DOI: 10.31857/S0023291226040069
УДК 544.77.022, 544.77.03

Оригинальная статья / Original Article

Влияние магнитного поля на макроскопические физические свойства феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц

С.М. Орехова*, С.А. Боженко, А.В. Чернышов, С.Д. Туркин, А.Р. Закинян

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
**E-mail: smorekhova@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования феррожидкости с агрегатами наночастиц дисперсной фазы. Описан целенаправленный синтез феррожидкости на основе наночастиц Fe_3O_4 в керосиновой среде со стабилизацией олеиновой кислотой, содержащей агрегаты частиц магнетита размером около 5 мкм. Исследованы различные физические свойства полученной коллоидной системы: электрические, магнитные, реологические, оптические, тепловые, а также микроволновые в диапазоне частот 8.2–12 ГГц. Выявлено, что при воздействии внешнего магнитного поля имеет место значимое количественное изменение исследуемых параметров среды. Обнаружено, что на них также оказывает влияние величина концентрации агрегатов, содержащихся в образцах.

Ключевые слова: феррожидкость, агрегаты наночастиц, магнитное поле

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRN-2026-0007).

Конфликт интересов. Авторы данной статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. Концепция исследования — ЗАР; методология — ЗАР, ОСМ, ТСД; программное обеспечение — ЧАВ, ОСМ; валидация — ЗАР, ТСД; формальный анализ — ЗАР; исследование — ОСМ, БСА, ЧАВ, ТСД, ЗАР; ресурсы — ОСМ, БСА; обработка данных — ОСМ; написание (подготовка оригинального текста) — ОСМ, ЗАР; написание (редактирование и рецензирование) — ЗАР; визуализация — БСА; руководство — ЗАР; администрирование проекта — ОСМ.

Ссылка для цитирования: Орехова С.М., Боженко С.А., Чернышов А.В., Туркин С.Д., Закинян А.Р. Влияние магнитного поля на макроскопические физические свойства феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц. *Коллоидный журнал / Colloid Journal.* 2026. Т. 88. № 4. С. 508–526. https://doi.org/10.31857/S0023291226040069

The Effect of a Magnetic Field on the Macroscopic Physical Properties of a Ferrofluid Containing Aggregates of Nanoparticles

S.M. Orekhova*, S.A. Bozhenko, A.V. Chernyshov, S.D. Turkin, A.R. Zakinyan

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
**E-mail: smorekhova@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of a study of a ferromagnetic liquid containing aggregates of dispersed-phase nanoparticles. The targeted synthesis of a ferrofluid based on Fe_3O_4 nanoparticles in a kerosene medium stabilized with oleic acid and containing magnetite particle aggregates approximately

© Орехова С.М., Боженко С.А., Чернышов А.В., Туркин С.Д., Закинян А.Р., 2026 / Orekhova S.M., Bozhenko S.A., Chernyshov A.V., Turkin S.D., Zakinyan A.R., 2026

5 μm in size is described. The various physical properties of the resulting colloidal system were investigated, including electrical, magnetic, rheological, optical and thermal properties, as well as microwave properties within the 8.2–12 GHz frequency range. It was found that under the influence of an external magnetic field, there is a significant quantitative change in the studied parameters of the medium. It was also found that these parameters are influenced by the concentration of the aggregates contained in the samples.

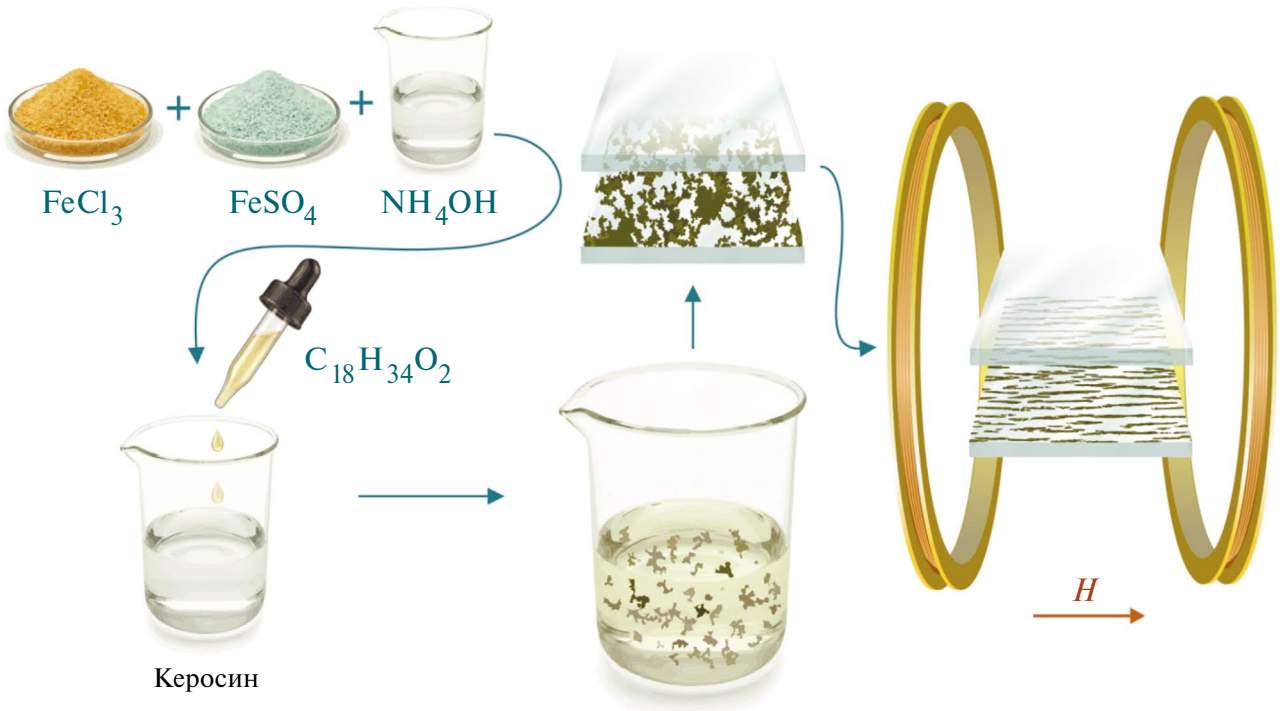
Keywords: ferrofluid, nanoparticle aggregates, magnetic field

Funding. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSRN-2026-0007).

Conflict of interest. The authors of this article declare that they have no conflict of interest.

Authors' contributions. Conceptualization — ZAR; methodology — ZAR, OSM, TSD; software — CAV, OSM; validation — ZAR, TSD; formal analysis — ZAR; investigation — OSM, BSA, CAV, TSD, ZAR; resources — OSM, BSA; data curation — OSM; writing (original draft) — OSM, ZAR; writing (review and editing) — ZAR; visualization — BSA; supervision — ZAR; project administration — OSM.

For Citation: Orekhova S.M., Bozhenko S.A., Chernyshov A.V., Turkin S.D., Zakinyan A.R. The Effect of a Magnetic Field on the Macroscopic Physical Properties of a Ferrofluid Containing Aggregates of Nanoparticles. *Kolloidnyi zhurnal / Colloid Journal.* 2026;88(4):508–526. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0023291226040069



ВВЕДЕНИЕ

Феррожидкость – это стабильный коллоидный раствор, состоящий из магнитных наночастиц, которые взвешены в жидкости-носителе. Также ее называют магнитной жидкостью или ферромагнитной жидкостью. Впервые феррожидкости были созданы в середине 1960-х годов. С тех пор активно изучаются их свойства, ищутся новые способы синтеза и применения в различных областях. Особенностью феррожидкостей является сочетание текучести и выраженных магнитных свойств, поэтому они представляют большой интерес для практических применений [1, 2]. Феррожидкости широко используются в энергетике (интенсификация теплообмена, магнитные уплотнения, магнитные смазки); для хранения и обработки информации; в экологии (сбор нефтесодержащих загрязнений в воде, удаление органических отходов из воды с последующей их

каталитической переработкой); в медицине (адресная доставка лекарств, контрастирование для магнитной резонансной томографии, гипертермия) [3, 4].

Сильные магнито-дипольные взаимодействия между частицами дисперсной фазы феррожидкости могут приводить к образованию агрегатов наночастиц [5–8]. Процесс структурообразования интенсифицируется во внешнем магнитном поле или в результате нарушения коллоидной стабильности [9–11]. Образование агрегатов приводит к изменению макроскопических свойств феррожидкостей. Так, влияние агрегатов частиц на реологическое проведение и увеличение эффективной вязкости феррожидкости рассматривалось в работах [12, 13]. В [14, 15] исследуются процессы переноса в феррожидкостях с агрегатами наночастиц. Значительное влияние кластеров наночастиц различной морфологии на магнитную восприимчивость феррожидкостей продемонстрировано в [16]. Дифракционное рассеяние света в структурированных феррожидкостях также было предметом ряда исследований [17, 18]. Возможность управления микроструктурной упорядоченностью феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, при помощи магнитного поля позволяет рассматривать ее в качестве перспективного функционального материала [19–23].

Следует отметить, что в большинстве практических приложений феррожидкостей формирование агрегатов наночастиц рассматривается как нежелательный артефакт магнито-дипольных взаимодействии, который стараются избегать. Фундаментальные исследования вопросов агрегирования феррожидкостей также по большей части имели дело с системами, для которых агрегативный рост не являлся поощряемым свойством. Лишь в последнее время появились исследования магнитных коллоидных систем, образованных кластерными (многоядерными) частицами, созданными для достижения большей реакции на воздействие магнитного поля [24–26]. В данной работе делается акцент на целенаправленный синтез феррожидкости на основе оксида железа (II, III) с развитыми агрегатами наночастиц. Это позволяет ожидать более заметный отклик такой системы на воздействие магнитного поля и более выраженное изменение ее макроскопических свойств по сравнению с традиционными феррожидкостями. В работе изучен широкий спектр макроскопических физических параметров таких коллоидов, проанализировано влияние концентрации содержащихся агрегатов, а также внешнего магнитного поля на изменение этих параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез

В рассматриваемых в данной работе образцах феррожидкости дисперсионной средой являлся керосин, дисперсной фазой – наночастицы магнетита, стабилизированные олеиновой кислотой. Наноразмерный оксид железа (II, III) был синтезирован методом химического осаждения из солей железа по стандартной методике [27–30]. Вначале соли $FeCl_3$, $FeSO_4$ растворялись в воде, затем при интенсивном перемешивании вливался NH_4OH в избытке. Таким образом, в данной системе образуются наночастицы магнетита. Сразу после осаждения поверхность частиц покрыта группами OH, поэтому полученный магнетит промывался в ацетоне для удаления гидроксогрупп. Затем проходила стабилизация магнетита при температуре 90°C и pH 8–9. Во время пептизации для создания агрегатов наночастиц добавлялась олеиновая кислота в избытке, таким образом, объемное содержание поверхностно-активного вещества составляло ~25%. Крупная фракция частиц магнетита, возникающая в процессе синтеза, не удалялась, и жидкость не подвергалась процедуре фильтрации или центрифугирования. В результате получались образцы феррожидкости, содержащей агрегаты, размером около 5 мкм (рис. 1а, 1в). Образование данных агрегатов можно связать с механизмом вытеснительной флокуляции. При наличии в коллоидной системе избыточного количества поверхностно-активного вещества его молекулы, не адсорбируясь на наночастицах магнетита, образуют клубки свободных молекул. При сближении наночастиц до расстояний, меньших размеров молекул используемого поверхностно-активного вещества, эти молекулы не могут проникать в зазор между частицами. В результате равнодействующая сил осмотического давления, действующих на частицы магнетита, становится отличной от нуля. Данная сила приводит к взаимному притяжению частиц [31]. Для проводимых экспериментов было синтезировано два образца феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, с объемным содержанием частиц твердой фазы Fe_3O_4 4.12 и 10.9% соответственно.

При воздействии внешнего магнитного поля имеет место объединение агрегатов в структуры, ориентированные вдоль направления приложенного поля (рис. 1б, 1г). Протяженность образующихся структур увеличивается с ростом величины напряженности приложенного магнитного поля и при увеличении концентрации агрегатов в образце. Возникающая в магнитном поле упорядоченная структура агрегатов должна приводить к изменениям макроскопических характеристик образцов феррожидкости, содержащих агрегаты наночастиц. Дальнейшие исследования были посвящены обнаружению такой зависимости макроскопических физических свойств синтезированных образцов от воздействия магнитного поля.

Методика экспериментальных исследований

Описанные в данной работе измерения макроскопических характеристик образцов повторялись трижды, затем результат усреднялся. Наблюдалась повторяемость результатов в пределах относительной погрешности 5%. Исследование низкочастотной магнитной проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты, проводилось методом мостовой магнитометрии, схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Измеряемый образец заполнял бескаркасный соленоид длиной 10 см

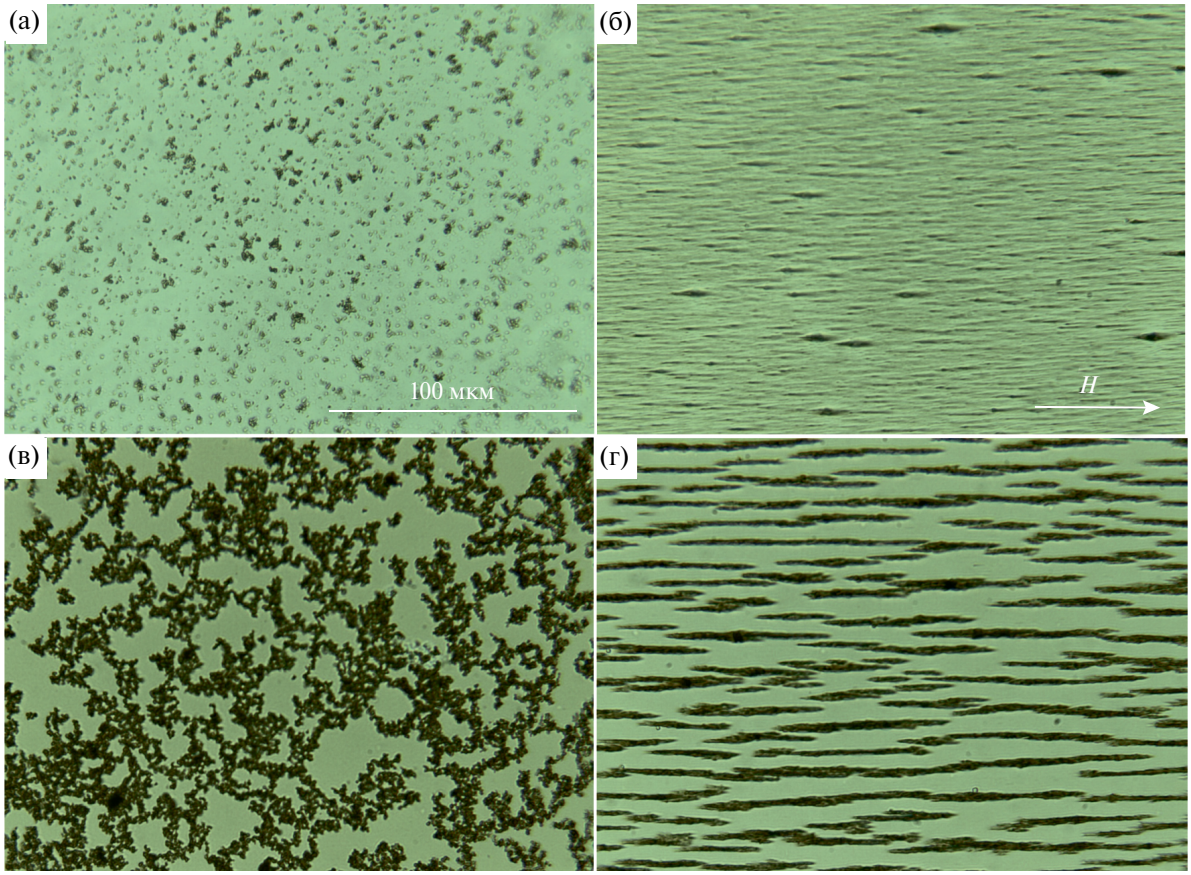


Рис. 1. Микрофотография агрегатов в феррожидкости в отсутствие магнитного поля (а, в) и под действием внешнего стационарного однородного магнитного поля напряженностью 1.5 кА/м (б, г). Объемная концентрация твердой фазы 4.12 (а, б) и 10.9% (в, г)

Fig. 1. Micrography of aggregates in a ferrofluid in the absence of a magnetic field (а, в) and under the action of an external stationary homogeneous magnetic field with a strength of 1.5 kA/m (б, г). The volume concentration of the solid phase is 4.12 (а, б) and 10.9% (в, г)

и диаметром 0.5 см. Измерение индуктивности и активного сопротивления осуществлялось цифровым мостом переменного тока GW Instek LCR-7811OG на частоте измерительного сигнала 320 Гц по последовательной эквивалентной схеме. Величина измерительного сигнала была мала и не вызывала структурных изменений в образце. Для исследования влияния внешнего магнитного поля на свойства феррожидкости с агрегатами наночастиц соленоид с образцом помещался во внешнее стационарное однородное подмагничивающее поле, направленное вдоль оси соленоида (вдоль измерительного поля). Подмагничивающее поле создавалось системой катушек Рубена. Действительная часть магнитной проницаемости рассчитывалась согласно выражению: $\mu' = L/L_0$, где L_0 – индуктивность соленоида в отсутствие образца, L – индуктивность соленоида, заполненного образцом. Мнимая часть магнитной проницаемости определялась согласно: $\mu'' = \left(R - R_0\right)/\left(\omega L_0\right)$, где R_0 – активное сопротивление соленоида в отсутствие образца, R – активное сопротивление соленоида, заполненного образцом, ω – циклическая частота измерительного сигнала.

Были изучены низкочастотные электрические свойства (удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость) полученной феррожидкости с агрегатами. Измерение емкости и активного сопротивления измерительной ячейки осуществлялось с помощью моста переменного тока GW Instek LCR-7811OG на частоте измерительного сигнала 2 кГц по параллельной эквивалентной схеме. Данная частота измерительного сигнала была выбрана для нивелирования эффекта поляризации электродов. Стандартная измерительная ячейка Wayne Kerr Electronics 1J1022 представляла собой конденсатор с плоскими круглыми электродами диаметром 30 мм, установленными на расстоянии 4 мм друг от друга. Электроды располагались горизонтально и пространство между ними заполнялось исследуемым образцом. Для исследования влияния внешнего магнитного поля на свойства феррожидкости с агрегатами конденсатор с образцом помещался во внешнее стационарное однородное магнитное поле, вектор напряженности которого параллелен измерительному электрическому полю в ячейке. Магнитное поле создавалось кубической намагничивающей системой. Схема установки показана

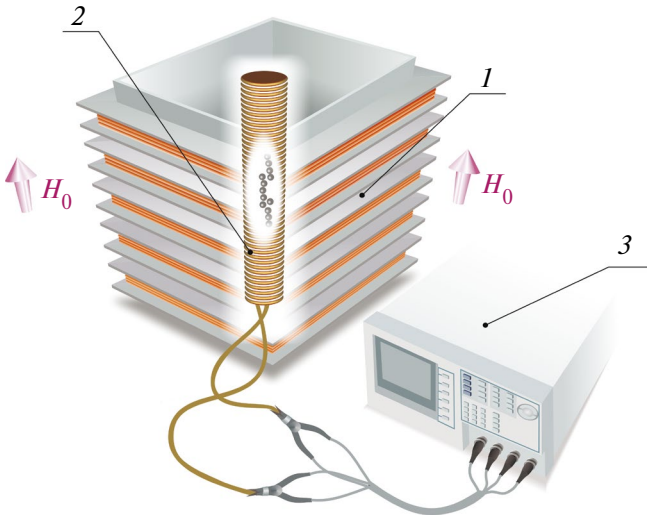


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения низкочастотных магнитных свойств феррожидкости с агрегатами при воздействии подмагничивающего поля: *1* – система катушек Рубена; *2* – соленоид для размещения образца; *3* – мост переменного тока
Fig. 2. An experimental setup for measuring the low-frequency magnetic properties of a ferrofluid with aggregates under the action of a magnetizing field: *1* – system of Ruben coils; *2* – solenoid for sample placement; *3* – alternating current bridge

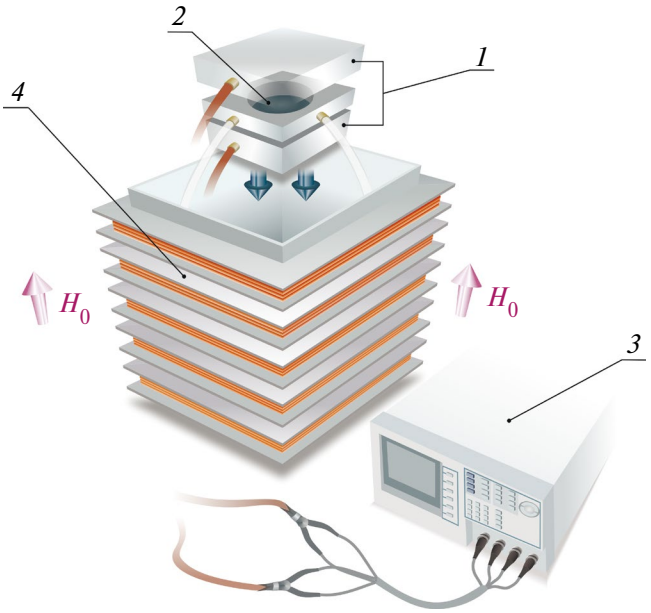


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения электрических свойств феррожидкости с агрегатами наночастиц при воздействии подмагничивающего поля: *1* – обкладки измерительного конденсатора; *2* – пространство для размещения образца; *3* – мост переменного тока; *4* – система катушек Рубена
Fig. 3. An experimental setup for measuring the electrical properties of a ferrofluid with aggregates of nanoparticles under the action of a magnetizing field: *1* – plates of a measuring capacitor; *2* – space for placing a sample; *3* – alternating current bridge; *4* – system of Ruben coils

на рис. 3. Диэлектрическая проницаемость (ε) образца рассчитывалась согласно выражению: $\varepsilon = C/C_0$, где C_0 – электрическая емкость ячейки в отсутствие образца, C – емкость ячейки с образцом. Удельная электрическая проводимость (σ) определялась согласно выражению: $\sigma = \varepsilon_0/(RC_0)$, где R – активное сопротивление ячейки с образцом, ε_0 – электрическая постоянная.

Также были исследованы реологические кривые течения полученной феррожидкости с помощью ротационного реометра RHEOTEST RN 4.1, схема экспериментальной установки показана на рис. 4. Использовалась измерительная система конус–плита, она представляла собой вращающийся конус, расположенный сверху, и установленную под ним жестко закрепленную плиту. Зазор между вершиной конуса и плитой составлял 10 мкм, пространство между ними заполнялось исследуемым образцом. Измерения проводились при постоянной температуре 25°C, которая поддерживалась с помощью термостата.

Измерения проводились в режиме контроля скорости сдвига, которая изменялась от 0 до 3000 $с^{-1}$. Исследовался как прямой, так и обратный ход изменения скорости сдвига. Для создания микроструктурной упорядоченности измерительная система с образцом помещалась во внешнее стационарное однородное магнитное поле, направленное вдоль оси системы (перпендикулярно скорости сдвига), которое создавалось с помощью катушек Гельмгольца.

Исследование рассеяния света в феррожидкостях проводилось с помощью плоской ячейки Хеле–Шоу,

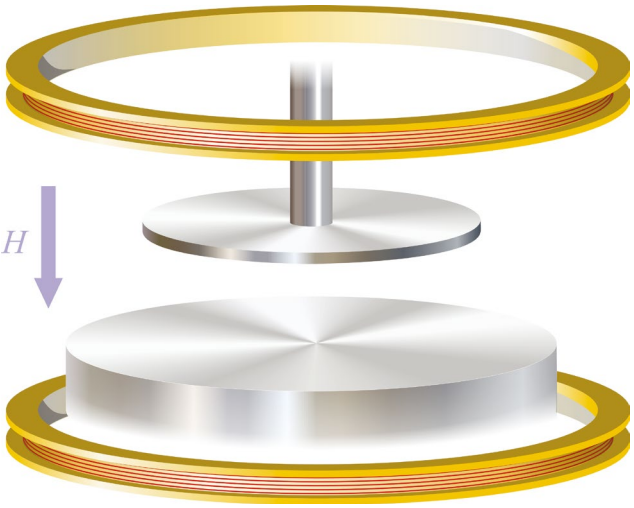


Рис. 4. Измерительная система типа конус–плита ротационного реометра для исследования реологических свойств феррожидкости с агрегатами в магнитном поле
Fig. 4. A cone–plate measuring system of a rotary rheometer for studying the rheological properties of a ferrofluid with aggregates in a magnetic field

заполненной исследуемым образцом. Плоскость ячейки располагалась горизонтально и перпендикулярно ей пропускался луч лазера с длиной волны 620 нм. Интенсивность лазерного излучения была достаточно мала и не вызывала тепловых эффектов при взаимодействии с образцом. С противоположной стороны ячейки располагался фотодетектор, точечно измеряющий интенсивность рассеянного света, прошедшего сквозь слой образца. Ячейка с образцом располагалась в стационарном однородном постоянном магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца и направленном вдоль плоскости ячейки. Фотодетектор равномерно перемещался с помощью автоматического позиционера по прямоугольной области размером 15×30 см для сканирования картины рассеяния. Показания интенсивности рассеянного света фиксировались при помощи цифрового вольтметра, подключенного к фотодетектору. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

Исследования комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов в микроволновом диапазоне (8.2–12 ГГц) были основаны на измерении S-параметров матрицы рассеяния волноводной линии передачи. Измерительная ячейка представляла собой волновод прямоугольного сечения (23×10 мм), содержащий слой исследуемого образца толщиной 2 мм. Для предотвращения растекания жидкий образец был ограничен одинаковыми диэлектрическими вставками с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.95–0.09i$ и толщиной 1 мм. Расчет искомых комплексных проницаемостей проводился по алгоритму Николсона–Росса–Вейра [32–34]. Основные формулы для определения μ и ε приведены ниже:

$$\mu = \frac{1}{\gamma_0 L}\ln\left(\frac{1}{P}\right)\left(\frac{1+G}{1-G}\right),$$

$$\varepsilon = \frac{c^2}{\mu\omega^2}\left(-\frac{1}{L^2}\left(\ln\left(\frac{1}{P}\right)\right)^2 + \frac{\pi^2}{a^2}\right),$$

где

$$G = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{\left(\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}\right)^2 - 1};$$

$$P = \frac{S_{21} + S_{11} - G}{1 - (S_{21} + S_{11})G}; \gamma_0 = \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}.$$

Здесь ω – циклическая частота излучения, c – скорость света в вакууме, L – длина образца, a – ширина широкой стенки волновода, S_{11} – комплексный коэффициент отражения излучения в координатах границы плоскости образца, S_{21} – комплексный коэффициент прохождения излучения на длине образца L. Длина образцов выбрана таким образом, чтобы исключить неопределенности метода измерений, связанные с интерференцией отраженных сигналов от двух границ образца. Длина слоя исследуемого образца в 3.5 раза меньше критической длины, при которой наблюдается первый минимум интерференции коэффициента отражения. Это обеспечивает частотную устойчивость измеряемых величин данным методом. Измерения

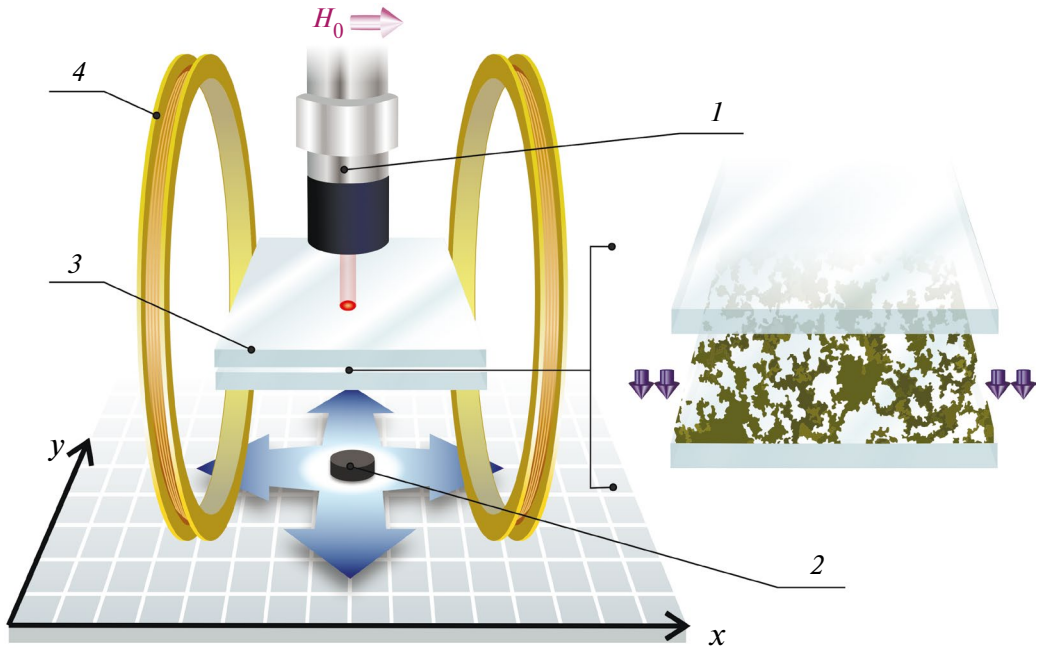


Рис. 5. Экспериментальная установка для изучения рассеяния света в слое феррожидкости с агрегатами наночастиц в магнитном поле: *1* – лазер; *2* – фотодетектор; *3* – слой образца; *4* – катушки Гельмгольца
Fig. 5. Experimental setup for studying light scattering in a ferrofluid layer with aggregates of nanoparticles in a magnetic field: *1* – laser; *2* – photodetector; *3* – sample layer; *4* – Helmholtz coils

S-параметров волноводной линии проводились с использованием векторного анализатора цепей Микран (Micran) P4226/5. Намагничивание осуществлялось системой из пяти квадратных витковых секций – катушек Рубена – для обеспечения воздействия однородного магнитного поля в области расположения образцов. Вектор напряженности магнитного поля был направлен перпендикулярно широкой стенке волновода (параллельно электрической компоненте электромагнитного поля в волноводе). Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.

Была исследована теплопроводность рассматриваемых магнитных коллоидных систем с помощью измерителя DTC 300 Thermal Conductivity Meter (TA Instruments), схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

Методика исследования заключалась в следующем: анализируемый образец размещался в цилиндрической ячейке малой высоты. Ячейка образовывалась двумя металлическими поверхностями, внутреннее расстояние между которыми составляло 1.57 мм, а диаметр самих пластин 50.8 мм. Измерительная ячейка плотно зажималась между нагревательным и охладительным элементами, создающими вертикально направленный стационарный тепловой поток в ячейке. Так как данная система располагалась в теплоизоляционной камере, то исключался обмен тепловой энергией с внешней средой. Также для исследования влияния магнитного поля на процессы теплопередачи в образцах феррожидкости с агрегатами снаружи системы располагались

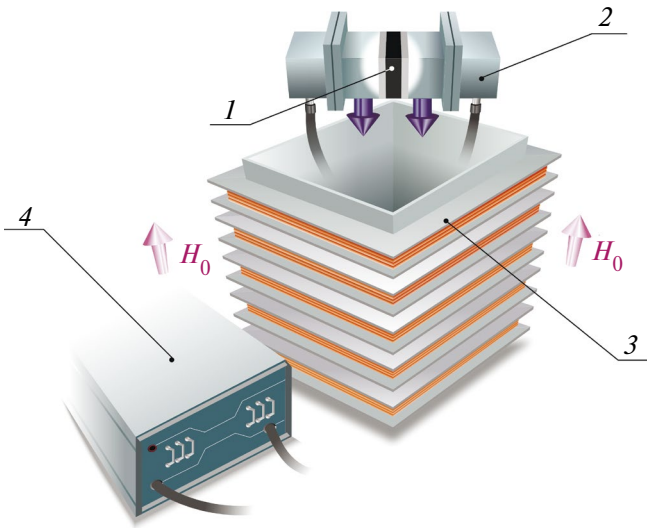


Рис. 6. Схема установки для измерения микроволновых свойств феррожидкости с агрегатами наночастиц в магнитном поле: *1* – исследуемый образец, ограниченный диэлектрическими вставками; *2* – волновод; *3* – система катушек Рубена; *4* – векторный анализатор цепей

Fig. 6. The scheme of the experimental setup for measuring the microwave properties of a ferrofluid with aggregates in a magnetic field: *1* – test sample limited by dielectric inserts; *2* – waveguide; *3* – system of Ruben coils; *4* – vector network analyzer

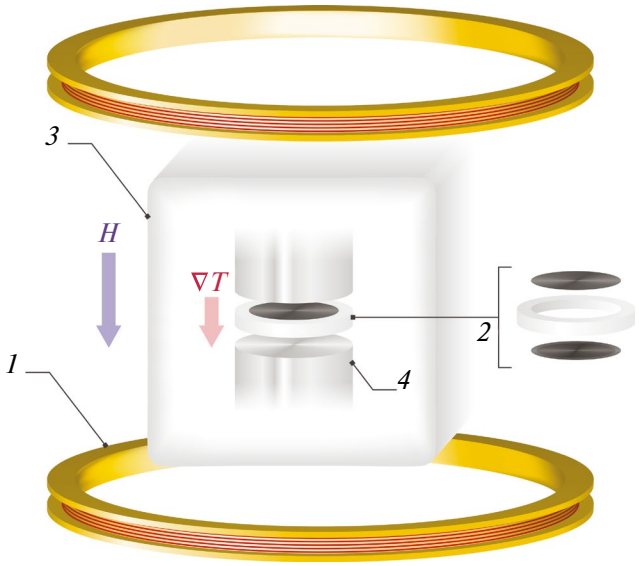


Рис. 7. Схема установки для измерения теплопроводности феррожидкости с агрегатами в магнитном поле: *1* – катушки Гельмгольца; *2* – ячейка для размещения образца; *3* – термоизоляция; *4* – нагревательный и охладительный элементы

Fig. 7. The scheme of the experimental setup for measuring the thermal conductivity of a ferrofluid with aggregates in a magnetic field: *1* – Helmholtz coils; *2* – cell for placing a sample; *3* – thermal insulation; *4* – heating and cooling elements

катушки Гельмгольца, создающие однородное стационарное магнитное поле, вектор напряженности которого направлен вдоль направления теплопереноса. Средняя температура образца во время измерений равнялась 30°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что действительная часть низкочастотной магнитной проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, монотонно уменьшается с ростом подмагничивающего поля, вне зависимости от концентрации агрегированной фракции в ней, что проиллюстрировано на рис. 8а.

Аналогичная картина наблюдается и для мнимой части магнитной проницаемости, которая также уменьшается при увеличении напряженности внешнего магнитного поля, что показано на рис. 8б. Монотонное убывание магнитной проницаемости в подмагничивающем поле указывает на специфику процесса намагничивания феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, заключающегося в фактическом отсутствии линейного участка кривой намагничивания. Сильная корреляция магнитных моментов частиц в агрегатах делает довольно сложным предметный анализ магнитных свойств среды в данном случае.

На рис. 9а показаны зависимости относительного изменения низкочастотной диэлектрической проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты

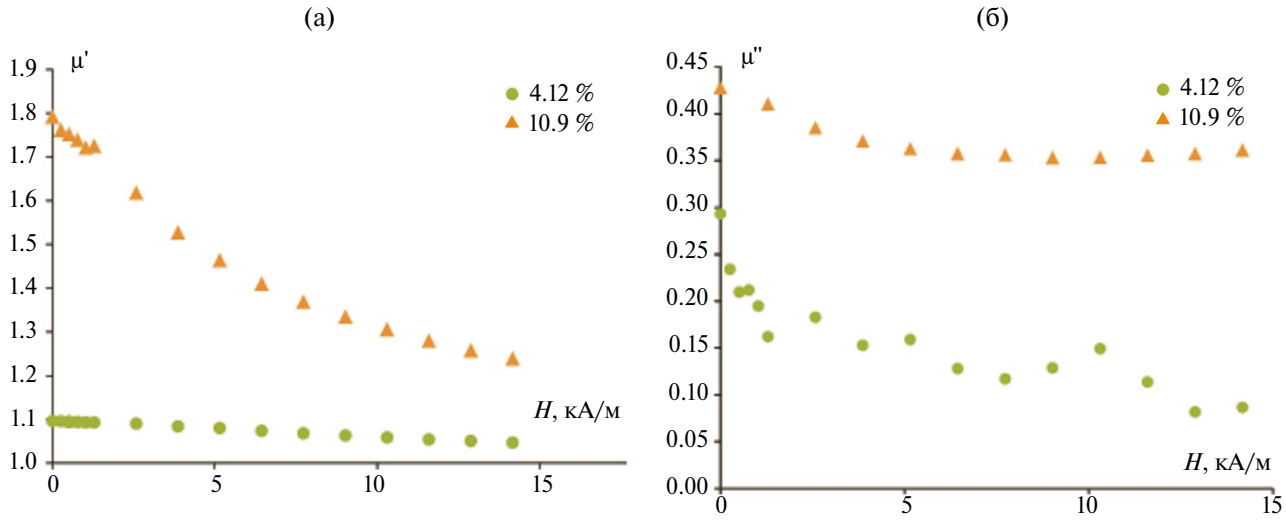


Рис. 8. Экспериментальные зависимости действительной (а) и мнимой (б) части низкочастотной магнитной проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, от напряженности подмагничивающего поля при различных концентрациях твердой фазы
Fig. 8. Experimental dependences of the real (a) and imaginary (б) parts of the low-frequency magnetic permeability of a ferrofluid containing aggregates of nanoparticles on the strength of the magnetizing field at various concentrations of the solid phase

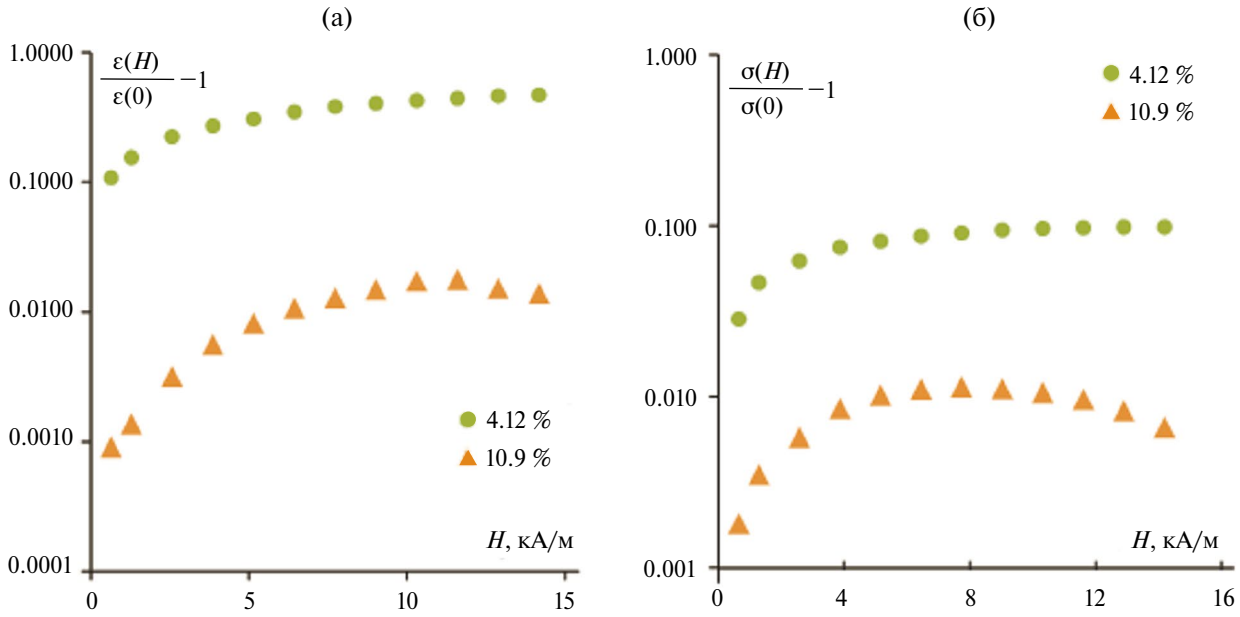


Рис. 9. Экспериментальные зависимости относительного изменения диэлектрической проницаемости (а) и удельной электрической проводимости (б) феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, от напряженности магнитного поля при различных концентрациях твердой фазы
Fig. 9. Experimental dependences of relative changes in the dielectric constant (a) and specific electrical conductivity (б) of a ferrofluid containing aggregates of nanoparticles on the magnetic field strength

наночастиц, вызванного действием магнитного поля, при различных концентрациях дисперсной фазы. Аналогичные зависимости для удельной электрической проводимости представлены на рис. 9б.

Выстраивание структуры агрегатов вдоль направления приложенного магнитного поля должно приводить к анизотропии макроскопических характеристик феррожидкости. Продемонстрируем это на примере низкочастотных электрических свойств. На рис. 10 представлены зависимости диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости от угла между направлением измерительного электрического

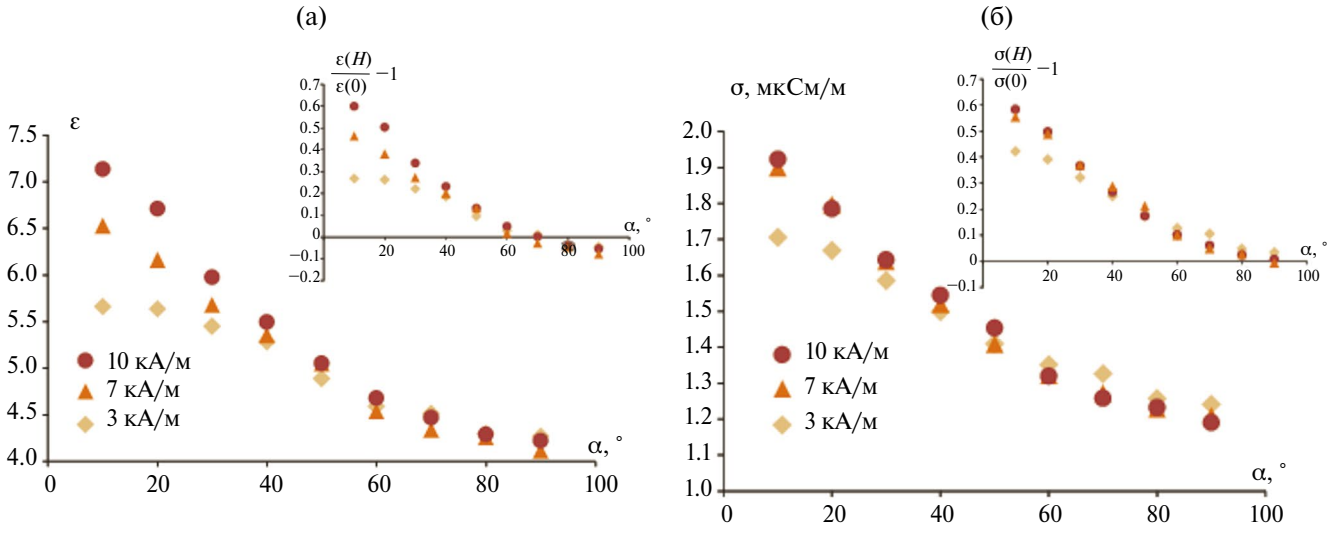


Рис. 10. Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и удельной электрической проводимости (б) от угла между векторами напряженности измерительного электрического поля и внешнего магнитного поля, при различных величинах магнитного поля. Вставки: относительное изменение диэлектрической проницаемости (а) и удельной электрической проводимости (б)

Fig. 10. The dependences of the dielectric constant (а) and the specific electrical conductivity (б) on the angle between the vectors of the measuring electric field strength and the external magnetic field, at various values of the magnetic field. Insets: relative change in dielectric constant (а) and electrical conductivity (б)

и внешнего магнитного полей при различных величинах напряженности магнитного поля для образца с концентрацией твердой фазы 10.9%. Во вставках на рис. 10 также показаны соответствующие зависимости для величин относительного изменения диэлектрической проницаемости и проводимости.

Изменение диэлектрической проницаемости и проводимости образцов в магнитном поле обуславливается изменением деполяризующих полей при формировании структуры агрегатов наночастиц. Количественная интерпретация полученных результатов осложняется тем обстоятельством, что электрические характеристики фаз (среды и агрегатов) в данном случае неизвестны. Проведем оценку электрических свойств агрегированной феррожидкости в приближении эффективной среды. При этом будем считать, что форму агрегатов можно описать вытянутым эллипсоидом вращения. Примем диэлектрическую проницаемость дисперсионной среды примерно равной проницаемости керосина ($\varepsilon_e = 2$), а диэлектрическую проницаемость агрегатов наночастиц проницаемости предельно концентрированной феррожидкости ($\varepsilon_i = 10$). Эффективную диэлектрическую проницаемость можно рассчитать согласно выражению [35]:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_e(\varepsilon_i - \varepsilon_e)\cdot \cdot\varphi\left[\frac{\cos^2\alpha}{\varepsilon_e + N_z(\varepsilon_i - \varepsilon_e)(1-\varphi)} + \frac{\sin^2\alpha}{\varepsilon_e + N_x(\varepsilon_i - \varepsilon_e)(1-\varphi)}\right], \quad (1)$$

где $N_z = \frac{1-e^2}{2e^3}\left(\ln\frac{1+e}{1-e} - 2e\right)$, $N_x = \frac{1-N_z}{2}$ — деполяризующие факторы эллипсоида вдоль большой и малой оси соответственно, $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ — эксцентриситет эллипсоида, a — угол между большой осью и направлением электрического поля, отношение полуосей эллипсоида b/a характеризует степень его вытянутости. На рис. 11 представлена рассчитанная согласно (1) зависимость относительного изменения диэлектрической проницаемости при концентрации $\varphi = 0.1$ от степени вытянутости эллипсоида, что можно сопоставить с экспериментальной зависимостью от величины магнитного поля, поскольку протяженность агрегатных структур возрастает с ростом магнитного поля. Также на рис. 11 представлена зависимость относительного изменения диэлектрической проницаемости от угла между большой осью эллипсоида и направлением электрического поля, что можно сопоставить с экспериментальной зависимостью от угла между направлениями электрического и магнитного полей, поскольку агрегаты ориентированы вдоль магнитного поля. Как видно из рисунка, рассчитанные зависимости демонстрируют качественное согласие с экспериментальными результатами, а также согласующийся порядок величин. Электрическая проводимость феррожидкостей, как известно, обусловлена примесными ионами и может быть оценена согласно аналогичному выражению при замене в (1) соответствующих ε на σ.

Кривые течения феррожидкостей, содержащих агрегаты наночастиц, носят неньютоновский характер (рис. 12),

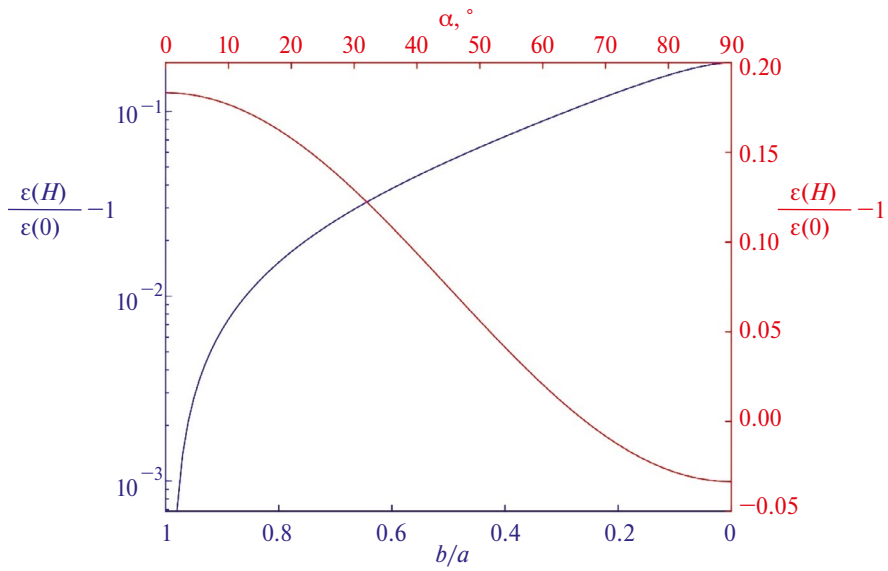


Рис. 11. Рассчитанные согласно (1) зависимости относительного изменения диэлектрической проницаемости от отношения полуосей эллипсоидных частиц дисперсной фазы, а также от угла между направлением электрического поля и большой осью эллипсоидных частиц
Fig. 11. Calculated according to (1), the dependences of the relative change in dielectric constant on the ratio of the semiaxes of ellipsoidal particles of the dispersed phase, as well as on the angle between the direction of the electric field and the major axis of the ellipsoidal particles

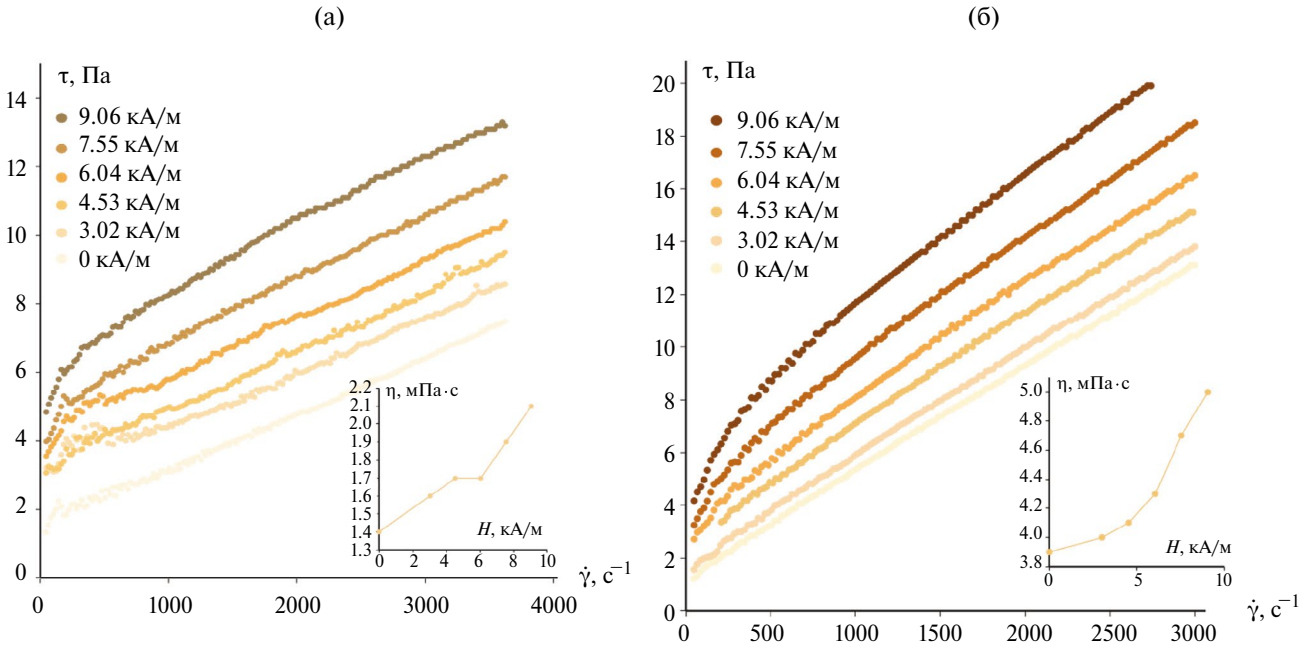


Рис. 12. Кривые течения феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. (а) Концентрация твердой фазы 4.12%. (б) Концентрация твердой фазы 10.9%. Вставки: коэффициент эффективной вязкости образцов, рассчитанный по линейному участку кривых течения, в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля
Fig. 12. Flow curves of a ferrofluid containing aggregates of nanoparticles at various values of the external magnetic field strength. (a) Solid phase concentration is 4.12%. (б) Solid phase concentration is 10.9%. Insets: the coefficient of effective viscosity of the samples calculated from the linear section of the flow curves, depending on the strength of the external magnetic field

что связано с процессами разрушения структуры агрегатов сдвиговым потоком. При этом нелинейность кривых течения становится более выраженной в магнитном поле, стимулирующем упорядочение и объединение агрегатов наночастиц. При больших скоростях сдвига кривые течения демонстрируют линейный ход, и по углу наклона кривых на этом участке можно определить коэффициент эффективной вязкости феррожидкости. Соответствующий расчет (см. вставки на рис. 12) показывает, что эффективная вязкость феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, возрастает с увеличением приложенного магнитного поля, что объясняется формированием и ростом упорядоченной структуры агрегатов ориентированной перпендикулярно скорости сдвигового потока. Отметим, что измерения, выполненные в режиме увеличения скорости сдвига и в режиме ее последующего уменьшения, не выявили гистерезиса кривой течения, что говорит об обратимости происходящих в системе процессов перестроения структуры.

Реологическое поведение системы эллипсоидальных агрегатов магнитных частиц в магнитном поле было теоретически исследовано в работе [36]. Для реологической кривой было получено следующее выражение:

$$\tau = \eta_0\dot{\gamma} + \varphi\left(\mu_0 H^2\right)^{2/3}\left(\eta_0\dot{\gamma}\right)^{1/3}\left(\frac{7}{22}\cdot\frac{\chi^4}{2+\chi}\right)^{1/3}, \quad (2)$$

где χ – магнитная восприимчивость агрегатов, η_0 – динамическая вязкость дисперсионной среды. Проведем оценки согласно выражению (2), подставляя в качестве вязкости дисперсионной среды вязкость керосина ($\eta_0 = 1$ мПа·с) и используя для магнитной восприимчивости значение для предельно концентрированной феррожидкости ($\chi = 10$). Рассчитанные согласно (2) кривые течения для концентрации $\varphi = 0.1$ представлены на рис. 13. Как видно из рисунка, расчеты демонстрируют характер кривых течения качественно аналогичный наблюдаемым в эксперименте и близкие (в пределах порядка) численные значения. В слабых и умеренных полях имеет место довольно близкое количественное согласие данных, однако с ростом напряженности поля отличие усиливается.

Исследование рассеяния света в слоях феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, показало, что уже в полях относительно малой напряженности формирование упорядоченной структуры агрегатов в магнитном поле приводит к выраженной анизотропии рассеяния. При этом увеличение магнитного поля приводит к увеличению интенсивности рассеянного света, проходящего сквозь исследуемый образец. Картина распределения интенсивности рассеянного света в плоскости экрана для образца феррожидкости с концентрацией 4.12% показана на рис. 14. Природа наблюдаемых в данном случае явлений в целом аналогична описанной в [23].

В работе также был проведен радиоспектроскопический анализ исследуемых образцов. На рис. 15 представлены микроволновые спектры действительной

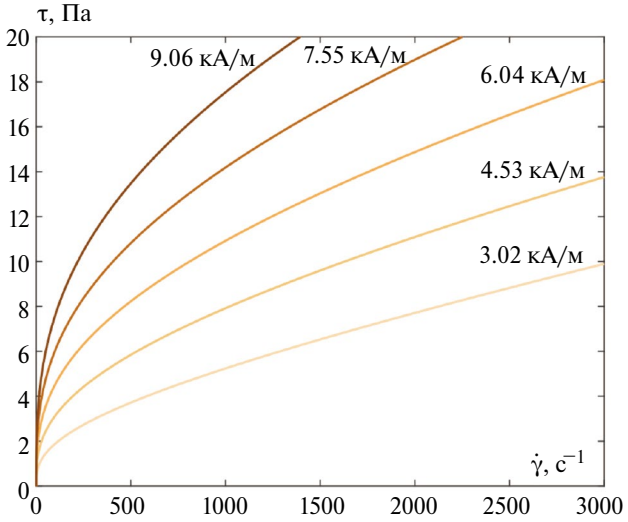


Рис. 13. Рассчитанные согласно (2) кривые течения агрегированной феррожидкости при различных величинах напряженности магнитного поля ($\varphi = 0.1$)
Fig. 13. The flow curves of the aggregated ferrofluid calculated according to (2) at various values of the magnetic field strength ($\varphi = 0.1$)

части диэлектрической проницаемости при различных значениях напряженности внешнего поля. Как видно из рисунка, с увеличением напряженности внешнего магнитного поля наблюдается сдвиг спектральных кривых действительной части диэлектрической проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, в область более высоких значений ε'. Это связано со структурными изменениями в образце и объясняется аналогично представленному выше при описании низкочастотных диэлектрических свойств. В условиях эксперимента большая полуось агрегатов сонаправлена с электрическим полем электромагнитной волны. Увеличение вытянутости агрегатов приводит к уменьшению деполяризующего фактора вдоль большой полуоси и, как следствие, к повышению диэлектрической проницаемости образца. Поскольку характерная протяженность агрегатных структур (примерно 100–200 мкм) существенно меньше длины волны излучения (3.5 см), выполняется условие квазистатического приближения [37]. Это позволяет и в данном случае анализировать систему в рамках традиционного приближения эффективной среды.

Микроволновые спектры мнимой части диэлектрической проницаемости феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля представлены на рис. 16. Увеличение напряженности магнитного поля также приводит к сдвигу спектров ε'' в область более высоких значений. Спектры, приведенные на рис. 15 и 16 демонстрируют, что образец с концентрацией твердой фракции 10.9% ожидаемо обладает более высокими значениями действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости по сравнению с образцом с концентрацией 4.12%.

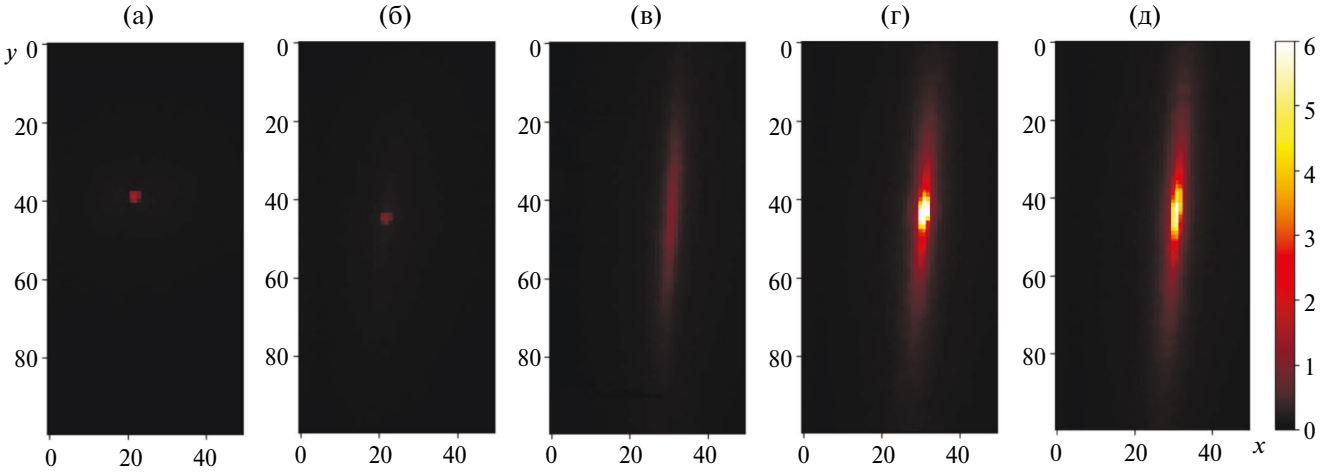


Рис. 14. Распределение эффективной интенсивности рассеянного света для образца феррожидкости с концентрацией 4.12% при различных величинах магнитного поля: (а) 0, (б) 1.15, (в) 2.3, (г) 3.45 и (д) 4.60 кА/м (шкала в условных единицах)
Fig. 14. Distribution of the effective intensity of scattered light for a ferrofluid sample with a concentration of 4.12% at various values of the magnetic field: (а) 0, (б) 1.15, (в) 2.3, (г) 3.45, and (д) 4.60 kA/m (scale in conventional units)

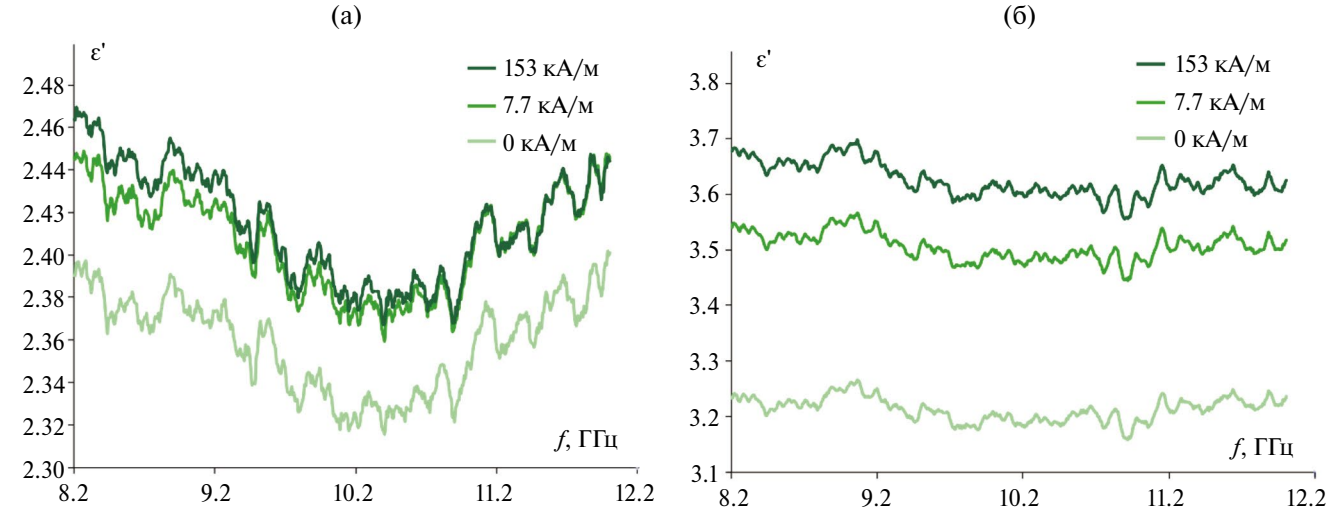


Рис. 15. Микроволновые спектры действительной части диэлектрической проницаемости образцов феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. (а) Образец с концентрацией 4.12%. (б) Образец с концентрацией 10.9%
Fig. 15. Microwave spectra of the actual part of the dielectric constant of samples of ferrofluid containing aggregates of nanoparticles at various values of the external magnetic field strength. (а) Sample with a concentration of 4.12%. (б) Sample with a concentration of 10.9%

Рассмотрим подробнее спектры комплексной диэлектрической проницаемости образца с концентрацией 10.9%, так как он демонстрирует более высокие количественные характеристики. На рис. 17 представлены зависимости относительного изменения действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях частоты электромагнитного излучения. При увеличении частоты электромагнитного излучения наблюдается снижение относительного изменения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Данный эффект обусловлен дисперсией диэлектрической проницаемости компонентов коллоида.

Анализ микроволновых спектров магнитной проницаемости феррожидкостей, содержащих агрегаты наночастиц (рис. 18), указывает на незначительное влияние внешнего магнитного поля на данную характеристику. Величина действительной части магнитной проницаемости при этом оказывается близка к 1, а мнимой к 0. Магнитная проницаемость феррожидкостей в микроволновом диапазоне имеет резонансный характер. Исследованию резонанса в феррожидкостях посвящено

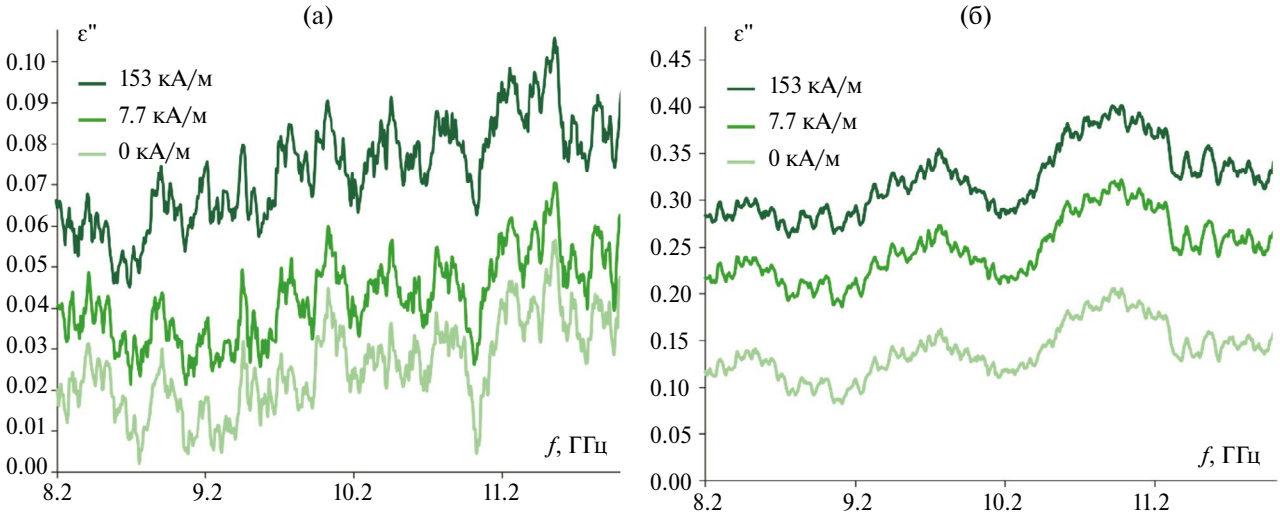


Рис. 16. Микроволновые спектры мнимой части диэлектрической проницаемости образцов феррожидкости, содержащая агрегаты наночастиц, при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. (а) Образец с концентрацией 4.12%. (б) Образец с концентрацией 10.9%
Fig. 16. Microwave spectra of the imaginary part of the dielectric constant of ferrofluid samples containing aggregates of nanoparticles at various values of the external magnetic field strength. (a) Sample with a concentration of 4.12%. (б) Sample with a concentration of 10.9%

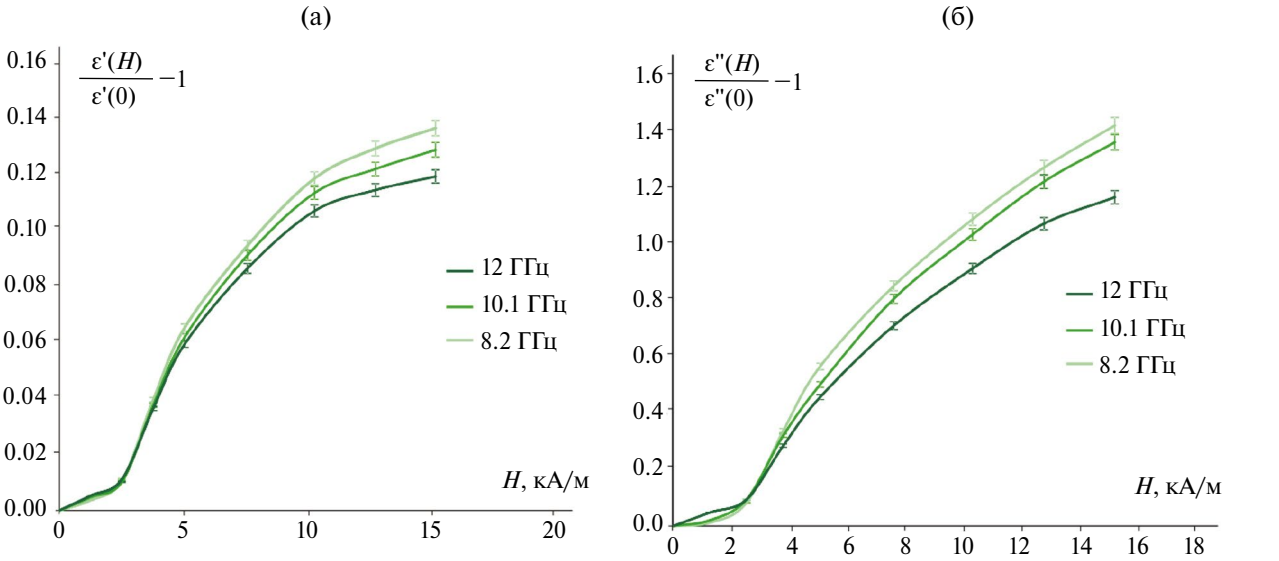


Рис. 17. Зависимости относительного изменения диэлектрической проницаемости образца феррожидкости с объемной концентрацией твердой фазы 10.9% от напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях частоты электромагнитного излучения. (а) Действительная часть диэлектрической проницаемости, (б) – мнимая
Fig. 17. The dependence of the relative change in the dielectric constant of a ferrofluid sample with a volume concentration of 10.9% of the solid phase on the strength of an external magnetic field at various values of the frequency of electromagnetic radiation. (a) The real part of the dielectric constant, (б) the imaginary part

большое количество работ теоретического и экспериментального характера [38–41]. В диапазоне частот 8.2–12 ГГц ферромагнитный резонанс наблюдается при воздействии сильных внешних магнитных полей напряженностью примерно 300 кА/м. Данная работа намеренно ограничена слабыми магнитными полями (до 16 кА/м) вдали от ферромагнитного резонанса. Это позволяет сфокусировать внимание на вкладе структуры намагниченных агрегатов, чья микрогеометрия и ориентация активно трансформируются именно в слабых полях, определяя эффективный отклик среды. Слабое изменение комплексной магнитной проницаемости образцов в совокупности с измеренным высоким диэлектрическим откликом позволяет сделать вывод о селективном влиянии структурной ориентации агрегатов на микроволновое излучение.

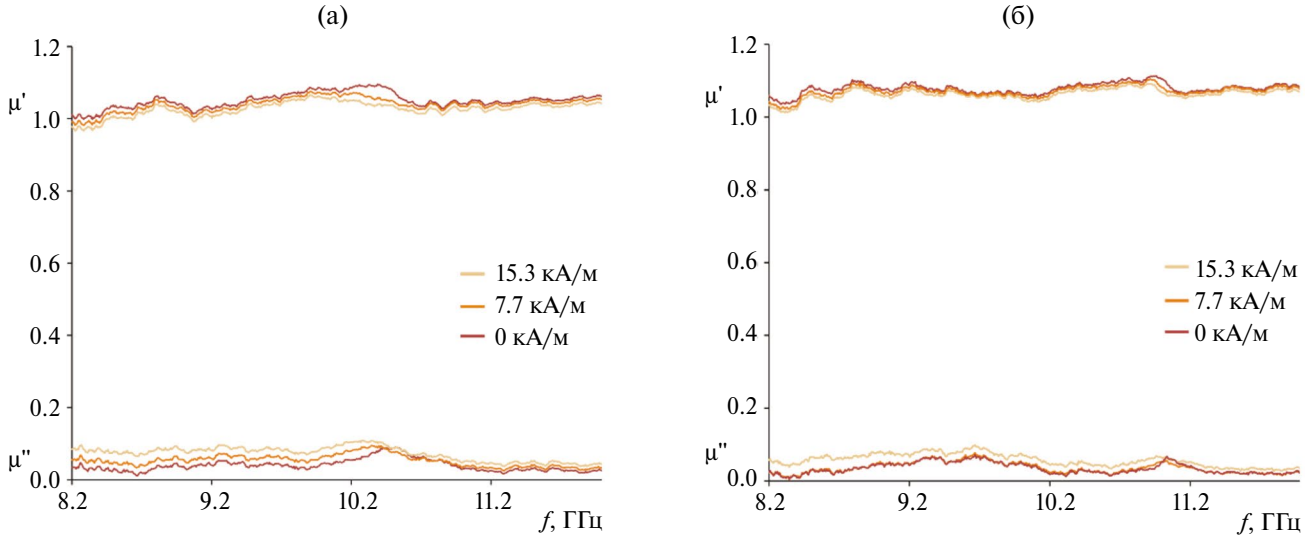


Рис. 18. Микроволновые спектры магнитной проницаемости образцов феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. (а) Образец с концентрацией 4.12%. (б) Образец с концентрацией 10.9%

Fig. 18. Microwave spectra of the magnetic permeability of samples of ferrofluid containing aggregates of nanoparticles at various values of the external magnetic field strength. (a) Sample with a concentration of 4.12%. (б) Sample with a concentration of 10.9%

В ходе проведенных исследований было выявлено, что теплопроводность феррожидкости, содержащей агрегаты наночастиц, не демонстрирует заметного изменения при воздействии внешнего магнитного поля в пределах погрешности измерения. Для образца феррожидкости с концентрацией 4.12% теплопроводность оказалась равна 0.076 Вт/(м·K), для образца с концентрацией 10.9% – 0.148 Вт/(м·K). Рост теплопроводности феррожидкости с концентрацией связан с более высоким значением теплопроводности магнетита по сравнению с керосином.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты целенаправленного синтеза образцов феррожидкости с агрегатами наночастиц дисперсной фазы. Показано, что агрегаты реагируют на воздействие внешнего магнитного поля, объединяясь и ориентируясь вдоль направления приложенного поля. Образование и перестроение микроструктуры агрегатов в образце феррожидкости приводит к изменению ее макроскопических физических свойств. В частности, обнаружено убывание низкочастотной магнитной проницаемости и рост низкочастотных диэлектрической проницаемости и электрической проводимости синтезированных образцов во внешнем магнитном поле, сонаправленном с измерительным полем. Продемонстрирован анизотропный характер макроскопических свойств среды. Показано влияние агрегатов наночастиц на микроволновые характеристики образцов феррожидкостей, проявляющееся в возрастании абсолютных значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости во внешнем магнитном поле, параллельном электрической компоненте электромагнитной волны. Показано, что такая коллоидная система корректно может быть описана в приближении эффективной среды. Обнаружен также неньютоновский характер кривых течения и рост эффективной вязкости феррожидкостей, содержащих агрегаты наночастиц, в магнитном поле, направленном перпендикулярно направлению сдвига. Показан анизотропный характер рассеяния света в слоях феррожидкостей, содержащих агрегаты наночастиц, интенсивность которого возрастает с ростом величины напряженности магнитного поля, приложенного вдоль слоя образца. Полученные результаты указывают на возможные перспективы применения феррожидкостей, содержащих агрегаты наночастиц, в качестве сред с управляемыми свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and applications. *Braz. J. Phys.* 2005. Vol. 35. no. 3A. Pp. 718–727. https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000400018
2. Такетоми С., Тикатзуми С. *Магнитные жидкости*. Москва: Мир, 1993.

3. Ganapathe L.S., Mohamed M.A., Mohamad Yunus R. et al. Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles in biomedical application: From synthesis to surface functionalisation. *Magnetochemistry*. 2020. Vol. 6. no. 4. P. 68. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068
4. Socoliuc V., Avdeev M.V., Kuncser V. et al. Ferrofluids and bio-ferrofluids: looking back and stepping forward. *Nanoscale.* 2022. Vol. 14. no. 13. Pp. 4786–4886. https://doi.org/10.1039/D1NR05841J
5. Chekanov V.V., Drozdova V.I., Nutsubidze P.V. et al. Aggregation and magnetization change in a magnetic liquid. *Magnetohydrodynamics.* 1984. Vol. 20. no. 1. Pp. 1–6.
6. Dikanskii Y.I., Balabanov K.A., Borisenko O.V. et al. Magnetic ordering in a magnetic fluid containing quasi-solid aggregates. *Magnetohydrodynamics.* 1997. Vol. 33. no. 2. Pp. 202–204.
7. Иванов А.О., Менделев В.С. Влияние цепочечных агрегатов на магнитные свойства ферроколлоидов. *Коллоидный журнал*. 2007. Т. 69. № 3. С. 294–301.
8. Кушнир С.Е., Казин П.Е., Трусов Л.А. и др. Процессы самоорганизации микро- и наночастиц в феррожидкостях. *Успехи химии*. 2012. Т. 81. № 6. С. 560–570. https://doi.org/10.1070/RC2012v081n06ABEH004250
9. Лахтина Е.В., Пшеничников А.Ф. Влияние коагулянта и свободного стабилизатора на образование агрегатов в магнитных жидкостях. *Коллоидный журнал*. 2010. Т. 72. № 2. С. 231–237.
10. Ivanov A.O., Zubarev A. Chain formation and phase separation in ferrofluids: the influence on viscous properties. *Materials.* 2020. Vol. 13. no. 18. P. 3956. https://doi.org/10.3390/ma13183956
11. Иванов А.С. О причинах обратимого агрегирования магнетитовых феррожидкостей при их разбавлении чистым носителем в нулевом магнитном поле. *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84. № 6. С. 732–739. https://doi.org/10.31857/S0023291222600274
12. Chen S., Li D. Control of magnetic particle size in ferrofluid and its effect on rheological properties. *Chin. J. Mech. Eng*. 2022. Vol. 35. P. 79. https://doi.org/10.1186/s10033-022-00718-z
13. Zhao P., Ma N., Du T. et al. Comprehensive analysis of the structural evolution and dynamic mechanical behavior of ferrofluids through coarse-grained molecular dynamics and experimental testing. *Langmuir.* 2025. Vol. 41. no. 15. Pp. 9591–9600. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04390
14. Vinod S., Philip J. Experimental evidence for the significant role of initial cluster size and liquid confinement on thermo-physical properties of magnetic nanofluids under applied magnetic field. *J. Mol. Liq.* 2018. Vol. 257. Pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.086
15. Vahidhosseini S.M., Bidi M.A., Rashidi S. Thermophysical properties of magnetic nanofluids under effects of magnetic field — A review on mechanisms and studies. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2025. Vol. 150. Pp. 2811–2846. https://doi.org/10.1007/s10973-024-13490-0
16. Ivanov A.O., Camp P.J. How particle interactions and clustering affect the dynamic magnetic susceptibility of ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater.* 2023. Vol. 586. P. 171216. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171216
17. Haas W.L.E., Adams J.E. Diffraction effects in ferrofluids. *Appl. Phys. Lett.* 1975. Vol. 27. Pp. 571–572. https://doi.org/10.1063/1.88299
18. Dave V., Mehta R.V. Diffraction of laser light by a Ferrocell and ferrofluid layers: A comparison. *Optik*. 2024. Vol. 311. P. 171925. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171925
19. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I., Kolesnikova A.A. Structural transformations in a thin layer of magnetic colloid with magnetized aggregates exposed to an elliptically polarized rotating magnetic field. *Magnetohydrodynamics.* 2016. Vol. 52. no. 3. Pp. 319–332. http://doi.org/10.22364/mhd
20. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I., Ispiryan A.G. Some features of the magnetization of thin layers of magnetic fluids with magnetized aggregates in magnetic and electric fields. *Magnetohydrodynamics*. 2018. Vol. 54. no. 1/2. Pp. 15–22. https://doi.org/10.22364/mhd.54.1-2.3
21. Ерин К.В., Куникин С.А. Рассеяние света агрегатами наночастиц магнетита при воздействии магнитного поля. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. № 10. С. 85–88.

22. Dikansky Yu.I., Gladkikh D.V., Zakinyan A.A. et al. Magnetic and structural properties of magnetic colloids with a well-developed system of magnetized aggregates. *J. Mol. Liq*. 2020. Vol. 319. P. 114171. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114171
23. Белых С.С., Ерин К.В., Закинян А.Р. и др. Структурированные среды на основе магнитных коллоидов как перспективный материал для магнитоуправляемых оптических элементов. *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 3. С. 61–71. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-03-61-71
24. Ivanov A.O., Ludwig F. Static magnetic response of multicore particles. *Phys. Rev. E*. 2020. Vol. 102. P. 032603. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032603
25. Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю. Вязкоупругие свойства феррожидкостей с кластерными частицами. *Коллоидный журнал*. 2023. Т. 85. № 6. С. 93–100. https://doi.org/10.31857/S0023291222600456
26. Kuznetsov A.A., Novak E.V., Pyanzina E.S. et al. Multicore-based ferrofluids in zero field: initial magnetic susceptibility and self-assembly mechanisms. *Soft Matter*. 2023. Vol. 19. no. 24. Pp. 4549–4561. https://doi.org/10.1039/D3SM00440F
27. Новопашин С.А., Серебрякова М.А., Хмель С.Я. Методы синтеза магнитных жидкостей (обзор). *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22. № 4. С. 411–421.
28. Production of magnetic fluids by peptization techniques. United States Patent US3843540A, 1974. URL: https://patents.google.com/patent/US3843540A/en (дата обращения: 02.02.2026)
29. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. *Магнитные жидкости*. Москва: Химия, 1989.
30. Sulissetiawati, Setiawan A., Debora R. et al. Preparation of kerosene-based ferrofluid and analysis of its stability using oleic acid. *Appl. Phys. A*. 2026. Vol. 132. P. 235. https://doi.org/10.1007/s00339-026-09432-2
31. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. *Магнитные жидкости*. Рига: Зинатне, 1989.
32. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas*. 1970. Vol. 19. no. 4. Pp. 377–382. https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932
33. Weir W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. *Proc. IEEE*. 1974. Vol. 62. no. 1. Pp. 33–36. https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382
34. Baker-Jarvis J., Janezic M.D., Grosvenor J.H. Jr. et al. *Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability*. Washington, DC: NIST Technical Note 1355, 1992.
35. Fricke H. The Maxwell–Wagner dispersion in a suspension of ellipsoids. *J. Phys. Chem*. 1953. Vol. 57. no. 9. Pp. 934–937. https://doi.org/10.1021/j150510a018
36. Lopez-Lopez M.T., Kuzhir P., Zubarev A. Effect of drop-like aggregates on the viscous stress in magnetic suspensions. *J. Non-Newton. Fluid Mech*. 2014. Vol. 208–209. Pp. 53–58. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.04.001
37. Sihvola A. *Electromagnetic mixing formulas and applications*. London: Institution of Electrical Engineers (IEE), 1999.
38. Malaescu I., Marin C.N., Fannin P.C. Experimental investigations on the ferromagnetic resonance and absorbing properties of a ferrofluid in the microwave range. *Magnetochemistry*. 2024. Vol. 10. no. 2. P. 7. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10020007
39. Gekht R.S., Ignatchenko V.A., Raikher Yu.L. et al. Magnetic resonance of an isotropic superparamagnet. *J. Exp. Theor. Phys*. 1976. Vol. 43. no. 4. Pp. 677–683.
40. Fannin P.C., Bunoiu O.M., Malaescu I. et al. Magnetically tuning microwave propagation parameters in ferrofluids. *Eur. Phys. J. E*. 2021. Vol. 44. P. 83. https://doi.org/10.1140/epje/s10189-021-00087-w
41. Fannin P.C. Use of ferromagnetic resonance measurements in magnetic fluids. *J. Mol. Liq*. 2004. Vol. 114. nos. 1–3. Pp. 79–87. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2004.02.020

REFERENCES

1. Scherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and applications. *Braz. J. Phys*. 2005;**35**(3A):718–727. https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000400018
2. Taketomi S., Chikazumi S. *Magnetic fluids: Principle and application*. Tokyo: Nikkan Kogyo Shinbun, 1988.

3. Ganapathe L.S., Mohamed M.A., Mohamad Yunus R. et al. Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles in biomedical application: From synthesis to surface functionalisation. *Magnetochemistry*. 2020;**6**(4):68. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068
4. Socoliuc V., Avdeev M., Kuncser V. et al. Ferrofluids and bio-ferrofluids: looking back and stepping forward. *Nanoscale*. 2022;**14**(13):4786–4886. https://doi.org/10.1039/D1NR05841J
5. Chekanov V.V., Drozdova V.I., Nutsubidze P.V. et al. Aggregation and magnetization change in a magnetic liquid. *Magnetohydrodynamics*. 1984;**20**(1):1–6.
6. Dikanskii Y.I., Balabanov K.A., Borisenko O.V. et al. Magnetic ordering in a magnetic fluid containing quasi-solid aggregates. *Magnetohydrodynamics*. 1997;**33**(2):202–204.
7. Ivanov A.O., Mendelev V.S. The influence of chain aggregates on the magnetic properties of ferrocolloids. *Colloid J*. 2007;**69**(3):294–301. https://doi.org/ 10.1134/S1061933X07030052
8. Kushnir S.E., Kazin P.E., Trusov L.A. et al. Self-organization of micro- and nanoparticles in ferrofluids. *Russ. Chem. Rev.* 2012;**81**(6):560–570. https://doi.org/10.1070/RC2012v081n06ABEH004250
9. Lakhtina E.V., Pshenichnikov A.F. Influence of coagulant and free stabilizer on formation of aggregates in magnetic fluids. *Colloid J*. 2010;**72**(2):236–242. https://doi.org/10.1134/S1061933X10020146
10. Ivanov A.O., Zubarev A. Chain formation and phase separation in ferrofluids: the influence on viscous properties. *Materials*. 2020;**13**(18):3956. https://doi.org/10.3390/ma13183956
11. Ivanov A.S. On the reasons for reversible aggregation of magnetite ferrofluids upon their dilution with a pure carrier in a zero magnetic field. *Colloid J*. 2022;**84**(6):696–703. https://doi.org/10.1134/S1061933X22600257
12. Chen S., Li D. Control of magnetic particle size in ferrofluid and its effect on rheological properties. *Chin. J. Mech. Eng.* 2022;**35**:79. https://doi.org/10.1186/s10033-022-00718-z
13. Zhao P., Ma N., Du T. et al. Comprehensive analysis of the structural evolution and dynamic mechanical behavior of ferrofluids through coarse-grained molecular dynamics and experimental testing. *Langmuir*. 2025;**41**(15):9591–9600. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04390
14. Vinod S., Philip J. Experimental evidence for the significant role of initial cluster size and liquid confinement on thermo-physical properties of magnetic nanofluids under applied magnetic field. *J. Mol. Liq*. 2018;**257**:1–11. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.086
15. Vahidhosseini S.M., Bidi M.A., Rashidi S. Thermophysical properties of magnetic nanofluids under effects of magnetic field—A review on mechanisms and studies. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2025;**150**:2811–2846. https://doi.org/10.1007/s10973-024-13490-0
16. Ivanov A.O., Camp P.J. How particle interactions and clustering affect the dynamic magnetic susceptibility of ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater*. 2023;**586**:171216. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171216
17. Haas W.L.E., Adams J.E. Diffraction effects in ferrofluids. *Appl. Phys. Lett.* 1975;**27**:571–572. https://doi.org/10.1063/1.88299
18. Dave V., Mehta R.V. Diffraction of laser light by a Ferrocell and ferrofluid layers: A comparison. *Optik*. 2024;**311**:171925. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171925
19. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I., Kolesnikova A.A. Structural transformations in a thin layer of magnetic colloid with magnetized aggregates exposed to an elliptically polarized rotating magnetic field. *Magnetohydrodynamics*. 2016;**52**(3):319–332. http://doi.org/10.22364/mhd
20. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I., Ispiryan A.G. Some features of the magnetization of thin layers of magnetic fluids with magnetized aggregates in magnetic and electric fields. *Magnetohydrodynamics*. 2018;**54**(1/2):15–22. https://doi.org/10.22364/mhd.54.1-2.3
21. Erin K.V., Kunikin S.A. Light scattering by magnetite nanoparticle aggregates under the action of a magnetic field. *Tech. Phys*. 2007;**52**(10):1332–1335. https://doi.org/10.1134/S1063784207100131

22. Dikansky Yu.I., Gladkikh D.V., Zakinyan A.A. et al. Magnetic and structural properties of magnetic colloids with a well-developed system of magnetized aggregates. *J. Mol. Liq.* 2020;**319**:114171. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114171
23. Zakinyan A.A., Belykh S.S., Zakinyan A.R. et al. Structured media based on magnetic colloids as a promising material for magnetically controllable optical elements. *J. Opt. Technol.* 2021;**88**(3):158–165. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000158
24. Ivanov A.O., Ludwig F. Static magnetic response of multicore particles. *Phys. Rev. E.* 2020;**102**:032603. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032603
25. Chirikov D.N., Zubarev A.Yu. Viscoelastic properties of ferrofluids with clustered particles. *Colloid J.* 2023;**85**(1):87–94. https://doi.org/10.1134/S1061933X22600506
26. Kuznetsov A.A., Novak E.V., Pyanzina E.S. et al. Multicore-based ferrofluids in zero field: initial magnetic susceptibility and self-assembly mechanisms. *Soft Matter.* 2023;**19**(24):4549–4561. https://doi.org/10.1039/D3SM00440F
27. Novopashin S.A., Serebryakova M.A., Khmel S.Ya. Methods for the synthesis of magnetic fluids (review). *Thermophys. Aeromech.* 2015;**22**(4):397–412. https://doi.org/10.1134/S0869864315040010
28. Production of magnetic fluids by peptization techniques. United States Patent US3843540A, 1974. URL: https://patents.google.com/patent/US3843540A/en (Accessed: 02.02.2026).
29. Berkovsky B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnetic fluids: Engineering applications*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
30. Sulissetiawati, Setiawan A., Debora R. et al. Preparation of kerosene-based ferrofluid and analysis of its stability using oleic acid. *Appl. Phys. A.* 2026;**132**:235. https://doi.org/10.1007/s00339-026-09432-2
31. Blums E., Cebers A., Maiorov M.M. *Magnetic fluids*. Berlin: de Gruyter, 1997.
32. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1970;**19**(4):377–382. https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932
33. Weir W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. *Proc. IEEE.* 1974;**62**(1):33–36. https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382
34. Baker-Jarvis J., Janezic M.D., Grosvenor J.H. Jr. et al. *Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability*. Washington, DC: NIST Technical Note 1355, 1992.
35. Fricke H. The Maxwell–Wagner dispersion in a suspension of ellipsoids. *J. Phys. Chem.* 1953;**57**(9):934–937. https://doi.org/10.1021/j150510a018
36. Lopez-Lopez M.T., Kuzhir P., Zubarev A. Effect of drop-like aggregates on the viscous stress in magnetic suspensions. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 2014;**208–209**:53–58. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.04.001
37. Sihvola A. *Electromagnetic mixing formulas and applications*. London: Institution of Electrical Engineers (IEE), 1999.
38. Malaescu I., Marin C.N., Fannin P.C. Experimental investigations on the ferromagnetic resonance and absorbing properties of a ferrofluid in the microwave range. *Magnetochemistry.* 2024;**10**(2):7. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10020007
39. Gekht R.S., Ignatchenko V.A., Raikher Yu.L. et al. Magnetic resonance of an isotropic superparamagnet. *J. Exp. Theor. Phys.* 1976;**43**(4):677–683.
40. Fannin P.C., Bunoiu O.M., Malaescu I. et al. Magnetically tuning microwave propagation parameters in ferrofluids. *Eur. Phys. J. E.* 2021;**44**:83. https://doi.org/10.1140/epje/s10189-021-00087-w
41. Fannin P.C. Use of ferromagnetic resonance measurements in magnetic fluids. *J. Mol. Liq.* 2004;**114**(1–3):79–87. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2004.02.020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Орехова Светлана Михайловна — инж.-физ. каф. теоретической и математической физики, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
E-mail: smorekhova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-3987-0851

Боженко Софья Александровна — преподаватель каф. экспериментальной физики, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
E-mail: s.semyonovaa@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0004-9645-3465

Чернышов Андрей Владимирович — зав. обсерваторией, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
E-mail: andreyrwm@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-0015-8852

Туркин Сергей Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук; доц. каф. теоретической и математической физики, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
E-mail: turkinsd@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8083-9716

Закинян Артур Робертович — д-р физ.-мат. наук; зав. каф. теоретической и математической физики, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация
E-mail: zakinyan.a.r@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4599-7663

ABOUT THE AUTHORS

Orekhova, Svetlana M. — Engineer-physicist at the Department of Theoretical and Mathematical Physics, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
E-mail: smorekhova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-3987-0851

Bozhenko, Sofya A. — Lecturer at the Department of Experimental Physics, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
E-mail: s.semyonovaa@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0004-9645-3465

Chernyshov, Andrey V. — Head of the Observatory, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
E-mail: andreyrwm@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-0015-8852

Turkin, Sergey D. — Cand. Sc. (Physics and Mathematics); Associate Professor at the Department of Theoretical and Mathematical Physics, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
E-mail: turkinsd@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8083-9716

Zakinyan, Arthur R. — Ph.D. (Physics and Mathematics); Head of the Department of Theoretical and Mathematical Physics, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
E-mail: zakinyan.a.r@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4599-7663

Поступила в редакцию 20.02.2026
После доработки 27.04.2026
Принята к публикации 27.04.2026

Received February 20, 2026
Revised April 27, 2026
Accepted April 27, 2026