

УДК 538.951

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-114-126>

Исследование динамических характеристик капель воды, движущихся в объёме магнитной жидкости

Е. А. Соколов^{1✉}, Д. А. Калюжная¹, Д. И. Ширяев¹, В. А. Булгакова¹,
В. П. Маслова¹, М. О. Рязанцева¹

¹Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Резюме

Цель. Экспериментально исследовать скорость и ускорение капель воды, всплывающих в объеме магнитной жидкости под действием неоднородного магнитного поля, создаваемого комбинированной системой магнитов, включающей кольцевой постоянный магнит, помещенный на соленоид.

Методы. Эксперименты проводились на установке, разработанной авторами. Сбор данных осуществлялся с применением стандартного измерительного оборудования. Величина напряженности магнитного поля регистрировалась с помощью тесламетра ТПУ-01, оснащенного преобразователем Холла, обеспечивающим высокую точность измерений. Топология магнитного поля была смоделирована численно с использованием пакета конечных элементов FEMM, интегрированного в интерактивную среду MathLab. Данная программная платформа была использована для расчета, последующей обработки и визуализации распределения магнитного поля, создаваемого комбинированной системой магнитов. Обработка изображений движущихся немагнитных включений выполнялась с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного авторами в программе NI LabVIEW. Теоретическая интерпретация экспериментальных данных основывалась на положениях физики конденсированного состояния.

Результаты. В ходе экспериментов были получены зависимости координаты, скорости, ускорения дисперсных систем на основе магнитной жидкости и воды от параметров неоднородного магнитного поля, создаваемого комбинированной системой магнитов. Компьютерное моделирование в FEMM позволило оценить топологию магнитного поля, воздействующего на капли воды в объеме магнитной жидкости, и сопоставить расчетные данные с экспериментальными. Установлено, что экспериментальные и теоретические результаты хорошо согласуются.

Вывод. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность управления динамикой магнитожидкостных сред с помощью неоднородного магнитного поля, создаваемого комбинированной системой магнитов. Это открывает перспективы для создания регулируемых дозаторов и систем получения активных капель.

Ключевые слова: магнитные жидкости; дисперсные среды; неоднородное магнитное поле; комбинированная система магнитов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Статья подготовлена в рамках государственного задания на 2026 год №075-03-2026-489.

Для цитирования: Соколов Е. А., Калюжная Д. А., Ширяев Д. И., Булгакова В. А., Маслова В. П., Рязанцева М. О. Исследование динамических характеристик капель воды, движущихся в объёме магнитной жидкости // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 1. С. 114–126. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-114-126>.

Поступила в редакцию 31.01.2026

Подписана в печать 27.02.2026

Опубликована 25.03.2026

Investigation of the dynamic characteristics of water droplets moving in the volume of a magnetic fluid

Evgeniy A. Sokolov¹ ✉, Dariya A. Kalyuzhnaya¹, Dmitry I. Shiryaev¹,
Varvara A. Bulgakova¹, Vasilisa P. Maslova¹, Maria O. Ryazantseva¹

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Abstract

Purpose. To experimentally investigate the velocity and acceleration of water droplets rising in a volume of magnetic fluid under the influence of a non-uniform magnetic field generated by a combined magnet system, which includes a ring permanent magnet placed on top of a solenoid.

Methods. The experiments were conducted using a setup developed by the authors. Data collection was carried out employing standard measuring equipment. The magnetic field strength was recorded using a TPU-01 teslameter equipped with a Hall probe, which ensures high measurement accuracy. The magnetic field topology was numerically simulated using the FEMM finite element package integrated into the interactive MathLab environment. This software platform was utilized for the calculation, subsequent processing, and visualization of the magnetic field distribution generated by the combined magnet system. Image processing of the moving non-magnetic inclusions was performed using specialized software developed by the authors in the NI LabVIEW environment. The theoretical interpretation of the experimental data was based on the principles of condensed matter physics.

Results. During the experiments, the dependences of the coordinate, velocity, and acceleration of disperse systems based on magnetic fluid and water on the parameters of the non-uniform magnetic field generated by the combined magnet system were obtained. Computer simulation in FEMM made it possible to evaluate the field topology affecting water droplets in the bulk of the magnetic fluid and to compare the calculated data with experimental results. It was found that the experimental and theoretical results are in good agreement.

Conclusion. The obtained results demonstrate the fundamental possibility of controlling the dynamics of magnetic fluid media using the non-uniform magnetic field generated by the combined magnet system. This paves the way for the development of adjustable dispensers and systems for generating active droplets.

Keywords: magnetic fluids; dispersed media; inhomogeneous magnetic field; combined magnet system.

Funding: The article was prepared as part of the state assignment for 2026 No. 075-03-2026-489.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Shiryaev D.I., Bulgakova V.A., Maslova V.P., Ryazantseva M.O. Investigation of the dynamic characteristics of water droplets moving in the volume of a magnetic fluid. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(1):114-126. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-114-126>.

Received 31.01.2026

Accepted 27.02.2026

Published 25.03.2026

Введение

Магнитные жидкости (МЖ), или феррожидкости, представляют собой уникальный класс «умных» материалов, сочетаю-

щих текучесть и сильную магнитную восприимчивость [1]. Это свойство открывает широкие возможности для управления их поведением и динамикой диспергированных в них фаз с помощью внешних магнит-

ных полей (МП) [2]. В частности, неоднородные МП позволяют воздействовать на немагнитные включения (пузырьки или капли другой жидкости) в объеме МЖ, которые могут использоваться для точной транспортировки [3] и управления движением таких включений [4].

Исследование динамики капель в магнитных жидкостях имеет фундаментальное и прикладное значение. С одной стороны, оно углубляет понимание гидродинамики многокомпонентных магнитных систем и физики конденсированного состояния [5]. С другой стороны, результаты таких работ являются основой для разработки перспективных технологий в микрофлюидике, биомедицине и химической технологии: программируемых дозаторов, микромиксеров, систем адресной доставки веществ [6] и синтеза функциональных материалов в форме капель [7].

Хотя общие принципы левитации немагнитных тел в МЖ известны, количественное описание и прогнозирование их динамических характеристик скорости и ускорения в зависимости от параметров неоднородного магнитного поля остаются актуальной задачей [8]. Большинство исследований посвящено стационарному положению равновесия включений, тогда как анализ переходных процессов их движения изучен в меньшей степени [9]. Кроме того, для создания неоднородных магнитных полей перспективно использование комбинированных источников, например, сочетающих постоянные магниты и электромагниты (соленоиды), что позволяет динамически менять конфигурацию поля в широком диапазоне [9; 10].

Материалы и методы

Для проведения экспериментов по исследованию динамики капель воды в МЖ была разработана установка. Детальная схема с отображением всех основных компонентов, входящих в её состав, представлена на рисунке 1.

Перед началом измерений образец магнитной жидкости приводили к однородному состоянию с помощью вибрационного перемешивающего устройства VortexV-3 при частоте вращения 3000 об/мин. Дистиллированную воду набирали в шприц, который затем подключали к силиконовой трубке с внутренним диаметром 1 мм, соединенной с каналом. Экспериментальная ячейка 1 была изготовлена в виде плоского стеклянного канала: две стеклянные пластины склеивались двухкомпонентной эпоксидной смолой с формированием зазора шириной ровно 2 мм. Заполнение магнитной жидкостью вели с торца, что гарантировало сохранение прозрачности фронтальной и тыловой поверхностей. После заполнения ячейку дегазировали в вакуумной камере, удаляя пузырьки воздуха из рабочего объема, и затем устанавливали строго вертикально, фиксируя крепежом из немагнитных материалов. Для генерации магнитного поля применялась комбинированная система магнитов (КСМ). В её состав входил кольцевой постоянный магнит (КПМ) 2, имеющий особую топологию [11], размещенный поверх соленоида 3. Фиксация магнита осуществлялась двусторонним скотчем для исключения сдвигов в ходе измерений, при этом магнит и соленоид выставлялись соосно. Данный узел установки подключался к блоку питания 4, позволяющему регулировать напряженность поля путем изменения силы тока в обмотке соленоида от 0 до 2,7 А. Подача воды в канал производилась через силиконовую трубку, соединенную с шприцевым насосом 5. Для подсветки рабочей области использовался управляемый светодиодный источник 6. Регистрация процессов выполнялась высокоскоростной камерой 7 (Nikon 1), подключенной к персональному компьютеру 8. Обработка экспериментальных видеоданных выполнялась в программной среде National Instruments LabView. С этой целью был задействован

специализированный комплекс программ, созданный авторами, который использует современные алгоритмы машинного зрения для анализа изображений¹.

В качестве магнитной фазы использовался образец МЖ на основе керосина с

плотностью $\rho = 936 \text{ кг/м}^3$, концентрацией магнитной фазы $\varphi = 3,63 \%$, намагниченностью $M_s = 12,5 \text{ кА/м}$ и вязкостью $\eta = 2,45 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

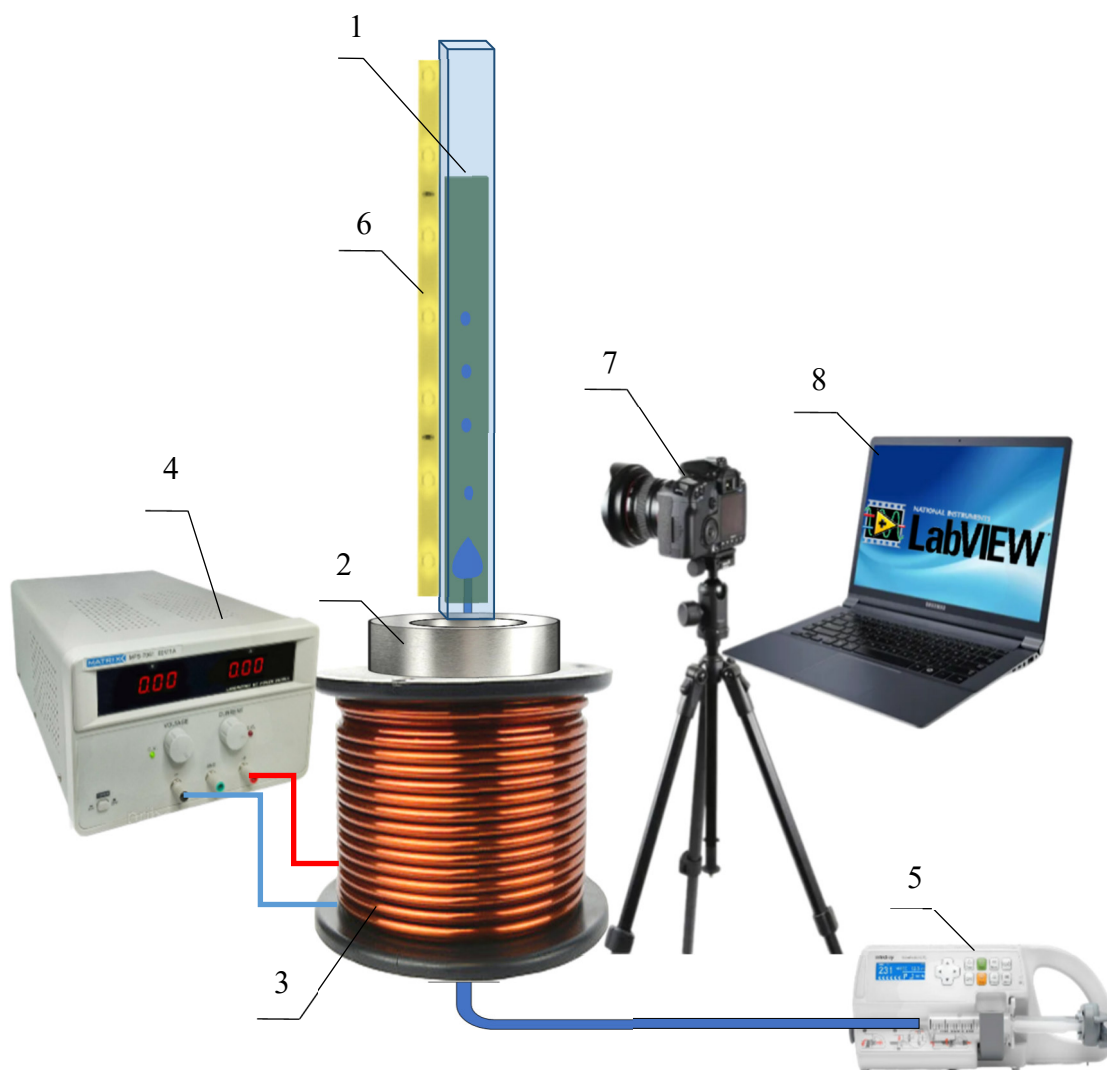


Рис. 1. Схема установки для исследования динамики капель воды в МЖ: 1 – плоский стеклянный канал; 2 – кольцевой магнит; 3 – соленоид; 4 – источник питания; 5 – шприцевой насос; 6 – осветитель; 7 – высокоскоростная камера; 8 – компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the setup for studying the dynamics of water droplets in MF: 1 – planar glass channel; 2 – ring magnet; 3 – solenoid; 4 – power supply; 5 – syringe pump; 6 – illuminator; 7 – high-speed camera; 8 – computer

¹ Программа для исследования динамики газожидкостных систем в плоском канале: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663759 Рос-

сийская Федерация / Ряполов П. А., Соколов Е. А., Калюжная Д. А., Васильева А. О. № 2019662610 ; заявл. 16.10.2019; опубл. 23.10.2019, Бюл. № 1.

Результаты и их обсуждение

Экспериментально и с помощью моделирования в программном пакете FEMM [12], были исследованы физиче-

ские параметры магнитного поля КСМ. Пример моделирования магнитного поля КСМ представлен на рисунке 2.

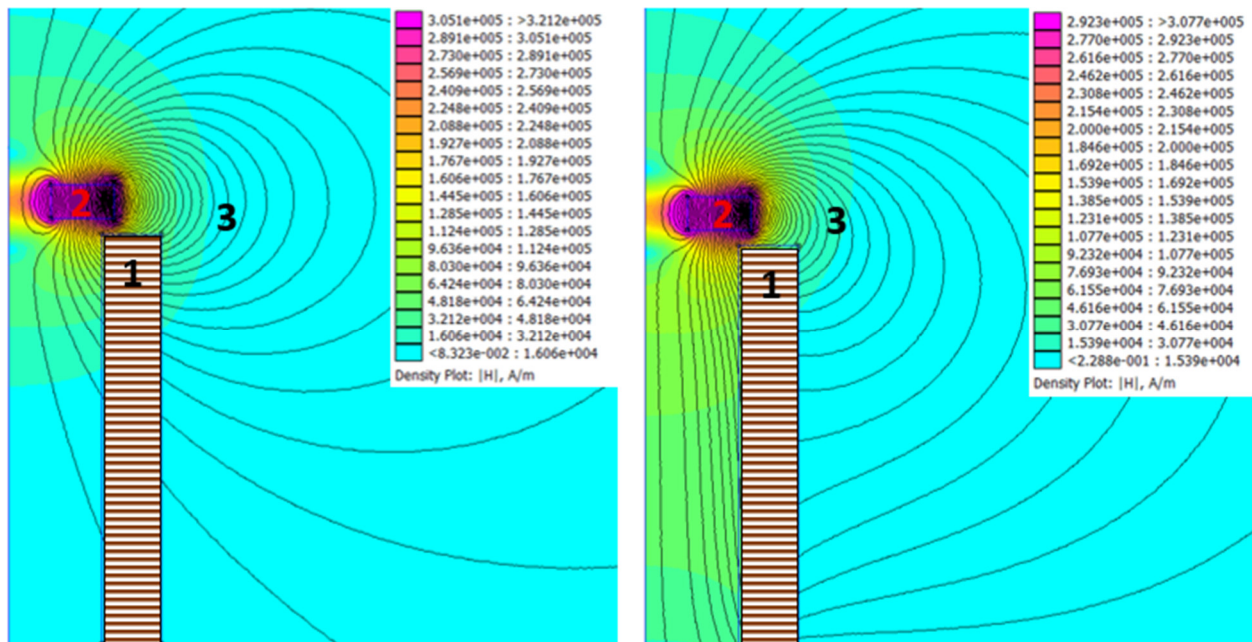


Рис. 2. Моделирование в FEMM напряженности МП, создаваемого КСМ: а – $I = 0$ А; б – $I = 2,7$ А; 1 – область соленоида; 2 – область КПМ; 3 – расчетная область

Fig. 2. FEMM modeling of the MF voltage generated by the CMS: а – $I = 0$ А; б – $I = 2.7$ А; 1 – the solenoid area; 2 – the RPM area; 3 – the calculated area

Осевое распределение магнитного поля комбинированного источника исследовалось экспериментально путем перемещения щупа тесламетра ТПУ-01 вдоль вертикальной оси. Шаг перемещения задавался подъемным механизмом, отсчет координаты велся от центра КПМ в интервале до 30 мм. Зарегистрированные значения сопоставлены с результатами численного моделирования, выполненного для различных значений силы тока в обмотке соленоида. Соответствующие графики,

демонстрирующие характер изменения МП при изменении силы тока на основе экспериментальных измерений и расчетных данных, представлены на рисунке 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что с ростом силы тока область перехода магнитного поля через ноль закономерно сдвигается в сторону. Вследствие этого наблюдается сокращение объёма немагнитной фазы внутри МЖ¹, что открывает возможность влиять на поведение таких включений [13].

¹ Иванов И. С. Гидродинамика капельных агрегатов и немагнитных тел, погруженных в

магнитную жидкость : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Пермь, 2023. 282 с.

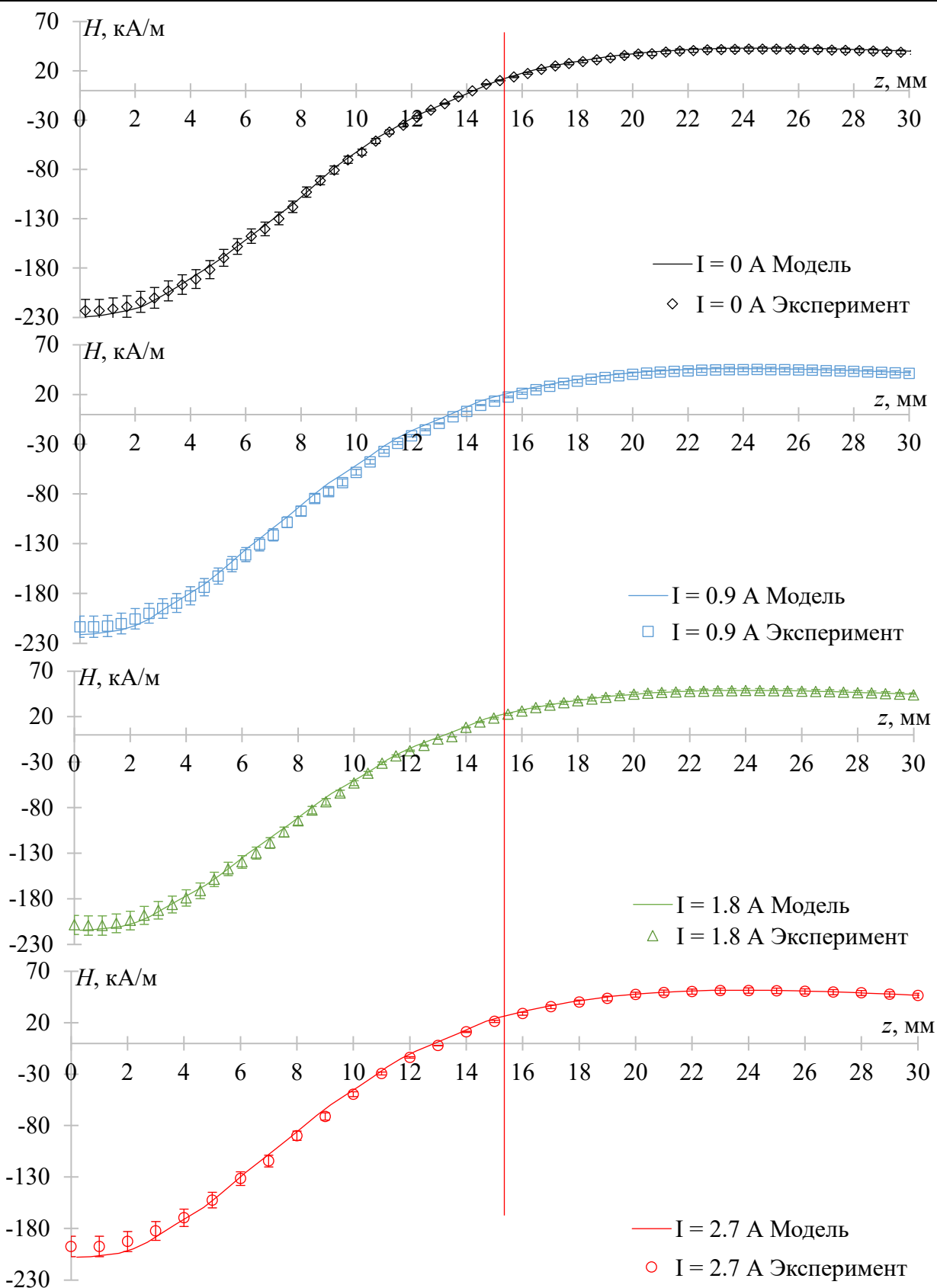


Рис. 3. Моделирование и экспериментальные данные напряженности МП от расстояния до КСМ

Fig. 3. Modeling and experimental data of the MF tension from the distance to the CMS

В качестве исходных данных для последующего вычисления координат и ускорения немагнитных объектов приняты следующие значения напряженности: 41,9 кА/м (при отсутствии тока в соленоиде), 44,9 кА/м (при токе 0,9 А),

48,2 кА/м (при токе 1,8 А) и 51,2 кА/м (при токе 2,7 А).

Указанные величины, соответствующие интервалу расстояний от 20 до 30 мм от поверхности комбинированного источника, систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Сводные данные значений напряженности МП от значения силы тока на соленоиде

Table 1. Summary data of the MF voltage values from the current value at the solenoid

I, A	0	0,9	1,8	2,7
H, кА/м	41,9	44,9	48,2	51,2

Ранее динамика границы раздела фаз «МЖ – вода» в неоднородном МП, создаваемом КСМ, рассматривалась в работе [14].

Пересчет координат из пиксельной системы в миллиметры производился на основе калибровки масштаба изображения, а временные интервалы устанавливались по номерам кадров видеоряда. Из-за малого размера наблюдаемых немагнитных включений и оптической непрозрачности магнитной жидкости провести измерения при напряженности поля 51,2 кА/м (что соответствует значению силы тока 2,7 А на соленоиде) не представляется возможным в используемом канале. Однако данное ограничение можно преодолеть, используя канал меньшей толщины. Но полученные результаты нельзя будет сопоставить с имеющимися измерениями.

На каплю воды действует результирующая сила $F_{рез}$, которая определяется с помощью выражения:

$$F_{рез} = F_{п} + F_{А} - F_{тр} - F_{тяж}, \quad (1)$$

где $F_{п}$ – магнитная сила; $F_{А}$ – сила Архимеда; $F_{тр}$ – сила вязкого трения; $F_{тяж}$ – сила тяжести.

Экспериментальные данные, полученные в среде LabView, послужили основой для построения зависимостей переме-

щения капли воды от времени. Соответствующие графики представлены на рисунке 4 [15]. На графике совокупность точек, сгруппированных по типам маркеров, отражает траектории отдельных всплывающих капель. Начало отсчета координат соответствовало положению поверхности кольцевого постоянного магнита.

Пересчет координат в миллиметры определяли по пикселям, а время – по номерам кадров.

Данные зависимости могут быть интерпретированы с помощью формулы

$$x(t) = x_0 + v_0 \tau [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (2)$$

где x_0 и v_0 – начальное положение и начальная скорость капли (начальное ускорение непосредственно следует из этих параметров как $a_0 = (-v_0/\tau)$, τ – время замедления движения капли).

Обработка данных, полученных при анализе видеозаписей процесса всплытия капель воды (момент отрыва которых был одинаковым для всех рассматриваемых случаев), проводилась с использованием встроенной функции MATLAB "nlinfit". Данная функция реализует нелинейный метод наименьших квадратов, основанный на алгоритме Левенберга – Марквардта. Итоговые численные значения, полученные в результате аппроксимации, представлены в таблице 2.

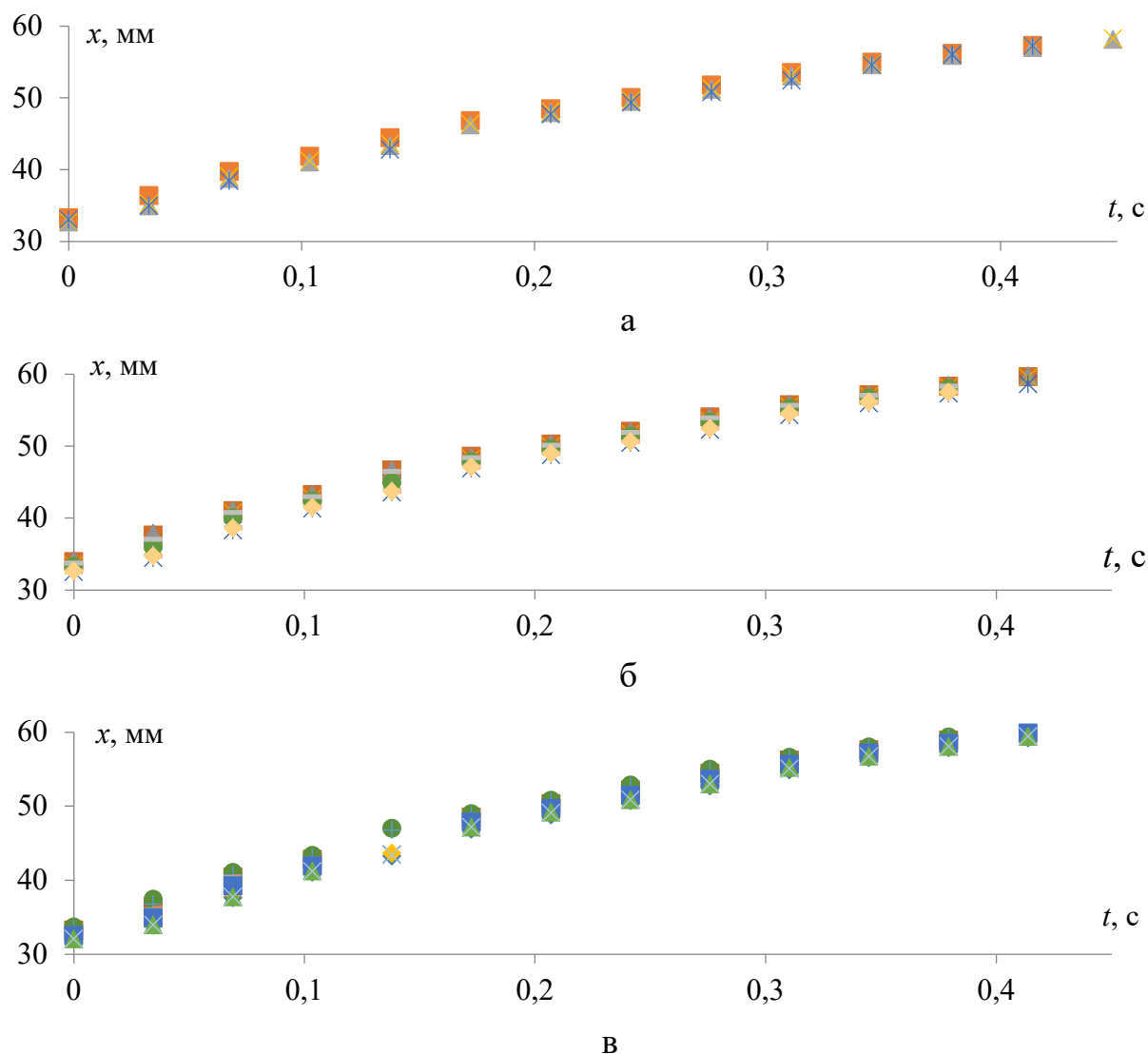


Рис. 4. Графики зависимостей координаты движения капли от времени: а – при $H = 41,9$ кА/м; б – при $H = 44,9$ кА/м; в – при $H = 48,2$ кА/м

Fig. 4. Graphs of the dependences of the drop motion coordinate on time: а – at $H = 41,9$ кА/м; б – at $H = 44,9$ кА/м; в – at $H = 48,2$ кА/м

Таблица 2. Параметры уравнения (1)

Table 2. Parameters of equation (1)

Параметры	$H = 41,9$ кА/м	$H = 44,9$ кА/м	$H = 48,2$ кА/м
x_0 , мм	32,8	33,2	32,5
v_0 , мм/с	92,7	101,5	105,2
τ , с	0,42	0,40	0,42

С использованием экспериментальных данных, сведенных в таблицу 2, были получены временные зависимости скорости и ускорения всплывающей в магнит-

ной жидкости водяной капли. Соответствующие графики для различных уровней напряженности магнитного поля представлены на рисунках 5 и 6.

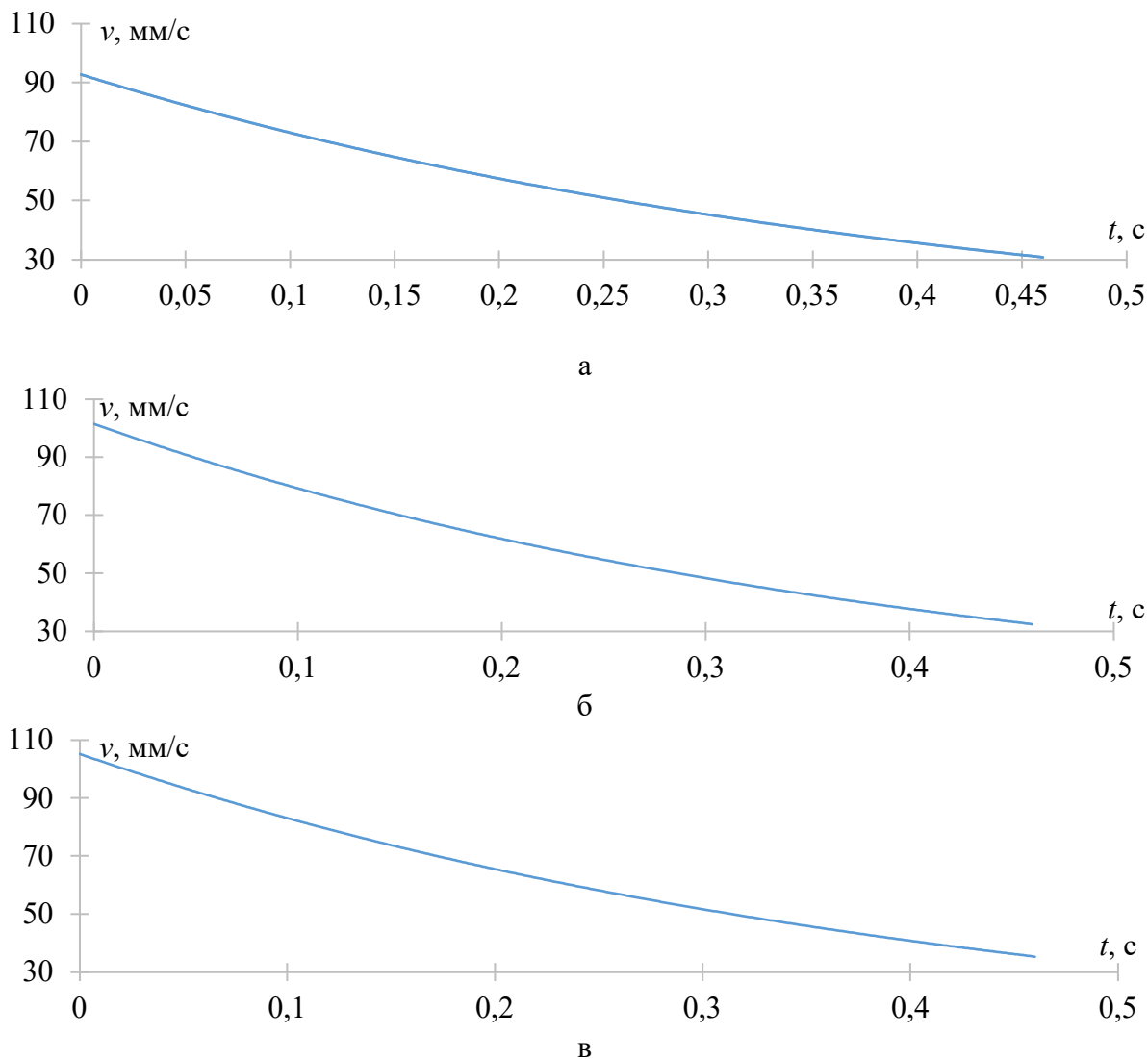


Рис. 5. Зависимости скорости капли воды от времени для разных напряженностей МП:
а – $H = 41,9$ кА/м; б – $H = 44,9$ кА/м; в – $H = 48,2$ кА/м

Fig. 5. Dependences of the velocity of a water drop on time for different MF voltages: а – $H = 41,9$ кА/м; б – $H = 44,9$ кА/м; в – $H = 48,2$ кА/м

Представленные на рисунке 5 кривые отражают характер изменения скорости капли во времени и описываются зависимостью следующего вида:

$$v(t) = v_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (3)$$

Численные значения параметров v_0 и τ , соответствующие различным напряженностям магнитного поля, взяты из данных, систематизированных в таблице 2.

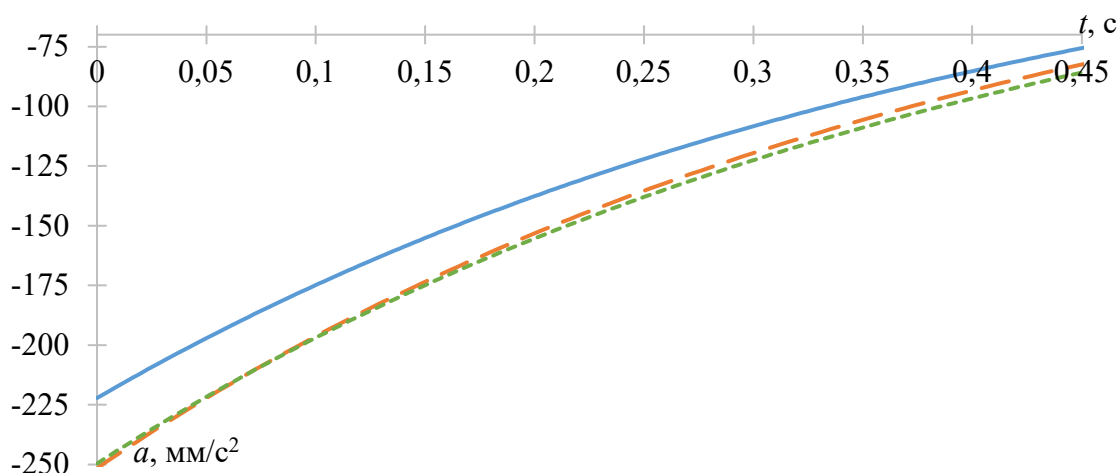


Рис. 6. Зависимость ускорения капли воды от времени для разных значений напряженности МП:
 — $H = 41,9$ кА/м; — $H = 44,9$ кА/м; - - $H = 48,2$ кА/м

Fig. 6. Dependence of the acceleration of a water drop on time for different values of the MF voltage:
 — $H = 41.9$ кА/м; — $H = 44.9$ кА/м; - - $H = 48.2$ кА/м

Как следует из графиков, приведенных на рисунке 6, ускорение капли воды при её всплытии в магнитной жидкости с течением времени монотонно убывает, приближаясь к нулевому значению.

Выводы

В ходе выполнения работы экспериментально установлены количественные характеристики скорости и ускорения каплей воды, поднимающихся в магнитной жидкости, в зависимости от напряженности неоднородного магнитного поля, создаваемого комбинированной системой магнитов. Экспериментальные данные, полученные с помощью оригинальной ме-

тодики и программно-аппаратного комплекса, хорошо согласуются с результатами численного моделирования в пакете FEMM. Показано, что изменение силы тока в соленоиде позволяет эффективно управлять динамикой немагнитных включений, изменяя их скорость и ускорение.

Полученные результаты подтверждают возможность управления движением дисперсных фаз в магнитожидкостных средах с помощью внешнего неоднородного магнитного поля. Это открывает перспективы для разработки новых технологий, основанных на контролируемом дозировании и синтезе капель, таких как программируемые дозаторы, лаборатории-на-чипе и микромиксеры.

Список литературы

1. Magnetic fluids: the interaction between the microstructure, macroscopic properties, and dynamics under different combinations of external influences / P. Ryapolov, A. Vasilyeva, D. Kalyuzhnaya, A. Churaev, E. Sokolov, E. Shel'deshova // *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, no. 2. P. 222. <https://doi.org/10.3390/nano14020222>.
2. Lee C. P., Lan T. S., Lai M. F. Fabrication of two-dimensional ferrofluid microdroplet lattices in a microfluidic channel // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115, no. 17. <https://doi.org/10.1063/1.4867964>.

3. Hejazian M., Phan D. T., Nguyen N. T. Mass transport improvement in microscale using diluted ferrofluid and a non-uniform magnetic field // RSC advances. 2016. Vol. 6, no. 67. P. 62439-62444. <https://doi.org/10.1039/C6RA11703A>.
4. Bohara R. A., Thorat N. D., Pawar S. H. Role of functionalization: Strategies to explore potential nano-bio applications of magnetic nanoparticles // RSC advances. 2016. Vol. 6, no. 50. P. 43989-44012. <https://doi.org/10.1039/C6RA02129H>.
5. Capture of a moving ferrofluid droplet in a minichannel with a nonuniform magnetic field / Y. He, C. Huang, J. Liu, X. Yang, F. Jiao // Chemical Engineering Science. 2025. Vol. 319. P. 122314. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122314>.
6. Asfer M., Saroj S. K., Panigrahi P. K. Retention of ferrofluid aggregates at the target site during magnetic drug targeting // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 436. P. 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.04.020>.
7. Iron oxide nanoparticles for magnetically-guided and magnetically-responsive drug delivery / J. Estelrich, E. Escribano, J. Queralt, M. A. Busquets // International journal of molecular sciences. 2015. Vol. 16, no. 4. P. 8070-8101. <https://doi.org/10.3390/ijms16048070>.
8. Полунин В. М., Мью М. Т., Боев М. Л. Новый метод исследования, основанный на использовании эффекта магнитной левитации // Ультразвук и термодинамические свойства вещества. 2012. № 38. С. 77–82.
9. Ряполов П. А., Соколов Е. А., Калюжная Д. А. Влияние конфигурации магнитного поля на отрыв газовых пузырьков в магнитной жидкости // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87, № 3. С. 348-352. <https://doi.org/10.3103/s106287382270112x>.
10. Динамическое поведение газовых пузырьков и капель в магнитной жидкости в микрожидкостных чипах различной конфигурации в неоднородном магнитном поле / Д. А. Калюжная, Е. А. Соколов, А. О. Васильева, И. Ю. Сутарина, Е. В. Шельдешова, П. А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 152-167. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-4-152-167>.
11. Ryapolov P. A., Sokolov E. A., Postnikov E. B. Behavior of a gas bubble separating from a cavity formed in magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. Vol. 549. P. 169067.
12. Kamal H. A., Salloom M. Y. Evaluation of FEMM software for magnetic analysis of the magnetorheological application // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2415, no. 1. P. 060021. <https://doi.org/10.1063/5.0092911>.
13. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Magnetostatic buoyancy force acting on a non-magnetic sphere immersed in a ferrofluid magnetized by a gradient field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. Vol. 565. P. 170294.
14. Sokolov E. A., Kalyuzhnaya D. A., Ryapolov P. A. Behavior of bubbles and droplets in magnetic fluid: comparison of experiment and modeling // Proceedings of the 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon). St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2025. P. 1214-1217.
15. Соколов Е. А., Ряполов П. А. Поведение дисперсных сред на магнитожидкостной основе в неоднородных магнитных полях // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 177–193. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-177-193>.

References

1. Ryapolov P., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Churaev A., Sokolov E., Shel'deshova E. Magnetic fluids: the interaction between the microstructure, macroscopic properties, and dynamics under different combinations of external influences. *Nanomaterials*. 2024;14(2):222. <https://doi.org/10.3390/nano14020222>.

2. Lee C.P., Lan T.S., Lai M.F. Fabrication of two-dimensional ferrofluid microdroplet lattices in a microfluidic channel. *Journal of Applied Physics*. 2014;115(17). <https://doi.org/10.1063/1.4867964>.
3. Hejazian M., Phan D.T., Nguyen N.T. Mass transport improvement in microscale using diluted ferrofluid and a non-uniform magnetic field. *RSC advances*. 2016;6(67):62439-62444. <https://doi.org/10.1039/C6RA11703A>.
4. Bohara R.A., Thorat N.D., Pawar S.H. Role of functionalization: Strategies to explore potential nano-bio applications of magnetic nanoparticles. *RSC advances*. 2016;6(50):43989-44012. <https://doi.org/10.1039/C6RA02129H>.
5. He Y., Huang C., Liu J., Yang X., Jiao F. Capture of a moving ferrofluid droplet in a minichannel with a nonuniform magnetic field. *Chemical Engineering Science*. 2025;319:122314. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122314>.
6. Asfer M., Saroj S.K., Panigrahi P.K. Retention of ferrofluid aggregates at the target site during magnetic drug targeting. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017;(436):47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.04.020>.
7. Estelrich J., Escribano E., Queralt J., Busquets M.A. Iron oxide nanoparticles for magnetically-guided and magnetically-responsive drug delivery. *International journal of molecular sciences*. 2015;16(4):8070-8101. <https://doi.org/10.3390/ijms16048070>.
8. Polunin V.M., M'o M.T., Boev M.L. A new research method based on the use of the magnetic levitation effect. *Ul'trazvuk i termodinamicheskie svoystva veshchestva = Ultrasound and thermodynamic properties of matter*. 2012;(38):77-82. (In Russ.)
9. Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A. Influence of the magnetic field configuration on the separation of gas bubbles in a magnetic liquid. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023;87(3):348-352. (In Russ.) <https://doi.org/10.3103/s106287382270112x>.
10. Kalyuzhnaya D.A., Sokolov E.A., Vasil'eva A.O., Sutarina I.Yu., Shel'deshova E.V., Ryapolov P.A. Dynamic behavior of gas bubbles and droplets in a magnetic liquid in microfluidic chips of various configurations in an inhomogeneous magnetic field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(4):152-167. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-4-152-167>.
11. Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Postnikov E.B. Behavior of a gas bubble separating from a cavity formed in magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022;(549):169067.
12. Kamal H.A., Salloom M.Y. Evaluation of FEMM software for magnetic analysis of the magnetorheological application. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2415(1):060021. <https://doi.org/10.1063/5.0092911>.
13. Ivanov A. S., Pshenichnikov A. F. Magnetostatic buoyancy force acting on a non-magnetic sphere immersed in a ferrofluid magnetized by a gradient field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023;(565):170294.
14. Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Ryapolov P.A. Behavior of bubbles and droplets in magnetic fluid: comparison of experiment and modeling. *Proceedings of the 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon)*. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; 2025. P. 1214-1217.
15. Sokolov E.A., Ryapolov P.A. Behavior of disperse media based on magnetic fluids in inhomogeneous magnetic fields. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(1):177-193. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-177-193>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Соколов Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Evgeniy A. Sokolov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Lecturer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Калюжная Дарья Анатольевна, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru

Dariya A. Kalyuzhnaya, Postgraduate Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru

Ширяев Дмитрий Иванович, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dsirae611@gmail.com

Dmitry I. Shiryaev, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: e-mail: dsirae611@gmail.com

Булгакова Варвара Алексеевна, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bulg-varvara@yandex.ru

Varvara A. Bulgakova, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bulg-varvara@yandex.ru

Маслова Василиса Павловна, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pivonapolyu@mail.ru

Vasilisa P. Maslova, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pivonapolyu@mail.ru

Рязанцева Мария Олеговна, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: masarazanceva878@gmail.com

Maria O. Ryazantseva, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: masarazanceva878@gmail.com