

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.951

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-177-193>

Поведение дисперсных сред на магнитожидкостной основе в неоднородных магнитных полях

Е.А. Соколов^{1✉}, П.А. Ряполов¹¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Резюме

Цель. Исследовать поведение дисперсных сред на основе нанодисперсных магнитных жидкостей: немагнитных жидких и газообразных включений в магнитной жидкости, капель магнитной жидкости в немагнитной среде, а также немагнитных пузырьков и капель, покрытых оболочкой из магнитной жидкости, в неоднородных магнитных полях.

Методы. Результаты были получены экспериментальным путем с использованием общепризнанных методик и подходов. Установки, на которых проводились исследования, были разработаны самостоятельно, а сбор данных осуществлялся с применением стандартного измерительного оборудования. Значение индукции магнитного поля было измерено с помощью тесламетра ТПУ-01 с подключенным к нему преобразователем Холла. Топология магнитного поля была смоделирована с использованием программного обеспечения FEMM, внедренного в интерактивную среду MathLab. Платформа осуществляет не только моделирование магнитного поля, но и осуществляет качественное преобразование результатов расчета и выполняет их визуализацию. Обработка изображений немагнитных включений проводилась в специально разработанной программе в системе NI Labview. Теоретическая обработка экспериментальных результатов проводилась на основе известных выражений физики конденсированного состояния, магнитной и классической гидродинамики.

Результаты. Получены экспериментальные зависимости координаты, скорости, размера дисперсных сред на основе магнитной жидкости от параметров магнитного поля, физических свойств магнитных и немагнитных жидкостей. На основе результатов компьютерного моделирования в программе FEMM проведена оценка сил, действующих на магнитную каплю и пузырек в магнитной жидкости. Полученные экспериментальные и теоретические данные согласуются друг с другом.

Вывод. Неоднородное магнитное поле позволяет управлять динамикой и поведением дисперсных сред на магнитожидкостной основе, что создает предпосылки для создания управляемых дозаторов и систем синтеза активных капель.

Ключевые слова: магнитные жидкости; дисперсные среды; магнитное поле; магнитогидродинамика.

Финансирование: Статья подготовлена в рамках государственного задания на 2025 год № 075-03-2025-526.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 03.02.2025

Подписана в печать 28.02.2025

Опубликована 20.03.2025

Behavior of disperse media based on magnetic fluids in inhomogeneous magnetic fields

Evgeniy A. Sokolov^{1✉}, Petr A. Ryapolov¹

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

✉ e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Abstract

Purpose. To study the behavior of dispersed media based on nanodispersed magnetic fluids: non-magnetic liquid and gaseous inclusions in a magnetic fluid, drops of magnetic fluid in a non-magnetic medium, as well as non-magnetic bubbles and drops covered with a shell of magnetic fluid in non-uniform magnetic fields.

Methods. The results were obtained experimentally using generally accepted methods and approaches. The setups used for the studies were developed independently, and data were collected using standard measuring equipment. The magnetic field induction value was measured using a TPU-01 teslameter with a Hall transducer connected to it. The magnetic field topology was modeled using the FEMM software embedded in the MathLab interactive environment. The platform not only models the magnetic field, but also qualitatively transforms the calculation results and visualizes them. The images of non-magnetic inclusions were processed in a specially developed program in the NI Labview system. Theoretical processing of the experimental results was based on known expressions of condensed matter physics, magnetic and classical hydrodynamics.

Results. Experimental dependences of the coordinate, velocity, size of dispersed media based on magnetic fluid on the magnetic field parameters, physical properties of magnetic and non-magnetic fluids are obtained. Based on the results of computer modeling in the FEMM program, an assessment of the forces acting on a non-magnetic drop and bubble in a magnetic fluid is carried out. The obtained experimental and theoretical data are consistent with each other. Experimental dependences of the position, velocity, and size of magnetic fluid-based disperse media on magnetic field parameters and the physical properties of magnetic and non-magnetic liquids were obtained. Computer simulations were used to estimate the forces acting on non-magnetic droplets and bubbles in a magnetic fluid. The experimental and theoretical data are in good agreement.

Conclusion. An inhomogeneous magnetic field allows for the control of the dynamics and behavior of magnetic fluid-based disperse media, paving the way for the development of controllable dispensers and systems for synthesizing active droplets.

Keywords: magnetic fluids; disperse media; magnetic field; magnetohydrodynamics.

Funding: This work was supported by the state assignment for 2025, project No. 075-03-2025-526.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: 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>.

Received 03.02.2025

Accepted 28.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

Магнитные жидкости (МЖ), также известные как феррожидкости или ферромагнитные коллоиды, представляют собой уникальные дисперсные системы, состоящие из наночастиц магнитных материалов (таких как магнетит Fe_3O_4 , железо,

никель или кобальт) [1], стабилизированных поверхностно-активными веществами (ПАВ) [2], диспергированных в жидкости-носителе [3]. Эти жидкости обладают сочетанием текучести и магнитной восприимчивости, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешних магнитных полей. Первые МЖ

были получены в 1963 г. С. Пейпеллом методом механического измельчения магнетита в шаровой мельнице [4], что положило начало активным исследованиям в области синтеза, стабилизации и применения магнитных коллоидов.

Ключевой особенностью МЖ является их способность изменять реологические, оптические и термические характеристики под действием магнитного поля. Например, вязкость жидкости может резко возрасти при наложении поля (магнитовязкий эффект) [5], а оптические свойства, такие как коэффициент преломления, демонстрируют аномально высокие значения [6]. Эти свойства делают МЖ перспективными материалами для использования в различных областях, включая герметизацию вращающихся валов [7], магнитную левитацию [8], микрофлюидику [9] и биомедицину [10].

Магнитные свойства МЖ описываются теорией Ланжевена, учитывающей конкуренцию между магнитным моментом частиц и тепловым движением. В слабых полях намагниченность растет линейно, а в сильных приближается к насыщению. Для реальных полидисперсных систем важную роль играют межчастичные взаимодействия, что отражено в моделях эффективного поля (MMF2) [11]. Экспериментально подтверждено, что такие модели обеспечивают точность до 3% при описании намагничивания в широком диапазоне температур и концентраций [12].

Одним из наиболее перспективных направлений является использование МЖ в биомедицине, включая адресную доставку лекарств, гипертермию и диагностику [13]. Например, магнитные наноча-

стицы, функционализированные биосовместимыми ПАВ, могут избирательно связываться с опухолевыми клетками, что позволяет локально нагревать их под действием переменного магнитного поля [10]. Однако высокая стоимость специфических ПАВ ограничивает широкое применение таких систем [14].

Перспективной альтернативой могут выступать микрофлюидные технологии, позволяющие управлять дисперсными системами на основе магнитных жидкостей посредством внешних магнитных полей. К таким системам относятся: немагнитные капли и газовые пузырьки в магнитной жидкости; капли магнитной жидкости в немагнитной среде; композитные структуры с немагнитным ядром и магнитожидкостной оболочкой. Следует отметить, что современные исследования в данной области, включая работы по изучению прямых и обратных эмульсий [15], а также поведения отдельных капель и пузырьков [16], ограничиваются анализом динамики исключительно в однородных магнитных полях. Это существенно сужает область практического применения полученных результатов. Хотя проблеме посвящено значительное количество публикаций, комплексные исследования, включающие эксперимент, компьютерное моделирование и теоретический расчет во всех обозначенных выше вариантах дисперсных сред на магнитожидкостной основе, пока не реализованы.

Материалы и методы

В экспериментах использовалась установка, схема которой показана на рисунке 1, которая впервые описана в работе [17].

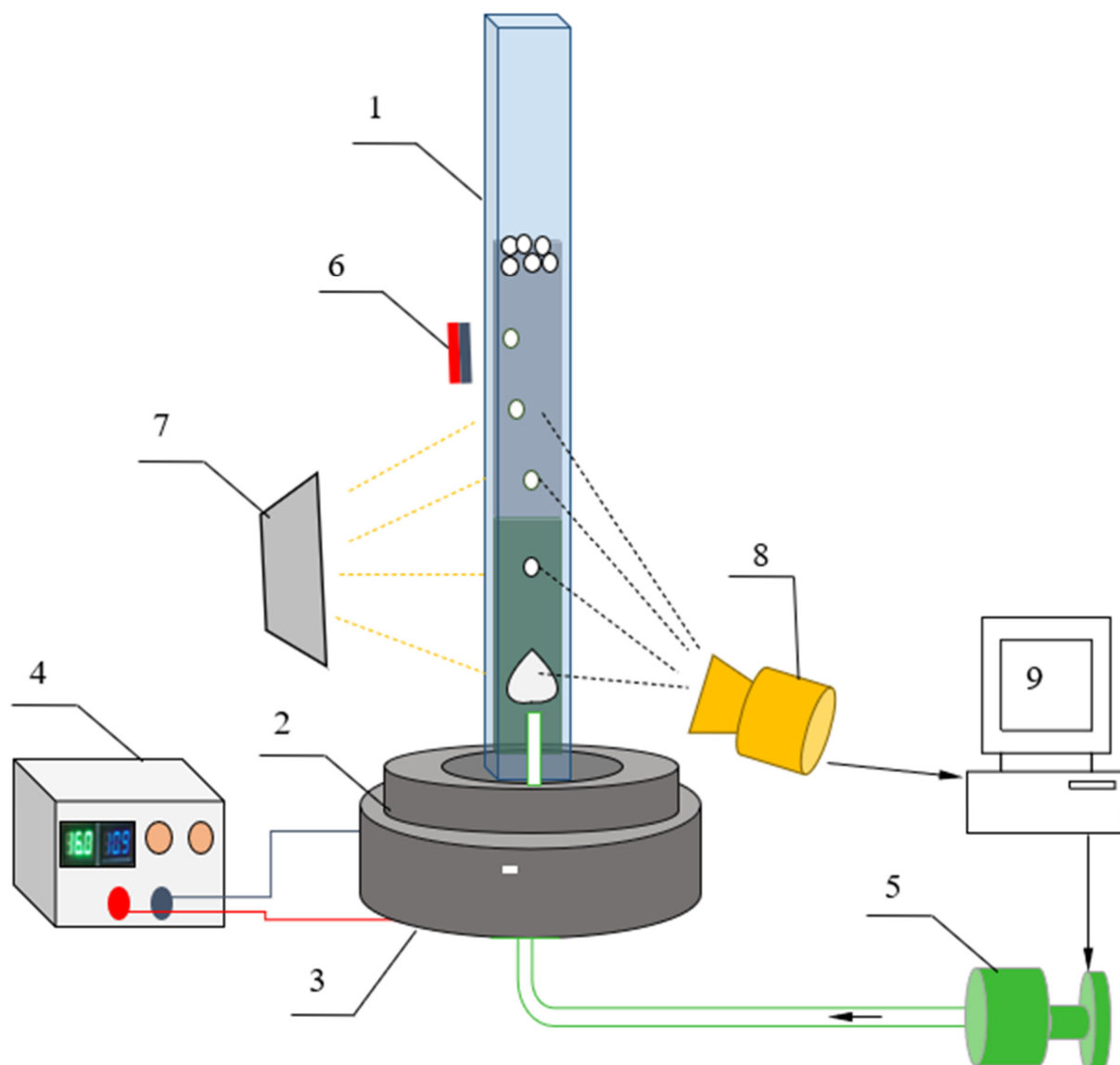


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Эксперимент проводился следующим образом. После предварительного перемешивания образца магнитной жидкости, жидкость набиралась в шприц, который соединяется с подключичным катетером. Для исследований был изготовлен плоский стеклянный канал 1. Технология изготовления плоского канала заключалась в следующем: 2 оптически прозрачные стеклянные пластины были склеены между собой на расстоянии с помощью двухкомпонентной эпоксидной смолы.

Подача образца магнитной жидкости в канал и заполнение его до необходимого уровня осуществлялись по боковой части плоского канала для предотвращения загрязнения и сохранения прозрачности передней и задней стеклянных стенок. После заполнения образцом МЖ канал помещался в дегазационную камеру для удаления образовавшихся пузырьков воздуха в объеме жидкости. Затем плоский прозрачный стеклянный канал устанавливался вертикально по уровню с помощью

системы немагнитных крепежных элементов. В качестве источника неоднородного магнитного поля используется кольцевой постоянный магнит 2, помещенный сверху электромагнита 3. Вместе они образуют комбинированный источник магнитного поля, который расположен соосно оси канала и подключен к источнику питания 4 для изменения напряженности магнитного поля. Для подачи газа или жидкости в канал подведена трубка подключичного катетера, соединенная с шприцевым насосом 5 (работа которого основана на вращательно поступательном движении). В качестве источника света используется управляемый светодиодный осветитель 7. Запись динамики немагнитных включений осуществляется в проходящем свете с помощью высокоскоростной камеры 8 (Nikon 1), подключенной к компьютеру 9. Обработка полученных видеоизображений происходила с помощью разработанного специального комплекса программ в среде National Instruments LabView, которые основаны на алгоритмах машинного зрения.

Для исследования влияния значения напряженности магнитного поля и концентрации МЖ на коэффициент удлинения и форму капли магнитной жидкости, плавающей в немагнитной среде, в установку были внесены следующие изменения: кольцевой магнит 2 был удален, эжекция магнитной жидкости осуществлялась через капилляр, встроенный в дно канала, который был заполнен смесью глицерина и воды. Соотношение воды и глицерина подбиралось таким образом, чтобы капля плавала на расстоянии 20 мм от верхнего края соленоида.

Также на данной установке был предложен механизм формирования магнито-

активных пузырьков и капель, содержащих немагнитное ядро, покрытое магнитожидкостной оболочкой, локализованных магнитным полем, создаваемым кольцевым постоянным магнитом. Для этого в канал заливалась двухфазная система, нижний слой которой представлял магнитную жидкость на водной основе, а верхний – несмешивающийся с ней слой масла. С помощью шприцевого насоса в область магнитного вакуума инжестировались немагнитные включения, которые, всплывая, покрывались слоем магнитной жидкости. Для исследования влияния внешнего магнитного поля на динамику пузырьков, покрытых магнитной оболочкой, подносился постоянный магнит 6.

В ходе исследования применялись образцы магнитных жидкостей, содержащие наночастицы магнетита Fe_3O_4 . В качестве дисперсионных сред использовались вода, трансформаторное масло и керосин. Основные физико-химические характеристики исследуемых образцов, включая объемную концентрацию твердой фазы, плотность, вязкость и намагниченность, приведены в таблице 1. Образцы МЖ-1.2–МЖ-1.4 и МЖ-2.2–МЖ-2.4 были приготовлены методом последовательного разбавления исходных концентратов МЖ-1.1 и МЖ-2.1 соответствующими жидкостями-носителями в заданных соотношениях.

В образцах МЖ на основе воды (МЖ-1.1 – МЖ-1.4) частицы стабилизированы двойным слоем поверхностно-активного вещества: олеиновая кислота + олеат натрия. В магнитных жидкостях на основе керосина и трансформаторного масла стабилизатором частиц магнетита служит олеиновая кислота.

Таблица 1. Физические параметры магнитных жидкостей**Table 1.** Physical parameters of magnetic fluids

МЖ MF	Жидкость-носитель Carrier fluid	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	φ , %	M_s , кА/м M_s , kA/m	η , мПа·с η , mPa·s
МЖ-1.1 MF-1.1	Вода Water	1212	4,9	21,7	5,6
МЖ-1.2 MF-1.2		1082	1,9	11,0	2,15
МЖ-1.3 MF-1.3		1056	1,3	6,98	1,65
МЖ-1.4 MF-1.4		1026	0,72	3,7	1,5
МЖ-2.1 MF-2.1	Трансформаторное масло Transformer oil	1270	10,31	39,9	594
МЖ-2.2 MF-2.2		1018	4,26	17	69
МЖ-2.3 MF-2.3		897	1,35	8,7	39,6
МЖ-2.4 MF-2.4		890	0,98	3,3	23,05
МЖ-3 MF-3	Керосин Kerosene	936	3,63	12,5	2,45

В качестве немагнитных фаз в исследованиях использовались такие вещества, как дистиллированная вода, воздух, масло VDL100 и глицерин.

Результаты и их обсуждение

С помощью программного пакета FEMM выполнены расчет и визуализация топологии неоднородного магнитного поля при всплытии капли воды в образце магнитной жидкости МЖ-3 под действием неоднородного магнитного поля, пример которой показан на рисунке 2 для тока в катушке соленоида 1.8 А.

При всплытии немагнитной капли воды в магнитной жидкости на нее действуют пондеромоторная сила F_p , сила Архимеда F_A , сила тяжести $F_{тяж}$ и сила трения $F_{тр}$.

Если известна напряженность внешнего магнитного поля $H(z)$ и его градиент $\nabla H(z)$, то легко вычислить пондеромоторную силу F_p , действующую на каплю немагнитной жидкости в магнитной, помещенную в неоднородное магнитное поле, по формуле Х. А. Пола [18]

$$F_n = \mu_0 \frac{4\pi R^3 (\mu_i - \mu_e) \mu_e}{(2\mu_e + \mu_i)} \cdot H \nabla H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – универсальная магнитная постоянная; R – радиус капли; μ_i – магнитная проницаемость капли; μ_e – магнитная проницаемость магнитной жидкости; H – напряженность внешнего магнитного поля; ∇H – градиент напряженности магнитного поля.

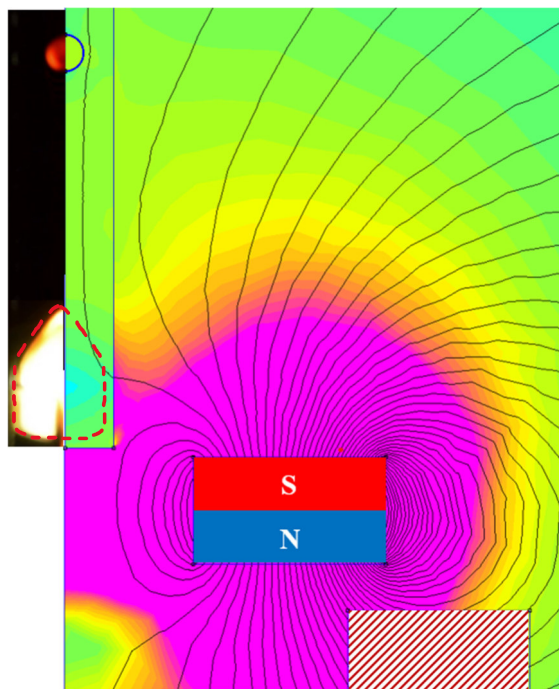


Рис. 2. Визуализация напряженности магнитного поля H , действующего на немагнитную каплю в МЖ-3

Fig. 2. Visualization of the strength of the magnetic field H acting on a non-magnetic drop in MF-3

Помимо пондеромоторной силы, на каплю, всплывающую в магнитной жидкости, действуют силы Архимеда F_A (2) и сила тяжести $F_{тяж}$ (3), которые остаются постоянными, а также сила вязкого трения $F_{тр}$.

$$F_A = \rho g V, \quad (2)$$

$$F_{тяж} = mg, \quad (3)$$

где ρ – плотность магнитной жидкости; g – ускорение свободного падения; V – объем капли воды; m – масса капли воды.

Для расчета силы трения жидкой капли в несмешиваемой жидкости была использована формула из работ G. J. Srinivasan и P. Satyanarayana по исследованию силы сопротивления при движении капель жидкости через вязкую среду [19]:

$$F_{тр} = KD^{3/2}u^{3/2}\eta^{1/2}\rho^{1/2}, \quad (4)$$

где $K = \sqrt{2\pi}g(r/u)^{3/2}(\sigma - \rho)/3\eta^{1/2}\rho^{1/2}$ и является константой для двух несмешива-

ющихся жидкостей керосин-вода; $K = 4.6034$; D – диаметр капли; u – конечная скорость, приобретаемая каплей; η – плотность жидкости в канале; ρ – плотность жидкости в капле.

В ходе численного моделирования были получены зависимости всех сил, действующих на каплю от времени для различных сил тока, подаваемого на соленоид. Также показана результирующая сила $F_{рез}$, которая согласно второму закону Ньютона определяется с помощью выражения

$$F_{рез} = F_{\pi} + F_A - F_{тр} - F_{\tau} = ma, \quad (5)$$

где m – масса капли воды; a – ее ускорение.

С использованием полученных в результате экспериментов [20] и компьютерного моделирования данных на основе выражений (1)–(5) получены зависимости ускорения от времени, представленные на рисунке 3.

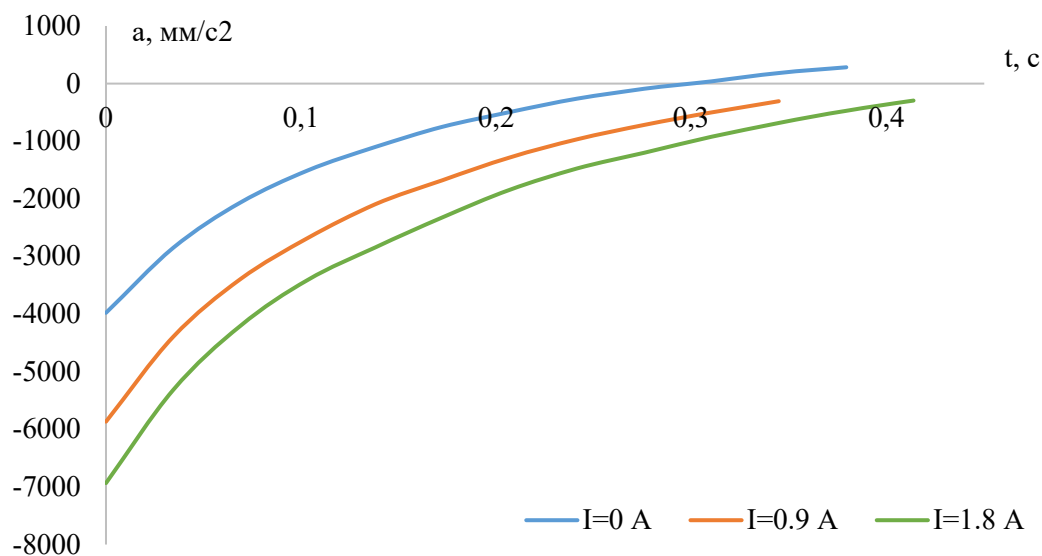


Рис. 3. Зависимость ускорения капли немагнитной жидкости в магнитной от времени

Fig. 3. Dependence of acceleration of a drop of non-magnetic liquid in a magnetic one on time

Еще одним способом получения зависимости скорости и ускорения всплывающей капли немагнитной жидкости в магнитной является анализ изображений, с помощью компьютерной обработки которых определяется зависимость координаты центра капли от времени, которая может быть аппроксимирована в виде следующей зависимости:

$$x(t) = x_0 + v_0 \tau [1 - \exp(-t / \tau)], \quad (4.1)$$

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

Зависимость ускорения от времени для каждого из образцов принимает вид, представленный на рисунке 4.

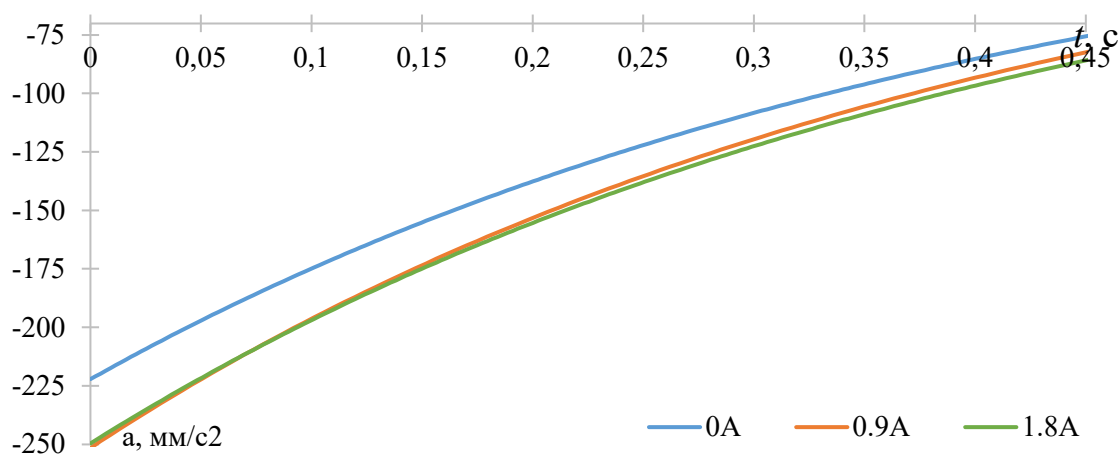


Рис. 4. Зависимость ускорения капли воды от времени для разных сил тока на соленоиде

Fig. 4. Dependence of the acceleration of a water drop on time for different current strengths on the solenoid

Полученные зависимости, представленные на рисунках 3, 4, качественно совпадают, но значения ускорения отличаются на порядок. Причиной этого является то, что выражения (1) – (5) не отражают наличия присоединенной массы и используются для качественной оценки полученных экспериментальных результатов, а также тот факт, что при расчетах

не учитывалось трение капли о стенки канала.

Аналогичный расчет был выполнен для капли магнитной жидкости для образцов МЖ-2.2 – МЖ-2.4 в немагнитной [21]. Результаты моделирования магнитного поля представлены на рисунке 5 для образца МЖ-2.4 и тока в катушке соленоида $I = 3,4$ А.

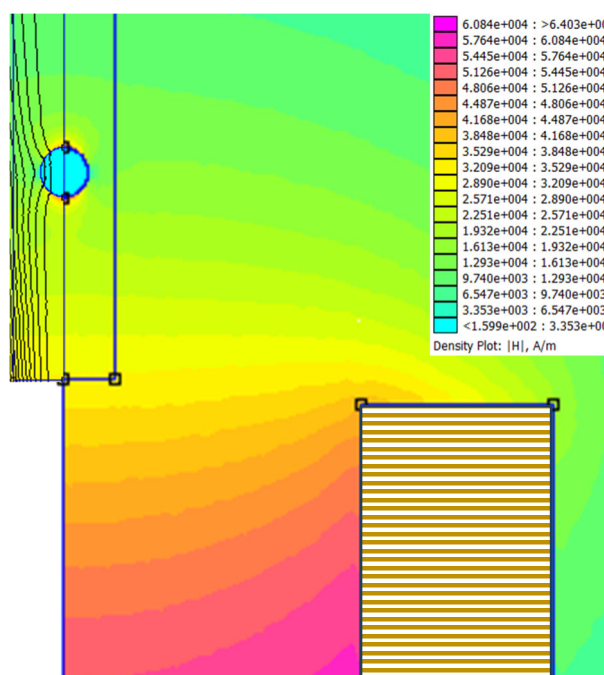


Рис. 5. Визуализация топологии неоднородного магнитного поля при всплытии капли МЖ для образца МЖ-2.4

Fig. 5. Visualization of the topology of the non-uniform magnetic field during the ascent of a drop of magnetic fluid for the sample MF-2.4

В этом случае на каплю МЖ действует результирующая сила, складывающаяся из силы тяжести $F_{\text{тяж}}$, силы Архимеда F_A и пондеромоторной силы $F_{\text{п}}$. Для оценки сил воспользуемся выражениями (1) – (3), подставив значения физических параметров образцов из таблицы 1. Графики данных сил и их результирующей представлены на рисунке 6.

Из графиков видно, что для образца МЖ-2.2 при увеличении силы тока в катушке от 2 до 3,4 А, результирующая сила, действующая на каплю МЖ, уменьшилась с $-0,95$ до $-3,15$ мН. Для образца МЖ-2.3 результирующая сила равна $-0,05$ мН при $I = 2$ А и $-0,18$ мН при $I = 3,4$ А, а для образца МЖ-2.4 при изменяющемся токе в катушке от 2 до 3,4 А изменяется с $0,21$ до $0,02$ мН.

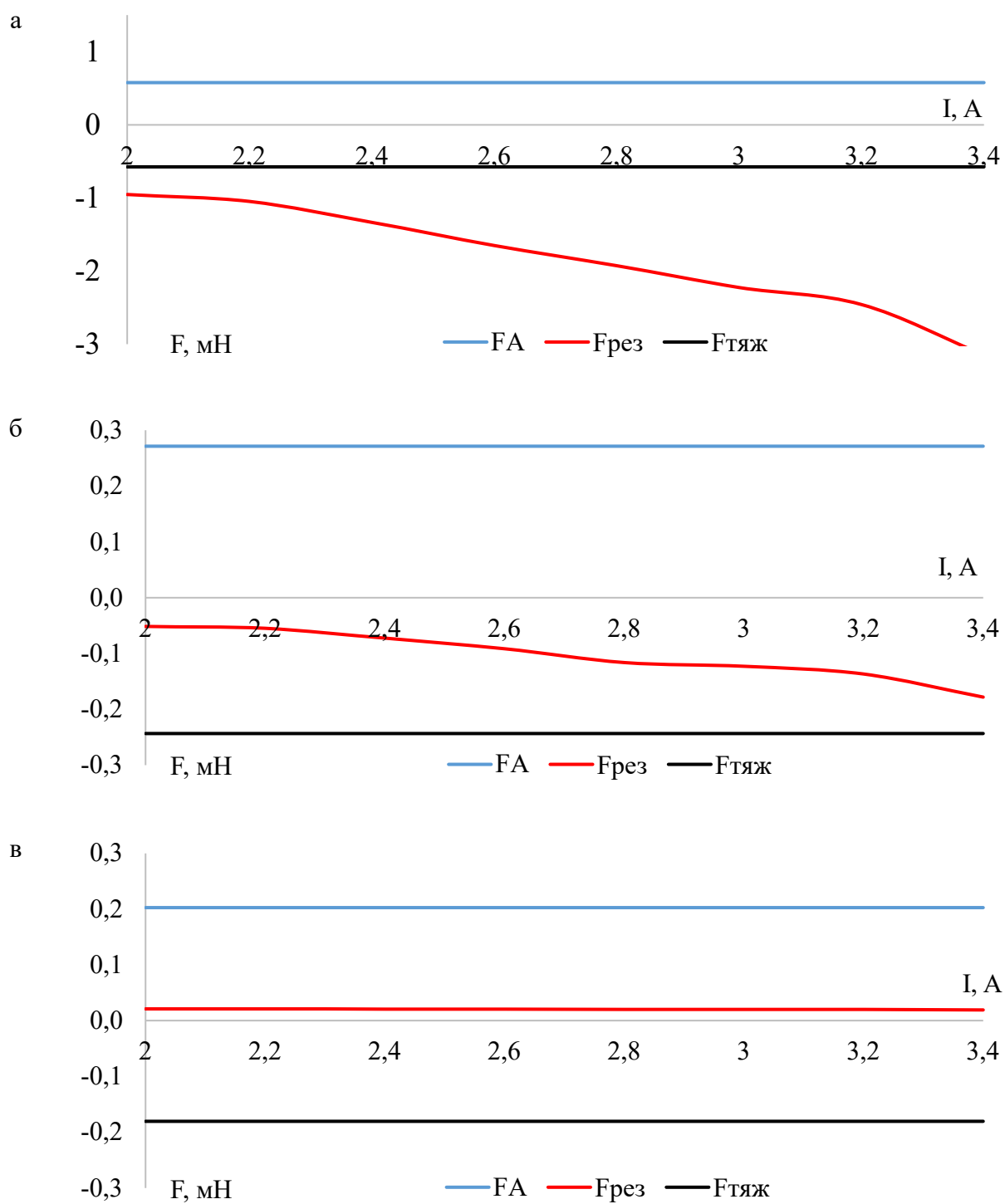


Рис. 6. Графики зависимостей сил, действующих на каплю МЖ в НМЖ, для образцов:
а – МЖ-2.2; б – МЖ-2.3; в – МЖ-2.4

Fig. 6. Graphs of the dependence of forces acting on a drop of MF in NMF for samples:
а – MF-2.2; б – MF-2.3; в – MF-2.4

Из представленных выше графиков видно, что результирующая сила близка к 0, что соответствует результатам эксперимента.

При всплытии композитного магнитного пузырька, состоящего из воздушного ядра и магнитожидкостной оболочки в немагнитной жидкости, на него действуют

пондеромоторная сила F_p , сила Архимеда F_A , сила тяжести $F_{тяж}$ и сила трения $F_{тр}$.

На основе экспериментальных данных получена зависимость диаметра воздушного пузырька без оболочки МЖ (рис. 7) и зависимость толщины оболочки МЖ, покрывающей воздушный пузырек (рис. 8), от концентрации магнитной фазы образца МЖ.

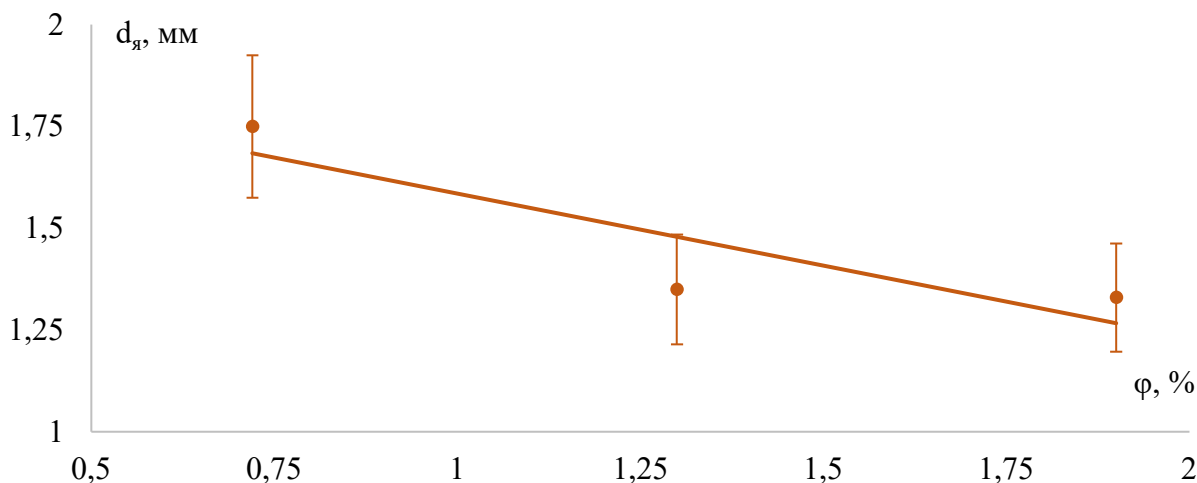


Рис. 7. Зависимость диаметра воздушного пузырька без оболочки МЖ от концентрации образца МЖ

Fig. 7. Dependence of the diameter of the air bubble without the MF shell on the concentration of the MF sample

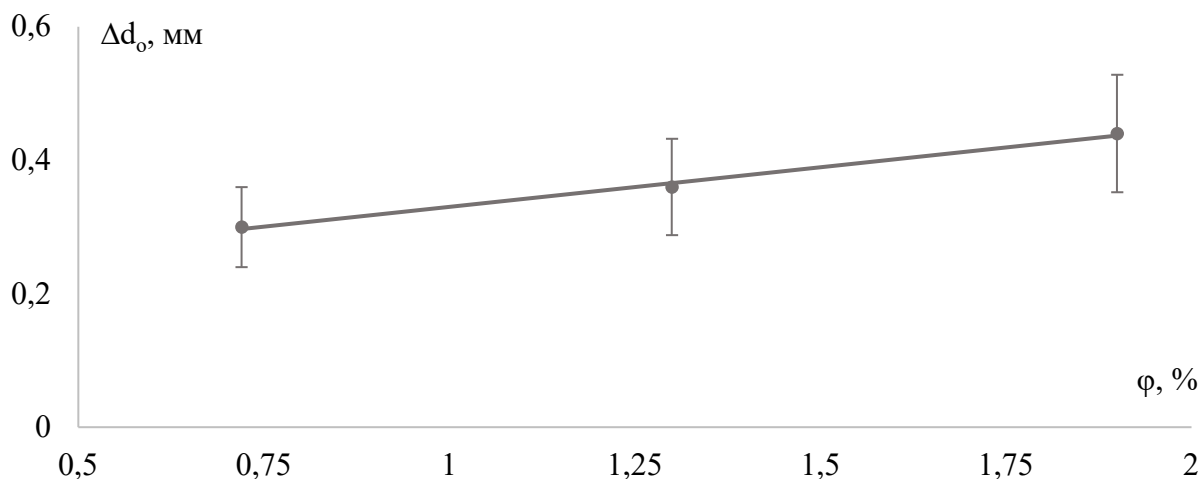


Рис. 8. Зависимость толщины оболочки МЖ воздушного пузырька от концентрации образца МЖ

Fig. 8. Dependence of the thickness of the MF air bubble shell on the concentration of the MF sample

Из данных, представленных на рисунках 7, 8, видно, что диаметр воздушного пузырька уменьшается при увеличении концентрации магнитной фазы МЖ, а толщина оболочки МЖ увеличивается. Диапазон изменений диаметра немагнитного ядра при этом составляет 1,33 – 1,75 мм, а магнитожидкостной оболочки 0,30 – 0,44 мм. Изменение данных характерис-

тики можно объяснить влиянием магнитных сил в момент отрыва.

Магнитное поле системы: композитный пузырек, всплывающий в немагнитной жидкости, находящейся над слоем магнитной жидкости в неоднородном поле кольцевого магнита [22], было смоделировано в программном пакете FEMM. Его результат представлен на рисунке 9.

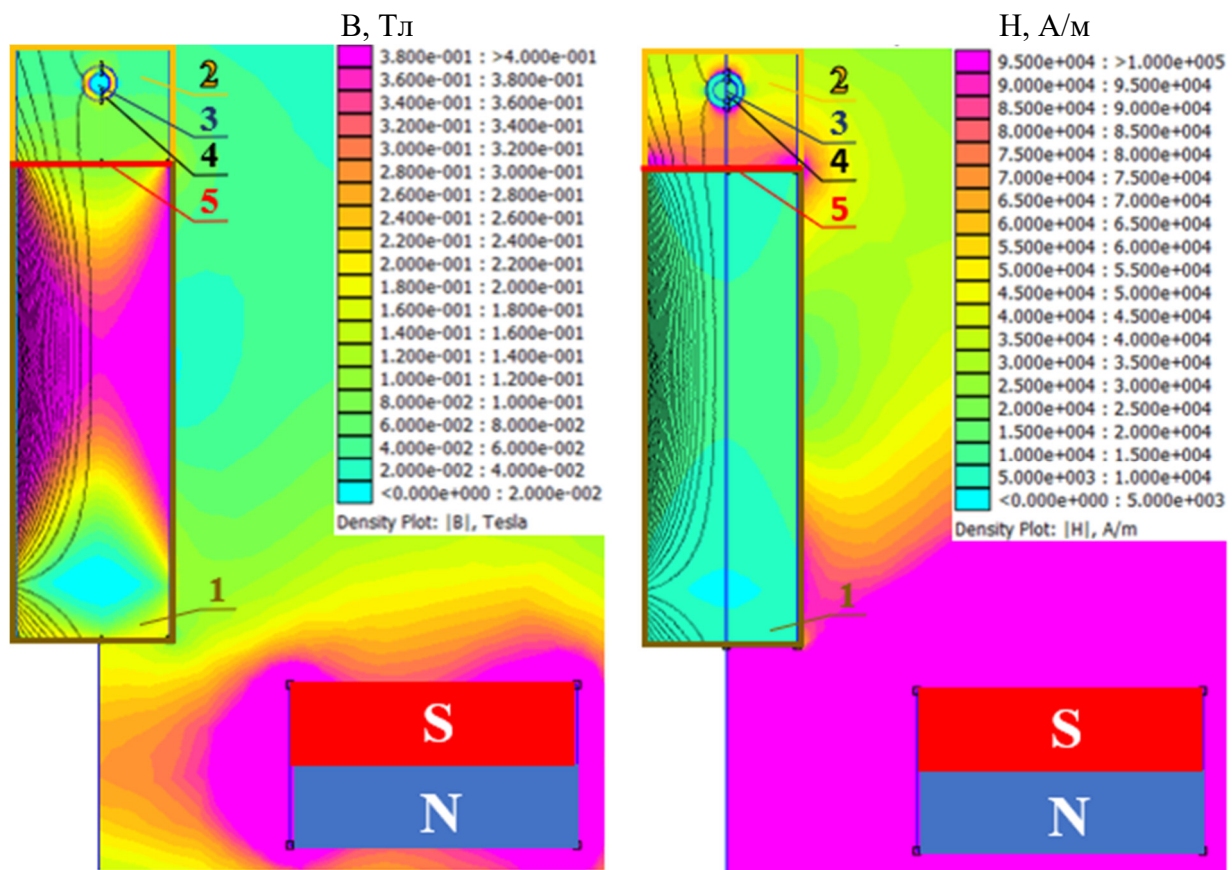


Рис. 9. Моделирование системы формирования пузырька воздуха в оболочке МЖ-1.2:

1 – МЖ; 2 – масло; 3 – воздух; 4 – оболочка пузырька из МЖ; 5 – межфазная граница МЖ-масло

Fig. 9. Modeling of the air bubble formation system in the shell of MF-1.2: 1 – MF; 2 – oil; 3 – air;

4 – bubble shell made of MF; 5 – MF-oil interphase boundary

С учетом выражений (1) – (5) были получены зависимости пондеромоторной силы, силы трения, силы плавучести и ре-

зультирующей силы от времени, представленные на рисунке 10 для каждого из образцов магнитной жидкости.

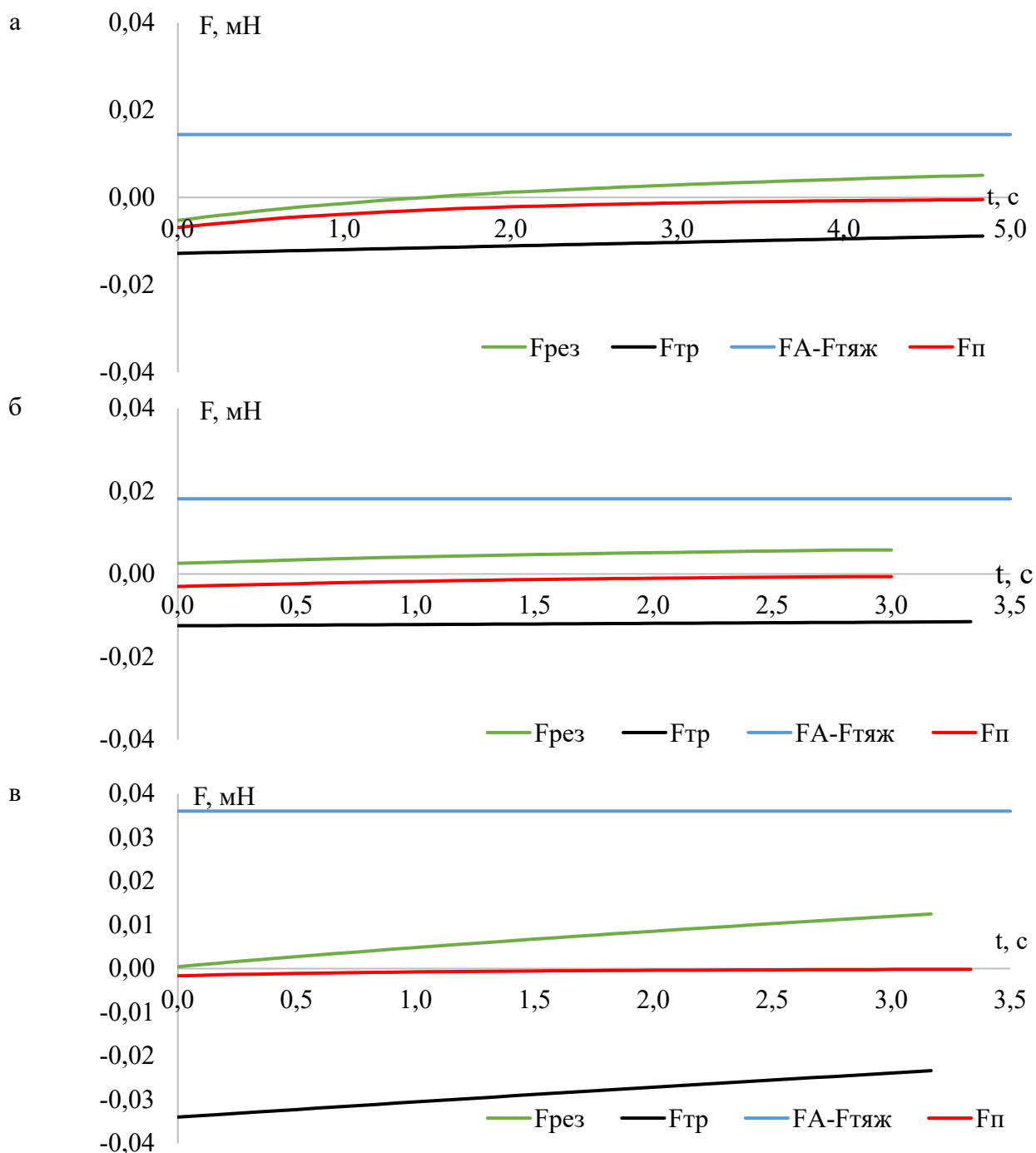


Рис. 11. Графики зависимостей сил, действующих на композитный пузырек, от времени в образцах: а – МЖ-2.2; б – МЖ-2.3; в – МЖ-2.4

Fig. 11. Graph of the dependence of forces acting on a composite bubble on time in samples: а – MF-2.2; б – MF-2.3; в – MF-2.4

Из приведённых графиков видно, что результирующая сила для всех образцов близка к нулю, что свидетельствует о равномерном характере движения пузырька, как показано в предыдущей работе [22].

Выводы

Комплексно рассмотрена динамика дисперсных сред на магнитожидкостной основе в неоднородных магнитных полях. Рассмотрены капли и пузырьки немагнитных жидкостей в магнитной жидкости. С

помощью пакета FEMM произведено моделирование магнитного поля в данной системе, произведен расчет сил, действующих на немагнитную каплю, а также ее ускорения, результаты расчета совпадают с данными, полученными из эксперимента. Также произведено моделирование магнитного поля и расчет сил на каплю магнитной жидкости, плавающую в немагнитной.

Предложен механизм формирования композитных пузырьков, состоящих из немагнитного ядра, диаметр которого составляет 1,33 – 1,75 мм, и магнитожид-

костной оболочки, толщина которой варьируется в диапазоне 0,30 – 0,44 мм. Показано, что данные размеры зависят от физических свойств магнитной жидкости и конфигурации магнитного поля, это создает предпосылки для создания систем управляемого синтеза дисперсных сред на магнитожидкостной основе. Из приведённых графиков видно, что результирующая сила для всех образцов близка к нулю, что свидетельствует о равномерном характере движения пузырька, как показано в предыдущих работах.

Список литературы

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с
2. Joseph A., Mathew S. Ferrofluids: synthetic strategies, stabilization, physicochemical features, characterization, and applications // *ChemPlusChem*. 2014. Vol. 79, no. 10. P. 1382–1420
3. Genc S., Derin B. Synthesis and rheology of ferrofluids: a review // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2014. Vol. 3. P. 118–124.
4. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles: patent US 3215572A United States / Papell S.S. Appl. 09-10.1963; publ. 02.11.1965.
5. Odenbach S., Gilly H. Taylor vortex flow of magnetic fluids under the influence of an azimuthal magnetic field // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 1996. Vol. 152, no. 1-2. P. 123–128.
6. Ерин К.В., Порублев А.А. Оптические свойства магнитных жидкостей на основе керосина // *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: V Всероссийская научная конференция: сборник научных трудов*. Ставрополь: Фабула, 2015. С. 79-85.
7. Sealing mechanism investigation of convergent ferrofluid seals with staggered pole teeth / X. Yang, X. Dou, Y. Liu, Y. Huang // *Tribology International*. 2023. Vol. 190. С. 109054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109054>.
8. Label-free manipulation via the magneto-Archimedes effect: fundamentals, methodology and applications / Q.H. Gao, Z.Z. Peng, H.-X. Zou, W.B. Li, H. Yan, Z. Peng [et al.] // *Materials Horizons*. 2019. Vol. 6, no. 7. P. 1359-1379. <https://doi.org/10.1039/c8mh01616j>.
9. 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. Art. no. 17B527. <https://doi.org/10.1063/1.4867964>.
10. 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.
11. Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations // *Physical Review E*. 2001. Vol. 64, no. 4. P. 041405.
12. Косков М.А., Лебедев А.В., Иванов А.С. О методе дифференциальной прогонки для получения кривых намагничивания ферроколлоидов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 89-104. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>.

13. Hewlin Jr R.L., Edwards M., Schultz C. Design and development of a traveling wave ferro-microfluidic device and system rig for potential magnetophoretic cell separation and sorting in a water-based ferrofluid // *Micromachines*. 2023. Vol. 14, no. 4. P. 889.
14. Brown P., Hatton T.A., Eastoe J. Magnetic surfactants // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2015. Vol. 20, no. 3. P. 140-150.
15. Ferrofluid double emulsion generation and manipulation under magnetic fields / X. Huang, M. Saadat, M. A. Bijarchi, M.B. Shafii // *Chemical Engineering Science*. 2023. Vol. 270. P. 118519.
16. Bashtovoi V., Kovalev M., Reks A. Instabilities of bubbles and droplets flows in magnetic fluids // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2005. Vol. 289. P. 350-352.
17. Динамика активных пузырьков в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле / Е.А. Соколов, Д.А. Калюжная, А.Г. Рекс, В.И. Каленчук, Г.А. Жуков, Р.Е. Политов [et al.] // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 1. С. 102-119. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-102-119>.
18. Pohl H.A. Some effects of nonuniform fields on dielectrics // *Journal of Applied Physics*. 1958. Vol. 29, no. 8. P. 1182-1188.
19. Srinivasan G.J., Satyanarayana P., Thirunavukkarasu G. Liquid drops in rise against gravity through a viscous medium: Drag force by the method of dimensions and comparison with liquid drops in fall under gravity // *Current Science*. 1996. Vol. 71, no. 12. P. 989-995.
20. Sokolov E., Kalyuzhnaya D., Ryapolov P. Behavior of «non-magnetic liquid-magnetic fluid» emulsions in microchannels under the influence of an inhomogeneous magnetic field // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2025. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10900568/>. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2025.3544657>.
21. Dynamics of floating droplets of a magnetic liquid in glycerol in a flat channel under the influence of a magnetic field / E.A. Sokolov, D.A. Kalyuzhnaya, A.A. Pribylov, R.E. Politov, P.A. Ryapolov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2024. Vol. 88, no. 10. P. 1636-1641.
22. Formation and behaviour of active droplets and bubbles in a magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field / E. Sokolov, D. Kaluzhnaya, E. Shel'deshova, P. Ryapolov // *Fluids*. 2022. Vol. 8, no. 1. P. 2. <https://doi.org/10.3390/fluids8010002>.

References

1. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics*. Moscow: Mir; 1989. 356 p. (In Russ.)
2. Joseph A., Mathew S. Ferrofluids: synthetic strategies, stabilization, physicochemical features, characterization, and applications. *ChemPlusChem*. 2014;79(10):1382-1420.
3. Genc S., Derin B. Synthesis and rheology of ferrofluids: a review. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2014;3:118-124.
4. Papell S.S. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles. United States patent US 3215572A. 2 November 1965.
5. Odenbach S., Gilly H. Taylor vortex flow of magnetic fluids under the influence of an azimuthal magnetic field. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 1996;152(1-2):123-128.
6. Erin K.V., Porublev A.A. Optical properties of kerosene-based magnetic fluids. In: *Fiziko-khimicheskie i prikladnye problemy magnitnykh dispersnykh nanosistem: V Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya: sbornik nauchnykh trudov = Physico-chemical and applied problems of magnetic dispersed nanosystems: V All-Russian scientific conference: collection of scientific papers*. Stavropol': Fabula; 2015. P. 79-85. (In Russ.)

7. Yang X., Dou X., Liu Y., Huang Y. Sealing mechanism investigation of convergent ferrofluid seals with staggered pole teeth. *Tribology International*. 2023;190:109054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109054>.
8. Gao Q.H., Peng Z.Z., Zou H.-X., Li W.B., Yan H., Peng Z., et al. Label-free manipulation via the magneto-Archimedes effect: fundamentals, methodology and applications. *Materials Horizons*. 2019;6(7):1359-1379. <https://doi.org/10.1063/1.4867964>.
9. 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):17B527. <https://doi.org/10.1063/1.4867964>.
10. 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.
11. Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations. *Physical Review E*. 2001;64(4):041405.
12. Koskov M.A., Lebedev A.V., Ivanov A.S. On the differential sweep method for obtaining magnetization curves of ferrofluids. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(3):89-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>.
13. Hewlin Jr R.L., Edwards M., Schultz C. Design and development of a traveling wave ferro-microfluidic device and system rig for potential magnetophoretic cell separation and sorting in a water-based ferrofluid. *Micromachines*. 2023;14(4):889.
14. Brown P., Hatton T.A., Eastoe J. Magnetic surfactants. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2015;20(3):140-150.
15. Huang X., Saadat M., Bijarchi M.A., Shafii M.B. Ferrofluid double emulsion generation and manipulation under magnetic fields. *Chemical Engineering Science*. 2023;270:118519.
16. Bashtovoi V., Kovalev M., Reks A. Instabilities of bubbles and droplets flows in magnetic fluids. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2005;289:350-352.
17. Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Reks A.G., Kalenchuk V.I., Zhukov G.A., Politov R.E., et al. Dynamics of active bubbles in a magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(1):102-119. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-102-119>.
18. Pohl H.A. Some effects of nonuniform fields on dielectrics. *Journal of Applied Physics*. 1958;29(8):1182-1188.
19. Srinivasan G.J., Satyanarayana P., Thirunavukkarasu G. Liquid drops in rise against gravity through a viscous medium: Drag force by the method of dimensions and comparison with liquid drops in fall under gravity. *Current Science*. 1996;71(12):989-995.
20. Sokolov E., Kalyuzhnaya D., Ryapolov P. Behavior of non-magnetic liquid-magnetic fluid» emulsions in microchannels under the influence of an inhomogeneous magnetic field. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2025. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10900568/>. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2025.3544657>.
21. Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Pribylov A.A., Politov R.E., Ryapolov P.A. Dynamics of floating droplets of a magnetic liquid in glycerol in a flat channel under the influence of a magnetic field. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2024;88(10):1636-1641.
22. Sokolov E., Kaluzhnaya D., Shel'deshova E., Ryapolov P. Formation and behaviour of active droplets and bubbles in a magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field. *Fluids*. 2022;8(1):2. <https://doi.org/10.3390/fluids8010002>.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Ряполов Петр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r-piter@yandex.ru

Petr A. Riapolov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: r-piter@yandex.ru