.
10. *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.
11. *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.
12. *Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Postnikov E.B.* // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 549. Art. No. 169067.
13. *Sokolov E., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Ryapolov P.* // AIP Advances. 2022. V. 12. No. 3. Art. No. 035333.
14. *Baas S., Saggiomo V.* // HardwareX. 2021. V. 10. Art. No. e00219.
15. *Gao Q.H., Zhang W.M., Zou H.X. et al.* // Mater. Horiz. 2019. V. 6. No. 7. P. 1359.
16. *Ge S., Nemiroski A., Mirica K.A. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2020. V. 59. No. 41. Art. No. 17810.
17. *Gao Q., Yan H., Zou H. et al.* // Sci. China Technol. Sci. 2020. V. 64. No. 1. P. 44.
18. *Kitenbergs G., Tatulčenkovs A., Puķina L., Cēbers A.* // Eur. Phys. J. E. 2018. V. 41. No. 11. P. 1.
19. *Yu L., Shi Z.Z.* // Lab Chip. 2015. V. 15. No. 7. P. 1642.
20. *Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Vasilyeva A.O., Ryapolov P.A.* // Proc. Conf. ElConRus (St. Petersburg, 2022) P. 1612.

## Dynamics of multiphase magnetic fluid systems in microchannels of different shapes in a nonhomogeneous magnetic field

P. A. Ryapolov<sup>a, \*</sup>, E. A. Sokolov<sup>a</sup>, E. V. Shel'deshova<sup>a</sup>, D. A. Kalyuzhnaya<sup>a</sup>, A. O. Vasilyeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Southwest State University, Kursk, 305040 Russia

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

We presented the results of a study of the dynamics of gas bubbles injected into a ferrofluid under the influence of an inhomogeneous magnetic field in microchannels of five configurations. The dependences of bubble sizes on the configuration of the magnetic field and the physical properties of the magnetic fluid are obtained. The results obtained can be used in gas meters and dispensers in microfluidics.