

УДК 532.7+537.84

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-55-70>



Влияние внешнего магнитного поля на вязкость электропроводящих магнитных жидкостей

К. Комилов¹, А. К. Зарифзода² ✉

¹ Таджикский национальный университет,
пр. Рудаки, д. 17, г. Душанбе 734025, Таджикистан

² Физико-технический институт им. С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана
пр. Айни, д. 299/1, г. Душанбе 734063, Таджикистан

✉ e-mail: afzal.z@mail.ru

Резюме

Цель. Теоретическое исследование влияния внешнего магнитного поля на сдвиговой и объемной вязкости электропроводящих магнитных жидкостей.

Методы. Применен метод молекулярно-кинетической теории, который с использованием кинетических уравнений для одночастичных и двухчастичных функций распределения позволяет исследовать динамические процессы переноса в электропроводящих магнитных жидкостях. При построении кинетических уравнений электропроводящая магнитная жидкость рассматривается как многокомпонентная система, в которой немагнитная и магнитная подсистемы считаются независимыми, а магнитные частицы и вещества стабилизатора тесно взаимодействуют между собой.

Результаты. На основе динамических выражений для коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости, учитывающих механизмы трансляционной и структурной релаксационных процессов, проведена серия численных расчетов зависимости коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости от напряженности внешнего магнитного поля, объемной концентрации магнитных частиц и концентрации металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях на основе ртути и эвтектического сплава галлия и индия. Показано, что с возрастанием величины внешнего магнитного поля коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях нелинейно возрастают. Увеличение объемной концентрации магнитных частиц также приводит к нелинейному возрастанию коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости.

Заключение. Приведенные численные расчеты коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости в зависимости от концентрации металлических добавок показали, что применение металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях приводит к заметному снижению их вязкости. Показано, что полученные результаты находятся в хорошем согласии с имеющимися литературными данными и могут быть полезными для дальнейшего развития теории процессов переноса в электропроводящих магнитных жидкостях.

Ключевые слова: электропроводящая магнитная жидкость; сдвиговая вязкость; объемная вязкость; магнитное поле; концентрация; жидкий металл.

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

Для цитирования: Комилов К., Зарифзода А. К. Влияние внешнего магнитного поля на вязкость электропроводящих магнитных жидкостей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 55–70. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-55-70>

Поступила в редакцию 12.03.2024

Подписана в печать 24.04.2024

Опубликована 17.06.2024

Influence of external magnetic field on the viscosity of electrically conducting magnetic fluids

Kosim Komilov¹, Afzalshoh Q. Zarifzoda² ✉

¹ Tajik National University,
17 Rudaki Ave., Dushanbe 734025, Tajikistan

² S.U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan
299/1 Aini Ave., Dushanbe 734063, Tajikistan

✉ e-mail: afzal.z@mail.ru

Abstract

Purpose. Theoretical study of an external magnetic field on the discontinuous and bulk viscosity of electrically conductive magnetic fluids.

Methods. The method of molecular kinetic theory is used, which, using kinetic methods for single-particle and two-particle distribution functions, allows one to determine transfer mechanisms in electrically conductive magnetic fluids. When constructing kinetic mathematical electrically conductive magnetic fluids as multicomponent systems in which non-magnetic and magnetic subsystems are independent, magnetic particles and the stabilizer substance closely interact with each other.

Results. Based on algorithms of expressions for the coefficients of shear and volumetric viscosity, the observed mechanisms of translational and structural relaxation processes, a series of calculations was carried out depending on the coefficients of stepwise and volumetric viscosity from the results of external magnetic fields, the volumetric structure of magnetic particles and the calculation of measured values in electrically conductive magnetic fluids based on mercury and a eutectic alloy of Gallium and Indium. It is shown that with increasing external magnetic fields, the coefficients of shear and bulk viscosity in electrically conductive magnetic fluids increase nonlinearly. An increase in the volume of elements of magnetic particles also leads to a nonlinear increase in the coefficients of shear and bulk viscosity.

Conclusion. The given calculations of the coefficients of shear and bulk viscosity depending on the principle of interdependence indicate that the use of metal constants in electrically conductive magnetic fluids leads to a noticeable decrease in their viscosity. It is shown that the results obtained, in good agreement with literature data, can be used for further development of the theory of transfer processes of electrically conductive magnetic fluids.

Keywords: electrically conductive magnetic fluid; shear viscosity; bulk viscosity; magnetic field; concentration; liquid metal.

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

For citation: Komilov K., Zarifzoda A.Q. Influence of external magnetic field on the viscosity of electrically conducting magnetic fluids. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(2):55–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-55-70>

Received 12.03.2024

Accepted 24.04.2024

Published 17.06.2024

Введение

Синтез и применение магнитных жидкостей на основе жидких металлов является одним из перспективных направлений в развитии технологического применения нанодисперсных систем. Жидкометаллические или электропроводящие магнитные жидкости представляют собой нанодисперсные системы, состоящие из проводящей несущей среды и суспендированных в ней магнитных наночастиц железа, магнетита, кобальта, никеля и др. Применение в качестве несущей среды жидкого металла позволяет получить электропроводящую магнитную жидкость, обладающую сильными магнитными и электрическими свойствами, а также хорошей теплопроводностью, что расширяет возможности их производственного применения.

Впервые в [1] Люборский получил проводящую магнитную жидкость на основе ртути с частицами железа. Позднее в работах [2] и [3] методом электроосаждения были введены частицы железа и гадолиния в ртуть. В [4] сообщалось о получении проводящей магнитной жидкости из сплавов никеля и железа на основе ртути с использованием метода электрического осаждения. В [5] для приготовления электропроводящих магнитных жидкостей в качестве жидкой основы также были использованы олово, галистан и висмутовые сплавы.

Чарльз и Попплуэлл в работе [6] получили электропроводящую магнитную жидкость на основе ртути, содержащую частицы железа и металлические добавки из олова и натрия. В своих исследованиях они показали, что присутствие олова и натрия, повышая стабильность магнитной жидкости, улучшает ее свойства. Однако при длительном наблюдении обнаруживалась кластеризация железных частиц и даже присутствие олова не могло это устранить. Также в [7] подтверждается,

что применение металлических покрытий из олова и сурьмы в электропроводящей магнитной жидкости на основе ртути и частиц железа увеличивает ее устойчивость. При получении магнитных жидкостей диаметр железных частиц составлял 4,5 нм.

В [8] исследованы магнитные и вязкостные свойства электропроводящей магнитной жидкости на основе жидкой ртути и частиц железа. Показано, что добавление сурьмы в виде эвтектики сурьма-свинец, образуя монослой вокруг частиц железа, заметно уменьшает его рост и кластеризацию. При добавлении сурьмы в количестве, превышающем необходимое для образования монослоя, магнитные свойства магнитной жидкости резко ухудшаются. Увеличение концентрации железных частиц привело к резкому возрастанию вязкости магнитной жидкости. Однако добавление необходимого количества сурьмы к жидкости привело к заметному снижению вязкости и увеличению намагниченности насыщения до 70 кА/м. Аналогичным методом в [9] при добавлении висмута и лития в электропроводящую магнитную жидкость на основе ртути удавалось уменьшить вязкость до $2 \cdot 10^{-2}$ Па·с, а концентрацию магнитных частиц увеличить до 7 мас. %. При использовании висмутовых и литиевых металлических добавок намагниченность насыщения в магнитной жидкости увеличилась до 100 кА/м.

Измерения частотно-зависимой магнитной восприимчивости электропроводящей магнитной жидкости на основе ртути с частицами кобальта, покрытыми оловом, при различных значениях температуры были проведены в работах [10] и [11]. Были использованы три образца магнитных жидкостей с объемными концентрациями 0,01; 0,003 и 0,001, в которых измерения проводились в диапазоне температур 80–290 К при значении частоты

10 кГц. Исследования показали, что в графической зависимости магнитной восприимчивости наблюдаются три максимума, соответствующих некоторой температуре: ниже температуры плавления ртути, температуре плавления ртути и третий максимум наблюдался выше точки плавления ртути. Измерения, проводимые с различными образцами, показали, что положение максимумов в зависимости от концентрации магнитных частиц изменяется.

Новый метод суспендирования железных частиц в ртути и оптимизации физических свойств магнитной жидкости предложен в [12]. В работе в качестве магнитной составляющей были использованы частицы магнетита Fe_3O_4 и маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. При приготовлении магнитной жидкости были использованы два типа магнитных частиц: магнетита Fe_3O_4 и маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, и исследованы физические характеристики полученных образцов магнитных жидкостей.

Методы получения электропроводящей магнитной жидкости из жидкой ртути с частицами кобальта описаны в [13]. В работе исследовано влияние ряда металлических добавок на физические свойства магнитных жидкостей и показано, что при введении сплава галлия и олова устойчивость и свойства магнитной жидкости улучшаются.

В [14] проведены теоретические и экспериментальные исследования микроструктуры и физических свойств проводящих магнитных жидкостей на основе жидких металлов. Показано, что при учете коллективного взаимодействия частиц касательное напряжение во внешнем магнитном поле является анизотропным.

В первоначальных исследованиях проводящие магнитные жидкости в основном синтезировались на основе жидкой ртути. Однако известно, что ртуть является токсичным веществом и выделяет ядовитые пары. Широкое применение

ртути в технологии создает новые опасности и может привести к многим трудностям. В связи с этим исследователи принимают попытки найти подходящие материалы, позволяющие заменить ртуть. В последнее время получен ряд электропроводящих магнитных жидкостей на основе других жидких металлов.

В работе [15] сообщается о методе получения проводящей магнитной жидкости на основе расплава галлия. При получении магнитной жидкости в качестве магнитных частиц были использованы магнетит, железо и никель, размеры которых лежали в пределах 5–9 нм. Стабилизация магнитных частиц осуществлялась с помощью олова и цинка. В результате намагниченность насыщения полученных магнитных жидкостей достигала 40 кА/м, а их электропроводность увеличилась до 10^6 1/Ом·м. Для достижения таких показателей полученные образцы при высоких температурах подвергались ультразвуковой обработке.

В работах [16] и [17] авторы показывают, что при диспергировании наночастиц титана в жидком натрии получается новый вид ионного жидкого металла, который проявляет новые физико-химические свойства. При этом вязкость ионной жидкости остается почти такой же, как у жидкого натрия. Также в [18] сообщается о получении нового типа магнитной жидкости на основе пиридиния IL . Исследованы физические характеристики полученной магнитной жидкости для ее дальнейшего использования в качестве магнитожидкостного уплотнителя для вращательных механизмов в высоковакуумных камерах.

В работе [19] новым методом получена магнитная жидкость из эвтектического сплава галлия-индия путем диспергирования в нем железных частиц, покрытых серебряной оболочкой. Показано, что присутствие серебряных оболочек предотвращает сплавление железных частиц с

жидким металлом и увеличивает их устойчивость. Сравнительные измерения, проведенные для полученной магнитной жидкости и другого образца с чистыми железными частицами, показали, что присутствие серебряных оболочек в магнитной жидкости увеличивает ее электропроводность на 13,69%, а теплопроводность увеличивается почти в 4 раза. Также в работе исследована зависимость вязкости магнитной жидкости от скорости сдвига и магнитного поля. Показано, что наличие внешнего магнитного поля приводит к существенному возрастанию вязкости, а увеличение скорости сдвига – к ее уменьшению.

В [20] получена магнитная жидкость на основе аморфных магнитных наночастиц Fe-Co-B, введенных в жидкометаллический сплав Ga91.6Sn8.4 и отожженных при температуре 550°C. Аморфные частицы Fe-Co-B после обработки являлись сферическими со средним размером 10,6 нм и после отжига имели намагниченность насыщения намного больше железных магнитных частиц. Полученные на основе сплава Ga91.6Sn8.4 магнитные жидкости с аморфными магнитными частицами Fe-Co-B, являясь высокостабильными, проявляли суперпарамагнитные свойства с высокой намагниченностью насыщения. Результаты измерения показали, что магнитные жидкости проявляют высокие термочувствительные магнитные свойства и в них наблюдается сильный магнитовязкий эффект. Кривые гистерезиса зависимости вязкости от магнитного поля показали хорошую обратимость и большую чувствительность к магнитному полю.

Следует отметить, что, несмотря на большое количество опубликованных экспериментальных и теоретических работ по исследованию динамических свойств магнитных жидкостей, до сих пор не существует такая модель, которая учиты-

вала бы вклады всех релаксационных процессов и всесторонне описывала их свойства. В связи с этим задача исследования магнитных и вязкостных свойств магнитных жидкостей по-прежнему остается важной задачей в исследовании физики магнитных жидкостей.

Материалы и методы

Перспектива технического применения электропроводящих магнитных жидкостей зависит от степени изученности их физико-химических свойств. Всестороннюю информацию о различных свойствах магнитных жидкостей можно получить на основе метода неравновесной статистической теории, учитывающей механизмы внутренних релаксационных процессов.

В [21] на основе метода кинетических уравнений были исследованы вязкоупругие свойства электропроводящих магнитных жидкостей и механизмы релаксационных процессов, протекающих в них. Известно, что основу всех электропроводящих магнитных жидкостей составляют жидкие металлы. Жидкий металл представляет собой двухкомпонентную сильновзаимодействующую систему из электронов и ионов. В общем случае движение и взаимодействие электронов и ионов в жидких металлах необходимо описывать на основе законов квантовой механики, которые сталкиваются со многими трудностями. Поэтому во многих случаях принимаются упрощающие аппроксимации и жидкий металл рассматривается как одночастичная модель, в которой взаимодействие ионов оценивается кулоновским потенциалом, а роль электронов учитывается только в экранировании потенциала ион-ионного взаимодействия.

Что касается магнитной подсистемы, то для предотвращения сильного притяжения твердых магнитных частиц и подавления их диффузионного роста в магнитную жидкость вводятся такие металли-

ческие добавки, которые являются хорошо растворимыми в жидком металле и образуют монослой на поверхности твердых частиц.

Таким образом, в соответствии с [21] электропроводящую магнитную жидкость

рассматриваем как многокомпонентную систему, состоящую из несущего жидкого металла, твердых магнитных частиц и вещества стабилизатора. Кинетические уравнения, описывающие состояние такой системы, имеют следующий вид [21]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{1f}}{\partial t} + \frac{p_{1f}^\alpha}{m_f} \frac{\partial f_{1f}}{\partial q_{1f}^\alpha} + F^\alpha(\mathbf{q}_{1f}, t) \frac{\partial f_{1f}}{\partial p_{1f}^\alpha} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{2f}|)}{\partial q_{1f}^\alpha} \frac{\partial f_{ff}}{\partial p_{1f}^\alpha} d\mathbf{q}_{2f} d\mathbf{p}_{2f} - \\ & - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{1p}|)}{\partial q_{1f}^\alpha} \frac{\partial f_{fp}}{\partial p_{1f}^\alpha} d\mathbf{q}_{1p} d\mathbf{p}_{1p} = \beta_f \frac{\partial}{\partial p_{1f}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{1f}^\alpha}{m_f} f_{1f} + kT(\mathbf{q}_{1f}, t) \frac{\partial f_{1f}}{\partial p_{1f}^\alpha} \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{2f}}{\partial t} + \sum_{n=1}^2 \left[\frac{p_{nf}^\alpha}{m_f} \frac{\partial f_{2f}}{\partial q_{nf}^\alpha} + F^\alpha(\mathbf{q}_{nf}, t) \frac{\partial f_{2f}}{\partial p_{nf}^\alpha} - \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{2f}|)}{\partial q_{nf}^\alpha} \frac{\partial f_{2f}}{\partial p_{nf}^\alpha} - \right. \\ & \left. - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{nf} - \mathbf{q}_{3f}|)}{\partial q_{nf}^\alpha} \frac{\partial f_{3f}}{\partial p_{nf}^\alpha} d\mathbf{q}_{3f} d\mathbf{p}_{3f} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{nf} - \mathbf{q}_{1p}|)}{\partial q_{nf}^\alpha} \frac{\partial f_{fp}}{\partial p_{nf}^\alpha} d\mathbf{q}_{1p} d\mathbf{p}_{1p} \right] = \\ & = \sum_{n=1}^2 \beta_f \frac{\partial}{\partial p_{nf}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{nf}^\alpha}{m_f} + kT(\mathbf{q}_{nf}, t) \frac{\partial}{\partial p_{nf}^\alpha} \right] f_{2f}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{fp}}{\partial t} + \left(\frac{p_{1f}^\alpha}{m_f} \frac{\partial}{\partial q_{1f}^\alpha} + \frac{p_{1p}^\alpha}{m_p} \frac{\partial}{\partial q_{1p}^\alpha} + F^\alpha(\mathbf{q}_{1f}, t) \frac{\partial}{\partial p_{1f}^\alpha} \right) f_{fp} - \\ & - \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{1p}|)}{\partial q_{1f}^\alpha} \frac{\partial f_{fp}}{\partial p_{1f}^\alpha} - \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{1p}|)}{\partial q_{1p}^\alpha} \frac{\partial f_{fp}}{\partial p_{1p}^\alpha} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{2f}|)}{\partial q_{1f}^\alpha} \times \\ & \times \frac{\partial f_{ffp}}{\partial p_{1f}^\alpha} d\mathbf{q}_{2f} d\mathbf{p}_{2f} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1p} - \mathbf{q}_{2f}|)}{\partial q_{1p}^\alpha} \frac{\partial f_{ffp}}{\partial p_{1p}^\alpha} d\mathbf{q}_{2f} d\mathbf{p}_{2f} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1p} - \mathbf{q}_{2p}|)}{\partial q_{1p}^\alpha} \times \\ & \times \frac{\partial f_{fpp}}{\partial p_{1p}^\alpha} d\mathbf{q}_{2p} d\mathbf{p}_{2p} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1f} - \mathbf{q}_{2p}|)}{\partial q_{1f}^\alpha} \frac{\partial f_{fpp}}{\partial p_{1f}^\alpha} d\mathbf{q}_{2p} d\mathbf{p}_{2p} = \\ & = \beta_f \frac{\partial}{\partial p_{1f}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{1f}^\alpha}{m_f} + kT(\mathbf{q}_f, t) \frac{\partial}{\partial p_{1f}^\alpha} \right] f_{fp} + \beta_p \frac{\partial}{\partial p_{1p}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{1p}^\alpha}{m_p} + kT(\mathbf{q}_p, t) \frac{\partial}{\partial p_{1p}^\alpha} \right] f_{fp}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{1s}}{\partial t} + \frac{p_{1s}^\alpha}{m_s} \frac{\partial f_{1s}}{\partial q_{1s}^\alpha} + F^\alpha(\mathbf{q}_{1s}, t) \frac{\partial f_{1s}}{\partial p_{1s}^\alpha} - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1s} - \mathbf{q}_{2s}|)}{\partial q_{1s}^\alpha} \frac{\partial f_{2s}}{\partial p_{1s}^\alpha} d\mathbf{q}_{2s} d\mathbf{p}_{2s} = \\ & = \beta_s \frac{\partial}{\partial p_{1s}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{1s}^\alpha}{m_s} f_{1s} + kT(\mathbf{q}_{1s}, t) \frac{\partial f_{1s}}{\partial p_{1s}^\alpha} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{2s}}{\partial t} + \sum_{n=1}^2 \left[\frac{p_{ns}^\alpha}{m_s} \frac{\partial f_{2s}}{\partial q_{ns}^\alpha} + F^\alpha(\mathbf{q}_{ns}, t) \frac{\partial f_{2s}}{\partial p_{ns}^\alpha} - \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{1s} - \mathbf{q}_{2s}|)}{\partial q_{ns}^\alpha} \frac{\partial f_{2s}}{\partial p_{ns}^\alpha} - \right. \\ & \left. - \int \frac{\partial \Phi(|\mathbf{q}_{ns} - \mathbf{q}_{3s}|)}{\partial q_{ns}^\alpha} \frac{\partial f_{3s}}{\partial p_{ns}^\alpha} d\mathbf{q}_{3s} d\mathbf{p}_{3s} \right] = \sum_{n=1}^2 \beta_s \frac{\partial}{\partial p_{ns}^\alpha} \left[\frac{\tilde{p}_{ns}^\alpha}{m_s} + kT(\mathbf{q}_{ns}, t) \frac{\partial}{\partial p_{ns}^\alpha} \right] f_{2s}, \end{aligned} \quad (5)$$

где m_i – масса частиц i -го сорта; $\Phi(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2)$ – парная потенциальная энергия взаимодействия частиц; k – постоянная Больцмана; T – локальное значение температуры; β_i – коэффициент трения; $F^\alpha(\mathbf{q}, t)$ – сила действия внешнего магнитного поля на твердые магнитные частицы.

На основе системы уравнений (1)–(5) и выведенных на их основе уравнений гидродинамики в [21] получены динамические

выражения для коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости электропроводящей магнитной жидкости. С учетом экранированной и короткодействующей потенциальных энергий взаимодействия ионов несущей среды, модельного потенциала Штокмайера для магнитных частиц, а также потенциала Леннард – Джонса, учитывающего взаимодействия частицы стабилизатора и магнетита, выражения для коэффициентов вязкости имеют следующий вид [21]:

$$\eta_v(\omega) = \sum_{i=f,p,s} \frac{4\varepsilon_i n_i^2 \sigma_i^3}{kT} \int_0^\infty L(r_i) J_i dr_i - \frac{n_s^2 \sigma_s^3}{6kT} \int_0^\infty D(r_s) J_s dr_s +$$

$$+ \frac{4\varepsilon_{fp} n_f n_p \sigma_{fp}^3}{kT} \int_0^\infty L(r_{fp}) J_{fp} dr_{fp}; \quad (6)$$

$$\eta_s(\omega) = \sum_{i=f,p,s} \frac{n_i k T \tau_{li}}{1 + (\omega \tau_{li})^2} + \sum_{i=f,p,s} \frac{4\varepsilon_i n_i^2 \sigma_i^3}{5kT} \int_0^\infty L(r_i) I_i dr_i - \frac{n_s^2 \sigma_s^3}{30kT} \int_0^\infty D(r_s) I_s dr_s +$$

$$+ \frac{8\varepsilon_{fp} n_f n_p \sigma_{fp}^3}{5kT} \int_0^\infty L(r_{fp}) I_{fp} dr_{fp}, \quad (7)$$

где

$$J_f = \int_0^r G_f(r_f, r_{1f}, \omega) g_f \left[\left(\left(\frac{2\mu_0 m^2}{\sigma_f^3 r_{1f}^2 a_f} - 32\pi \varepsilon_f L(r_{1f}) \right) (1 + A_f) - 4\pi \gamma_f \times \right. \right.$$

$$\left. \times (kT r_{1f} - 4\varepsilon_f (r_{1f}^{-5} - r_{1f}^{-11})) \right) \frac{sha_f}{a_f} + \left(4\pi \gamma_f kT a_f r_{1f} - \frac{2\mu_0 m^2}{\sigma_f^3 r_{1f}^2} (1 + A_f) \right) \frac{cha_f}{a_f} \right] dr_{1f};$$

$$J_p = - \int_0^r G_p(r_p, r_{1p}, \omega) g_p L(r_{1p}) 4\varepsilon_p (8\pi - \gamma_p) dr_{1p};$$

$$J_s = \int_0^r G_s(r_s, r_{1s}, \omega) g_s \left[\left(\frac{4\pi}{3} D(r_{1s}) - 32\pi \varepsilon_s L(r_{1s}) \right) (1 + A_s) - \right.$$

$$\left. - 4\pi (y'(\rho_s^*) kT r_{1s} - 4\varepsilon_s \gamma_s (r_{1s}^{-5} - r_{1s}^{-11})) \right] dr_{1s};$$

$$J_{fp} = -32\pi \varepsilon_{fp} \int_0^r G_{fp}(r_{fp}, r_{1fp}, \omega) g_{fp} L(r_{1fp}) (2 + 2A_f + \gamma_{fp}) r_{1fp};$$

$$I_f = \int_0^r G_f(r_f, r_{1f}, \omega) g_f (1 + A_f) \left[\frac{6\mu_0 m^2}{\sigma_f^3 r_{1f}^2} \left(\frac{sha_f}{a_f^2} - \frac{cha_f}{a_f} \right) - 96\pi \varepsilon_f L(r_{1f}) \frac{sha_f}{a_f} \right] dr_{1f};$$

$$\begin{aligned}
I_p &= -96\pi\epsilon_p \int_0^r G_p(r_p, r_{1p}, \omega) g_p L(r_{1p}) dr_{1p}; \\
I_s &= \int_0^r G_s(r_s, r_{1s}, \omega) g_s (2 + A_s) (2\pi D(r_{1s}) - 48\pi\epsilon_s L(r_{1s})) dr_s; \\
I_{fp} &= -48\pi\epsilon_{fp} \int_0^r G_{fp}(r_{fp}, r_{1fp}, \omega) g_{fp} (2 + A_f) L(r_{1fp}) dr_{1fp}; \\
L(r) &= r^{-5} - 2r^{-11}; \quad D(r_s) = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0\sigma_s} (1 + \chi r_s) \exp[-\chi r_s]; \quad y'(\rho_s^*) = \frac{\rho_s^* (5 - 2\rho_s^*)}{(1 - \rho_s^*)(2 - \rho_s^*)}, \\
G_i(r_i, r_{1i}, \omega) &= \frac{\tau_{0i}}{2} \left(\frac{2}{\omega\tau_{0i}} \right)^{1/2} \left[(\sin \varphi_{1i} - \cos \varphi_{1i}) e^{-\varphi_{1i}} - (\sin \varphi_{2i} - \cos \varphi_{2i}) e^{-\varphi_{2i}} \right]; \\
\Phi_{(1,2)i}(r_i, r_{1i}, \omega) &= \left(\frac{\omega\tau_{0i}}{2} \right)^{1/2} (r_i \mp r_{1i}); \quad \tau_{1i} = \frac{m_i}{2\beta_i}; \quad \tau_{ofp} = \frac{\sigma_{fp}^2}{kT} \left(\frac{\beta_f \beta_p}{\beta_f + \beta_p} \right); \quad \tau_{0i} = \frac{\beta_i \sigma_i^2}{2kT}; \\
A_f &= \frac{\mu_0 m H \tau_{of}}{3\beta_f l^2}; \quad A_s = \frac{\sigma_s^3}{\beta_s} \frac{\pi \lambda \mu_0^2 H^2}{6}.
\end{aligned}$$

Выражения (6) и (7) являются динамическими выражениями для сдвиговой и объемной вязкости электропроводящих магнитных жидкостей, которые описывают их вязкостные свойства в широком интервале изменения частоты внешнего воздействия и термодинамических параметров системы. Согласно этим выражениям механизмы трансляционной релаксации с характерными временами τ_{1i} и структурной релаксации с временами τ_{0i} являются различными. В то же время релаксация объемной вязкости является только структурной, а релаксация сдвиговой вязкости является как трансляционной, так и структурной.

Следует отметить, что в выражениях (6) и (7) частотные зависимости коэффициентов вязкости в основном определяются поведением функций $G_{1i}(r_i, r_{1i}, \omega)$, которые являются фундаментальным решением уравнения Смолуховского для неравновесной бинарной плотности частиц электропроводящей магнитной жидкости.

Результаты и их обсуждение

Известно, что в неэлектропроводящих магнитных жидкостях для обеспечения устойчивости системы и предотвращения кластеризации феррочастиц их покрывают высокомолекулярными веществами, называемыми поверхностно-активными веществами [22]. Однако в электропроводящих магнитных жидкостях применение этого метода приводит к быстрому окислению магнитных частиц, нежелательному уменьшению предела текучести и слишком быстрому росту их вязкости. При получении магнитных жидкостей на основе жидких металлов основные трудности возникают при суспендировании магнитных частиц без появления оксидных слоев в несущей жидкой среде.

В работах [23] и [24] сообщается об успешном суспендировании магнитных частиц в ртути, чистого галлия, сплава галлия, индия и олова, эвтектического сплава галлия и индия и других жидких металлов с предотвращением окисления

магнитных частиц, в результате чего получаются устойчивые электропроводящие магнитные жидкости с хорошими физическими характеристиками.

Таким образом, основываясь на данных, приведенных в работах [23] и [24], численные расчеты проводим на примере электропроводящих магнитных жидкостей на основе ртути и эвтектического сплава галлия и индия с массовым соотно-

шением 77/23 (eGaIn) с железными магнитными частицами и металлическими добавками из олова и цинка.

На рисунке 1 представлены результаты численных расчетов зависимости коэффициента сдвиговой вязкости от напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях концентрации в электропроводящих магнитных жидкостях на основе ртути и эвтектического сплава eGaIn.

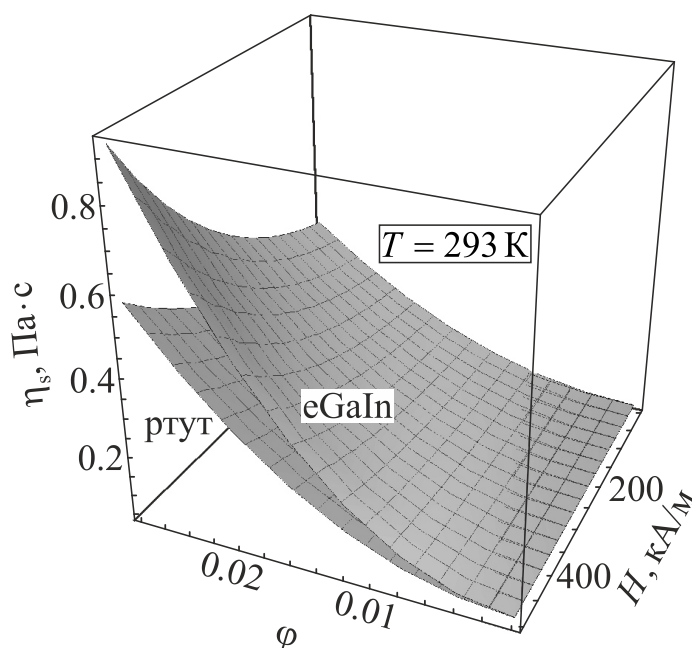


Рис. 1. Зависимости коэффициента сдвиговой вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях от напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях концентрации магнитных частиц

Fig. 1. Dependences of the shear viscosity coefficient in electrically conductive magnetic fluids on the strength of the external magnetic field and various concentrations of magnetic particles

Результаты теоретических расчетов показывают, что с возрастанием величины внешнего магнитного поля коэффициент сдвиговой вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях нелинейно возрастает. Рост объемной концентрации магнитных частиц под действием магнитного поля также приводит к нелинейному возрастанию коэффициента сдвиговой вязкости.

Нелинейное увеличение вязкости электропроводящих магнитных жидко-

стей с возрастанием напряженности магнитного поля и концентрации магнитных частиц аналогично их зависимости в других металлических и неметаллических магнитных жидкостях [25; 26].

На рисунке 2 изображены результаты расчетов по концентрационной зависимости коэффициента сдвиговой вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля.

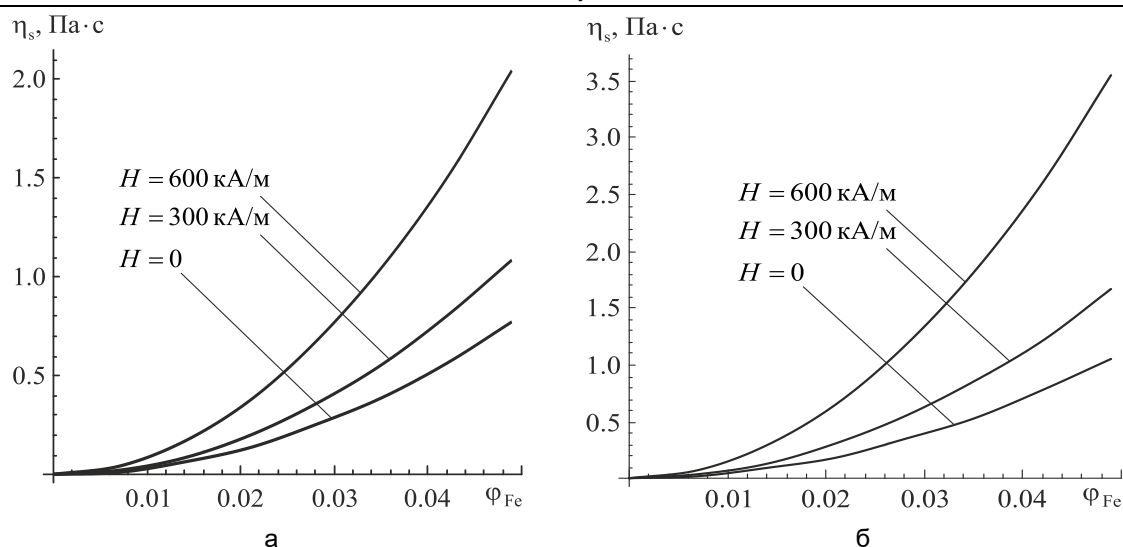


Рис. 2. Концентрационные зависимости коэффициента сдвиговой вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях на основе: а – ртути; б – эвтектического сплава eGaln при различных значениях магнитного поля

Fig. 2. Concentration dependences of the shear viscosity coefficient in electrically conductive magnetic fluids based on: а – mercury; б – eutectic alloy eGaln at different values of the magnetic field

Как видно из рисунков, в обеих электропроводящих магнитных жидкостях с увеличением объемной концентрации магнитных частиц сдвиговая вязкость сильно возрастает, как сообщалось в работах [8] и [24]. В присутствии магнитного поля наблюдается более сильное увеличение коэффициента сдвиговой вязкости.

На рисунке 3 представлены результаты численных расчетов коэффициента сдвиговой вязкости в зависимости от концентрации металлических добавок при фиксированных значениях концентрации магнитных частиц и напряженности магнитного поля в электропроводящих магнитных жидкостях.

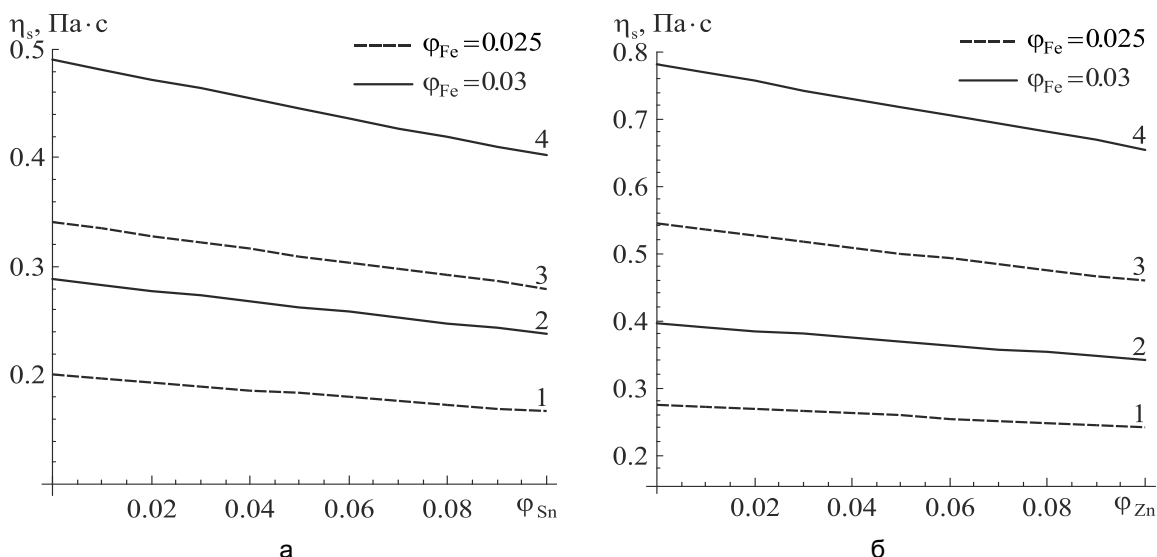


Рис. 3. Зависимости коэффициента сдвиговой вязкости от концентрации металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях на основе: а – ртути с добавкой олова; б – эвтектического сплава eGaln с добавкой цинка при: 1, 2 – $H = 0$; 3, 4 – $H = 400$ кА/м

Fig. 3. Dependence of the shear viscosity coefficient on the concentration of metal additives in electrically conductive magnetic fluids based on: а – mercury with the addition of tin; б – eutectic alloy eGaln with the addition of zinc at: 1, 2 – $H = 0$; 3, 4 – $H = 400$ кА/м

Показано, что применение металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях приводит к заметному снижению их вязкости. Однако в экспериментальных работах [8] и [9] наблюдалось более сильное уменьшение вязкости с возрастанием концентрации металлических добавок.

В работах [2] и [24] было исследовано влияние различных металлических добавок на магнитные свойства частиц железа и кобальта в ртути. Было установлено, что металлические добавки, прилипая к поверхности магнитных частиц, либо образуют покрытия, либо интерметаллическое соединение с их поверхностями. Металлические добавки, которые образуют с магнитными частицами интерметаллические соединения, ослабевая их магнитостатические взаимодействия,

тем самым существенно снижают вязкость магнитных жидкостей.

Поскольку в выражениях (6) и (7) потенциальная энергия взаимодействия между магнитными частицами и частицами стабилизатора выбраны в виде стандартного потенциала (6) – (12) Леннарда – Джонса, они качественно могут описать концентрационную зависимость коэффициентов вязкости тех электропроводящих магнитных жидкостей, в которых частицы стабилизатора, прилипая к магнитным частицам, не образуют интерметаллические соединения.

Результаты расчетов зависимости коэффициента объемной вязкости от напряженности магнитного поля в электропроводящих магнитных жидкостях на основе ртути и эвтектического сплава eGaIn при различных значениях концентрации железных частиц представлены на рисунке 4.

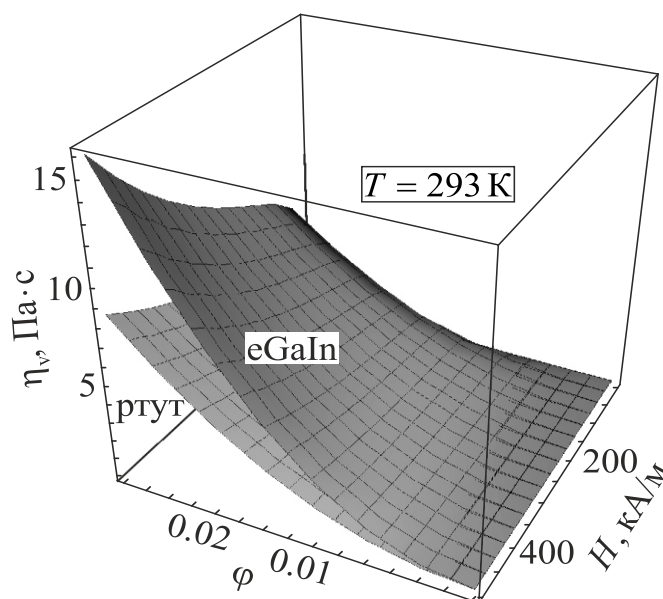


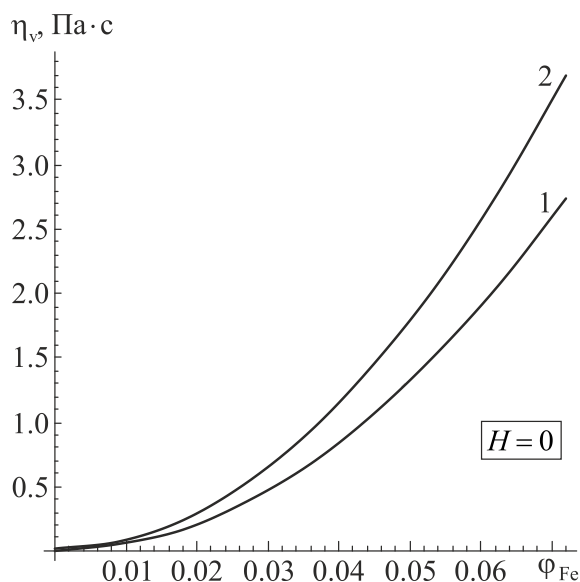
Рис. 4. Зависимости коэффициента объемной вязкости в электропроводящих магнитных жидкостях от напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях концентрации железных частиц

Fig. 4. Dependence of the coefficient of bulk viscosity in electrically conductive magnetic fluids on the strength of the external magnetic field at different concentrations of iron particles

Видно, что в электропроводящих магнитных жидкостях объемная вязкость, как и сдвиговая вязкость, с увеличением маг-

нитного поля нелинейно возрастает. Однако скорости возрастания коэффициента объемной вязкости намного больше, чем

коэффициента сдвиговой вязкости. Увеличение объемной концентрации магнитных частиц в электропроводящих магнитных жидкостях также приводит к возрастанию коэффициента объемной вязкости.



На рисунке 5 продемонстрированы результаты расчетов коэффициента объемной вязкости от концентраций частиц железа и металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях на основе ртути и эвтектического сплава eGaln.

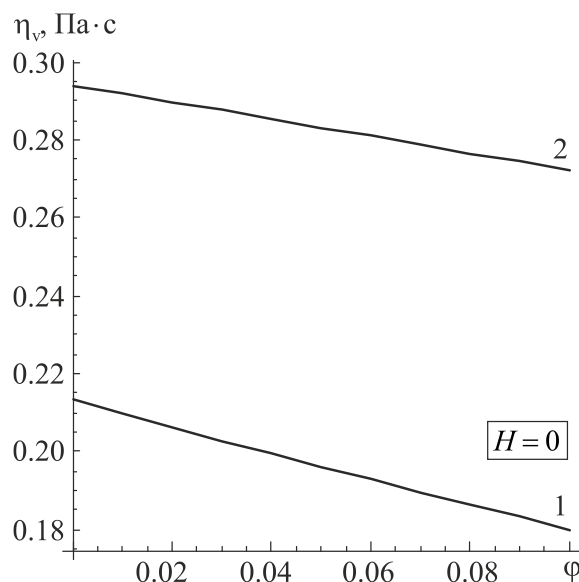


Рис. 5. Зависимость коэффициента объемной вязкости в магнитных жидкостях: а – от концентрации частиц железа; б – от концентрации металлических добавок олова и цинка при $\phi_{Fe} 0.02$. Кривые 1 соответствуют магнитной жидкости на основе ртути, кривые 2 – магнитной жидкости на основе eGaln

Fig. 5. Dependence of the coefficient of volumetric viscosity in magnetic fluids: а – on the concentration of iron particles; б – on the concentration of metal additives and zinc at $\phi_{Fe} 0.02$. Curves 1 correspond to magnetic fluid based on mercury, curves 2 to magnetic fluid based on eGaln

Коэффициент объемной вязкости, как и коэффициент сдвиговой вязкости, с ростом концентрации частиц железа в отсутствие металлических добавок увеличивается. В то же время металлические добавки приводят к уменьшению коэффициента объемной вязкости.

Выводы

Исследование вязкоупругих свойств электропроводящих магнитных жидкостей позволяет выявить характер коллективного движения их частиц, получить информацию о процессах переноса, происходящих в магнитных жидкостях, и оценить вклады различных релаксационных процессов, протекающих в них.

На основе анализа проведенных численных расчетов можно заключить, что теоретические выражения для коэффициентов сдвиговой и объемной вязкости удовлетворительно описывают вязкостные свойства электропроводящих магнитных жидкостей в широком интервале изменения термодинамических параметров состояния системы. Зависимости численных расчетов коэффициента сдвиговой вязкости от концентрации железных частиц и металлических добавок в электропроводящих магнитных жидкостях находятся в качественном согласии с экспериментальными результатами. К сожалению, из-за отсутствия данных не было возможности сравнивать результаты расчетов коэффициента объемной вязкости с другими литературными данными.

Список литературы

1. Luborsky F. E. The formation of elongated Iron and Iron-Cobalt particles by electrodeposition into mercury // *J. Electrochem. Soc.* 1961. Vol. 108, no. 12. P. 1138–1146. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2427972>
2. Luborsky F. E., Opie J. D. Adsorption of metals on iron particles in mercury // *Journal of Applied Physics*. 1963. Vol. 34, no. 4. P. 1317–1318. <https://doi.org/10.1063/1.1729488>
3. Shepherd P. G., Popplewell J., Charles S. W. A method of producing ferrofluid with Gadolinium particles // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1970. Vol. 3, no. 12. P. 1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/3/12/430>
4. Shepherd P. G., Popplewell J. Ferrofluids containing Ni-Fe alloy particles // *Philosophical Magazine*. 1971. Vol. 23, no. 181. P. 239–242. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437108216378>
5. Kagan I. Ya., Rykov V. G., Yantovskii E. I. Ferromagnetic electrically conducting liquids // *Magnetohydrodynamics*. 1970. Vol. 6, no. 3. P. 441–443. <http://doi.org/10.22364/mhd>
6. Charles S. W., Popplewell J. The magnetic properties of ferromagnetic liquids containing Iron particles in mercury // *IEE Transaction on Magnetism*. 1976. Vol. MAG–12, no. 6. P. 795–797. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059172>
7. Popplewell J., Charles S. W., Hoon S. R. Aggregate formation in metallic ferromagnetic liquids // *IEE Transaction on Magnetism*. 1980. Vol. MAG–16, no. 2. P. 191–196. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1980.1060585>
8. Dixon T. S., Charles S. W., Popplewell J. The effect of the addition of antimony on the physical and magnetic properties of Iron particles in mercury // *J. Phys. F: Metal Phys.* 1981. Vol. 11, no. 9. P. 1931–1941. <http://dx.doi.org/10.1088/0305-4608/11/9/022>
9. Федоненко А. И., Смирнов В. И. Взаимодействие частиц и агрегирование в электропроводных магнитных жидкостях // *Магнитная гидродинамика*. 1983. № 4. С. 49–52. <http://doi.org/10.22364/mhd>
10. Abu-Aljarayesh I., Abu-Libdeh A. Initial susceptibility of Iron in mercury magnetic fluids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991. Vol. 96. P. 89–96. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853\(91\)90614-G](http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853(91)90614-G)
11. Abu-Aljarayesh I., Bayrakdar A., Yusuf N.A., Abu-Safia H. Ac susceptibility of cobalt in mercury magnetic fluids // *Journal of Applied Physics*. 1993. Vol. 73, no. 10. P. 6970–6972. <http://dx.doi.org/10.1063/1.352400>
12. Dubois E., Chevalet J., Massart R. Magnetic conductive liquids: preparation and properties of Iron nanoparticles in mercury // *Journal of Molecular Liquids*. 1999. Vol. 83. P. 243–254. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7322\(99\)00089-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7322(99)00089-6)
13. Mercury-based Cobalt magnetic fluids and cobalt nanoparticles / R. Massart, B. Rasolonjatovo, S. Neveu, V. Cabuil // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol. 308, no. 1. P. 10–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.04.024>
14. Influence of microstructure on physico-mechanical properties of liquid-metal-based magnetic colloids / V. A. Alekseev, I. Yu. Veprik., S. G. Minukov, A. I. Fedonenko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1990. Vol. 85, no. 1-3. P. 133–136. <https://doi.org/10.1016/0304-8853%2890%2990036-P>
15. Sviklis B. B. Magnetic properties of highly conducting magnetic liquids // *Magnetohydrodynamics*. 1982. Vol. 18, no. 3. P. 241–244. <http://doi.org/10.22364/mhd>

16. Itami T., Saito J.-I., Ara K. The promising features of new nano liquid metals–liquid sodium containing titanium nanoparticles (LSnanop) // *Metals*. 2015. Vol. 5, no. 3. P. 1212–1240. <https://doi.org/10.3390/met5031212>
17. Saito J.-I., Itami T., Ara K. The preparation, physicochemical properties, and the cohesive energy of liquid sodium containing Titanium nanoparticles // *Journal of Nanoparticle Research*. 2012. Vol. 14. P. 1298(1–17). <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-012-1298-2>
18. Outgassing performance of an ionic liquid-based magnetic fluid / Okabe Takao, Kondob Yukishige, Yoshimotoc Shigeka, Sasakic Shinya // *Vacuum*. 2019. Vol. 164. P. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.047>
19. Mussel-inspired multifunctional integrated liquid metal-based magnetic suspensions with rheological, magnetic, electrical, and thermal reinforcement / Lu Yongyu, Che Zhanxun, Fangyuan Sun, Sen Chen, He Zhou, Pengju Zhang, Yang Yu, Lei Sheng, Jing Liu // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13, no. 4. P. 5256–5265. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.0c20485>
20. Liquid metal Ga-Sn alloy based ferrofluids with amorphous nano-sized Fe-Co-B magnetic particles / Yang Chuncheng, Liu Zhong, Yu Mengchun, Bian Xiufang // *Journal of Materials Science*. 2020. Vol. 55. P. 13303–13313. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-020-04908-9>
21. Комилов К., Зарифзода А. К. Релаксационные процессы и вязкоупругие свойства электропроводящих магнитных жидкостей // *Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук*. 2022. № 3. С. 195–212.
22. Лебедев А. В. Аномалии вязкости магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 4. С. 88–97. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-88-97>
23. Development of magnetic liquid metal suspensions for magnetohydrodynamics / F. Carle, K. Bai, J. Casara, K. Vanderlick, E. Brown // *Physical Review Fluids*. 2017. Vol. 2, no. 1. P. 013301(1–20). <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.013301>
24. Keeling L., Charles S.W., Popplewell J. The prevention of diffusional growth of cobalt particles in mercury // *Journal of Physics F: Metal Physics*. 1984. Vol. 14, no. 12. P. 3093–3100. <https://doi.org/10.1088/0305-4608/14/12/030>
25. Комилов К., Зарипов А. К. О частотной дисперсии коэффициентов вязкости и модулей упругости электропроводных магнитных жидкостей // *Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук*. 2018. № 3. С. 130–136.
26. Комилов К., Зарипов А. К., Убайди Абдул Маджид. Частотная дисперсия коэффициента сдвиговой вязкости и магнитовязкий эффект в магнитных жидкостях // *Журнал физической химии*. 2020. Т. 94, № 8. С. 1279–1284. <https://doi.org/10.31857/S0044453720080166>

References

1. Luborsky F.E. The formation of elongated Iron and Iron-Cobalt particles by electrodeposition into mercury. *J. Electrochem. Soc.* 1961;108(12):1138–1146. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2427972>
2. Luborsky F.E., Opie J.D. Adsorption of metals on Iron particles in mercury. *Journal of Applied Physics*. 1963;34(4):1317–1318. <https://doi.org/10.1063/1.1729488>

3. Shepherd P.G., Popplewell J., Charles S.W. A method of producing ferrofluid with gadolinium particles. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1970;3(12):1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/3/12/430>
4. Shepherd P.G., Popplewell J. Ferrofluids containing Ni-Fe alloy particles. *Philosophical Magazine*. 1971;23(181):239–242. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437108216378>
5. Kagan I.Ya., Rykov V.G., Yantovskii E.I. Ferromagnetic electrically conducting liquids. *Magnetohydrodynamics*. 1970;6(3):441–443. <http://doi.org/10.22364/mhd>
6. Charles S.W., Popplewell J. The magnetic properties of ferromagnetic liquids containing iron particles in mercury. *IEE Transaction on Magnetism*. 1976;MAG-12(6):795–797. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059172>
7. Popplewell J., Charles S.W., Hoon S.R. Aggregate formation in metallic ferromagnetic liquids. *IEE Transaction on Magnetism*. 1980;MAG-16(2):191–196. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1980.1060585>
8. Dixon T.S., Charles S.W., Popplewell J. The effect of the addition of antimony on the physical and magnetic properties of iron particles in mercury. *J. Phys. F: Metal Phys.* 1981;11(9):1931–1941. <http://dx.doi.org/10.1088/0305-4608/11/9/022>
9. Fedonenko A.I., Smirnov V.I. Particle interaction and aggregation in electrically conductive magnetic fluids. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetic hydrodynamics*. 1983;(4):49–52. (In Russ.) <http://doi.org/10.22364/mhd>
10. Abu-Aljarayesh I., Abu-Libdeh A. Initial susceptibility of Iron in mercury magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991;96:89–96. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853\(91\)90614-G](http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853(91)90614-G)
11. Abu-Aljarayesh I., Bayrakdar A., Yusuf N.A., Abu-Safia H. Ac susceptibility of Cobalt in mercury magnetic fluids. *Journal of Applied Physics*. 1993;73(10):6970–6972. <http://dx.doi.org/10.1063/1.352400>
12. Dubois E., Chevalet J., Massart R. Magnetic conductive liquids: preparation and properties of Iron nanoparticles in mercury. *Journal of Molecular Liquids*. 1999;83:243–254. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7322\(99\)00089-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7322(99)00089-6)
13. Massart R., Rasolonjatovo B., Neveu S., Cabuil V. Mercury-based cobalt magnetic fields and cobalt nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;308(1):10–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.04.024>
14. Alekseev V.A., Veprik I.Yu., Minukov S.G., Fedonenko A.I. Influence of microstructure on physico-mechanical properties of liquid-metal-based magnetic colloids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1990;85(1-3):133–136. <https://doi.org/10.1016/0304-8853%2890%2990036-P>
15. Sviklis B.B. Magnetic properties of highly conducting magnetic liquids. *Magnetohydrodynamics*. 1982;18(3):241–244. <http://doi.org/10.22364/mhd>
16. Itami T., Saito J.-I., Ara K. The promising features of new nano liquid metals—liquid sodium containing titanium nanoparticles (LSnanop). *Metals*. 2015;5(3):1212–1240. <https://doi.org/10.3390/met5031212>
17. Saito J.-I., Itami T., Ara K. The preparation, physicochemical properties, and the cohesive energy of liquid sodium containing Titanium nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*. 201;14:1298–17. <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-012-1298-2>
18. Okabe Takao, Kondob Yukishige, Yoshimotoc Shigeka, Sasakic Shinya. Outgassing performance of an ionic liquid-based magnetic fluid. *Vacuum*. 2019;164:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.047>
19. Lu Yongyu, Che Zhanxun, Fangyuan Sun, Sen Chen, Heye Zhou, Pengju Zhang, Yang Yu, Lei Sheng, Jing Liu. Mussel-inspired multifunctional integrated liquid metal-based magnetic

suspensions with rheological, magnetic, electrical, and thermal reinforcement. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(4):5256–5265. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.0c20485>

20. Yang Chuncheng, Liu Zhong, Yu Mengchun, Bian Xiufang. Liquid metal Ga-Sn alloy based ferrofluids with amorphous nano-sized Fe-Co-B magnetic particles. *Journal of Materials Science*. 2020;55:13303–13313. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-020-04908-9>

21. Komilov K., Zarifzoda A.K. Relaxation processes and viscoelastic properties of electrically conductive magnetic fluids. *Vestnik Tadzhijskogo nacionalnogo universiteta. Seriya estestvennyh nauk = Bulletin of the Tajik National University. Natural Sciences Series*. 2022;3:195–212. (In Russ.)

22. Lebedev A.V. Viscosity anomalies of magnetic fluid stabilized by a double layer of surfactant in water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(4):88–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-88-97>

23. Carle F., Bai K., Casara J., Vanderlick K., Brown E. Development of magnetic liquid metal suspensions for magnetohydrodynamics. *Physical Review Fluids*. 2017;2(1):013301-20. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.013301>

24. Keeling L., Charles S.W., Popplewell J. The prevention of diffusional growth of cobalt particles in mercury. *Journal of Physics F: Metal Physics*. 1984;14(12):3093–3100. <https://doi.org/10.1088/0305-4608/14/12/030>

25. Komilov K., Zaripov A.K. On the frequency dispersion of viscosity coefficients and elastic moduli of electrically conductive magnetic fluids. *Vestnik Tadzhijskogo nacionalnogo universiteta. Seriya estestvennyh nauk = Bulletin of the Tajik National University. Series of natural sciences*. 2018;3:130–136. (In Russ.)

26. Komilov K., Zaripov A.K., Ubaidi Abdul Majid. Frequency dispersion of the coefficient of shear viscosity and the magnetic viscous effect in magnetic liquids. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(8):1726–1731. <https://doi.org/10.1134/S0036024420080166>

Информация об авторах / Information about the Authors

Комилов Косим, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики, Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан
e-mail: k.komilov@mail.ru

Komilov Kosim, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Theoretical Physics, Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan,
e-mail: k.komilov@mail.ru

Зарифзода Афзалшох Кахрамон, доктор физико-математических наук, директор Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан,
e-mail: afzal.z@mail.ru

Afzalshoh Q. Zarifzoda, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Director of S.U. Umarov Physical-Technical Institute, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan,
e-mail: afzal.z@mail.ru