

## Оригинальная статья / Original article

УДК 538.951

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-88-97>

## Аномалии вязкости магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде

А. В. Лебедев <sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ул. Академика Королева, д. 1, г. Пермь 614018, Российская Федерация

✉ e-mail: lav@icmm.ru

### Резюме

**Цель.** Изучить температурную зависимость вязкости магнитной жидкости на водной основе.

**Метод** исследования состоит в измерении динамической вязкости магнитной жидкости на основе частиц феррита кобальта, стабилизированных в воде двойным слоем поверхностно активного вещества. В качестве стабилизатора использовалась лауриновая кислота (первый слой) и смесь лауриновой кислоты и додецилсульфата натрия (второй слой). Измерения выполнялись при помощи ротационного вискозиметра Brookfield DV-II+Pro, снабженного системой коаксиальных цилиндров. Измерительная система вискозиметра термостатировалась с помощью термостата КРИО-ВТ-12-1.

**Результаты.** Измерены температурные зависимости динамической вязкости у трех образцов магнитной жидкости на основе частиц феррита кобальта различных концентраций в диапазоне температур 0–90С°. Полученные температурные зависимости вязкости кардинально отличаются от температурных зависимостей, как предсказываемых известными теориями, так и экспериментально наблюдаемыми для магнитных жидкостей на основе керосина. Согласно известным теоретическим моделям отношение вязкости магнитной жидкости к вязкости базовой среды есть некая универсальная функция концентрации частиц. В разных моделях предлагается различный вид этой функции. Но из них однозначно следует, что отношение вязкостей не должно зависеть от температуры. Для магнитных жидкостей на основе керосина экспериментально установлено, что ее относительная вязкость убывает с ростом температуры. Однако согласно полученным результатам относительная вязкость магнитной жидкости на основе воды не убывает с ростом температуры, а существенно растет, то есть вязкость магнитной жидкости на основе воды с ростом температуры убывает медленнее, чем вязкость воды.

**Вывод.** Наблюдаемые зависимости полностью противоречат известным закономерностям, как теоретическим, так и экспериментально установленным для магнитных жидкостей на основе керосина. Полученные результаты могут оказаться полезными для дальнейшего развития теории водных коллоидных растворов со стабилизацией частиц двойным слоем поверхностно-активных веществ.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость; динамическая вязкость; двойной слой; вода.

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** 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>.

Поступила в редакцию 04.10.2023

Подписана в печать 20.11.2023

Опубликована 25.12.2023

# Viscosity Anomalies of Magnetic Fluid Stabilized by a Double Layer of Surfactant in Water

Aleksandr V. Lebedev <sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science

1 Akademika Koroleva Str., Perm 614018, Russian Federation

✉ e-mail: lav@icmm.ru

## Abstract

**Purpose** to study the temperature dependence of the viscosity of a water-based magnetic fluid.

**Method.** Consists of measuring the dynamic viscosity of a magnetic fluid based on cobalt ferrite particles stabilized in water by a double layer of surfactant. Lauric acid (first layer) and a mixture of lauric acid and sodium dodecyl sulfate (second layer) were used as a stabilizer. Measurements were performed using a Brookfield DV-II+Pro rotational viscometer equipped with a coaxial cylinder system. The measuring system of the viscometer was thermostated using a KRIO-VT-12-1 thermostat.

**Results.** The temperature dependences of dynamic viscosity were measured for three samples of magnetic fluid based on cobalt ferrite particles of various concentrations in the temperature range 0–90°C. The obtained temperature dependences of viscosity are radically different from the temperature dependences both predicted by known theories and experimentally observed for kerosene-based magnetic fluids. According to well-known theoretical models, the ratio of the viscosity of the magnetic fluid to the viscosity of the base medium is a certain universal function of particle concentration. Different models offer different types of this feature. But it clearly follows from them that the viscosity ratio should not depend on temperature. For magnetic fluids based on kerosene, it has been experimentally established that its relative viscosity decreases with increasing temperature. However, according to the results obtained, the relative viscosity of a water-based magnetic fluid does not decrease with increasing temperature, but increases significantly. That is, the viscosity of a water-based magnetic fluid decreases more slowly with increasing temperature than the viscosity of water.

**Conclusion.** The observed dependencies completely contradict the known patterns, both theoretical and experimentally established for kerosene-based magnetic fluids. The results obtained may be useful for the further development of the theory of aqueous colloidal solutions with particle stabilization by a double layer of surfactants.

**Keywords:** magnetic fluid; dynamic viscosity; double surfactant layer; water.

**For citation:** 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>

Received 04.10.2023

Accepted 20.11.2023

Published 25.12.2023

\*\*\*

## Введение

Обычно на уроках физики в средней школе, говоря о свойствах простых жидкостей, упоминают, что, в отличие от твердых тел, они не обладают выраженными магнитными свойствами. Это незыблемое, казалось бы, утверждение было опровергнуто в 60-х годах двадцатого века. Существование физических объектов, сочетающих в себе сильный магнетизм ферромагнетиков и подвижность классических жидкостей, оказалось

возможным. Задача соединения несоединимого была решена путем диспергирования частиц нанометрового размера в «классической» жидкости. Возникшая при этом проблема устойчивости вновь созданной среды была решена путем покрытия частиц слоем поверхностно-активного вещества, стабилизирующего частицы в жидкости. Синтезированные таким образом магнитные среды получили название «магнитные жидкости» [1]. С этого времени и начинается жизнь магнитных жидкостей, которые оказались пер-

спективным объектом для научных и прикладных исследований. Возник новый раздел науки на стыке физики магнитных явлений и гидродинамики под названием феррогидродинамика [2].

Основной параметр магнитной жидкости, как и любой жидкости, это ее вязкость. Знание вязкости жидкости в зависимости от ее температуры и концентрации необходимо при интерпретации экспериментальных результатов и разработке технических устройств. Предлагаемая работа посвящена исследованию температурной зависимости вязкости коллоидных растворов феррита кобальта, стабилизированных в воде двойным слоем поверхностно-активного вещества.

### Материалы и методы

Начало исследований кобальт-ферритовых магнитных жидкостей было начато нами в работах [3; 4]. В работе [3] было исследовано влияние подмагничивающего поля на динамическую восприимчивость магнитотвердых частиц феррита кобальта. В [4] исследовалось влияние вязкости на динамическую восприимчивость жидкости. Обе серии измерений были выполнены при комнатной температуре. Вполне естественно возникает вопрос о влиянии температуры на динамическую восприимчивость магнитной жидкости на основе частиц феррита кобальта в воде. Основным параметром жидкости, сильно зависящим от температуры и влияющим на динамическую восприимчивость, является ее вязкость. Поэтому логично начать температурные исследования с реологических измерений.

### Получение жидкости на основе частиц феррита кобальта

Синтез коллоидных частиц феррита кобальта имеет свои особенности и не может быть выполнен по стандартной технологии химического соосаждения, хорошо отработанной для частиц магнетита [5–7].

В принципе уравнение химической реакции, предложенное в [5], формально допускает замену двухвалентного атома железа на другой двухвалентный атом (на тот же кобальт). Но реакция образования частиц феррита кобальта протекает гораздо медленнее и синтезированные частицы не диспергируются в водный коллоидный раствор.

Проблема синтеза ферритов двухвалентных металлов, образующих коллоидные растворы, недавно была разрешена в Институте технической химии УрО РАН [8]. Новый способ позволяет получать мелкодисперсные порошки ферритов целой серии двухвалентных металлов. В отличие от [5–7] в реакции изначально используются двухвалентные соли металла и железа. Обычно используются сульфат кобальта  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и сульфат железа  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Осаждение, как и в [5], выполняется щелочью  $\text{NaOH}$ , но уже в присутствии окислителя – сульфата гидроксиламина  $(\text{NH}_2\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ . К выпавшему бурому осадку добавляют еще щелочи и кипятят до почернения осадка. Полученный таким образом осадок затем отделяют, промывают и сушат при температуре  $100^\circ\text{C}$ . В результате получается порошок с размером частиц, пригодным для приготовления магнитной жидкости.

Получение магнитной жидкости на основе синтезированного порошка феррита кобальта также имеет свои отличия от стандартного процесса [6; 7]. Получение двойного слоя ПАВ на поверхности частиц требует вдвое большего количества сарфактанта по сравнению со стандартной однослойной стабилизацией [7]. Процесс проводят в две стадии. Первая порция ПАВа из расчета 0,35 моля на 1 моль феррита вводится в водную взвесь частиц, получающуюся после промывки черного осадка. Обычно первый слой ПАВа формируется из молекул лауриновой кислоты. Для улучшения условий про-

текания реакции в воду вводится небольшое количество аммиака (нашатырного спирта). Частицы, взвешенные в воде, покрываются слоем молекул лауриновой кислоты, слипаются и выпадают на дно в виде густой черной пасты. Затем вносится вторая порция ПАВа, состоящая из смеси лауриновой кислоты и додецилсульфата натрия примерно в равных молярных долях в количестве около 0,25 моля на моль феррита. Черная паста из частиц, покрытых лауриновой кислотой, постепенно растворяется, образуя коллоидный раствор. Заключительная операция состоит в удалении из раствора избытка лауриновой кислоты. Поскольку лауриновая кислота не растворяется в воде, ее избыток остается в виде кристаллов в форме тонких пластинок. Обычно очистка производится фильтрованием сильно разбавленной жидкости с последующим упариванием избытка воды.

#### Образцы жидкостей, использованные в экспериментах

В опытах измерялась вязкость трех образцов магнитных жидкостей на основе частиц феррита кобальта, стабилизированных в воде двойным слоем ПАВ. Аналогичные образцы использовались в [4] при исследовании влияния вязкости жидкости на ее динамическую восприимчивость. Первый образец представляет собой исходную жидкость небольшой концентрации. Второй образец был получен из первого путем добавления небольшого количества поливинилового спирта (порядка 1,5%) для повышения вязкости. Количество спирта выбиралось из условия близости вязкости исходной жидкости при комнатной температуре к вязкости жидкости с добавкой спирта при повышенной температуре (около 70С°). Третий образец был получен разбавлением образца 2 примерно в два раза. В таблице 1 представлены основные параметры образцов: статическая начальная восприимчивость  $\chi_0$  при комнатной температуре, объемная доля частиц  $\phi$  и динамическая вязкость  $\eta$ .

Таблица 1. Основные параметры образцов магнитной жидкости

Table 1. The main parameters of magnetic fluid samples

Образец / sample	$\chi_0$	$\phi$	$\eta$ , сПз
1	0,985	0,127	3,55
2	1,07	0,135	14,9
3	0,656	0,090	5,28

Измерение начальной восприимчивости образцов магнитной жидкости производилось с помощью моста взаимной индукции [9]. В отличие от [9] в настоящей работе для регистрации выходных сигналов моста использовался синхронный усилитель ElockIn 203 Anfates. Наличие двух входных каналов позволяет одновременно регистрировать разностный и опорный сигналы моста, что существенно упрощает и ускоряет процесс измерений. Измерения проводились на частоте 10 Гц. На

этой частоте перемагничивание образцов происходило практически равновесным образом. Мнимая часть динамической восприимчивости была на два порядка меньше действительной. Погрешность измерений восприимчивости не превышала 0,001 по модулю и 0,1 градуса по фазе.

Объемная доля диспергированных частиц феррита кобальта рассчитывалась исходя из результатов измерения восприимчивости образцов и гранулометрического анализа исходной концентрированной

жидкости. Гранулометрический анализ исходной жидкости был выполнен в [4] согласно методике [10]. Суть его состоит в сопоставлении реальной кривой намагничивания жидкости с модельной кривой, построенной по заданному распределению частиц по размерам [11; 12]. Параметры распределения определяют из условия наилучшего совпадения экспериментальной и модельной кривых намагничивания. Естественно, в расчетах необходимо учитывать наличие немагнитного слоя на поверхности частиц толщиной порядка одного периода решетки и межчастичные диполь-дипольные взаимодействия [13–15].

Как было показано в [10], наиболее подходящей функцией, описывающей распределение частиц по размерам, является Г-распределение:

$$f(x) = \frac{x^\alpha \exp(x/x_0)}{x_0^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)},$$

где  $x_0$  и  $\alpha$  – параметры, определяющие ширину и положение максимума функции. Они находятся по известным среднему магнитному моменту частиц и среднему квадрату магнитного момента. Последние определяются из анализа кривой намагничивания. Процедура анализа подробно описана в [16]. В нашем случае параметры функции распределения составили  $x_0 = 2,02$  нм и  $\alpha = 2,51$ .

Использование аналитической двухпараметрической функции распределения позволяет рассчитать объемную долю частиц  $\varphi$  по известной концентрации магнитной фазы  $\varphi_m$  с учетом немагнитного слоя на поверхности частиц толщиной  $\delta$  и стабилизирующих оболочек ПАВа толщиной  $l$  [17]:

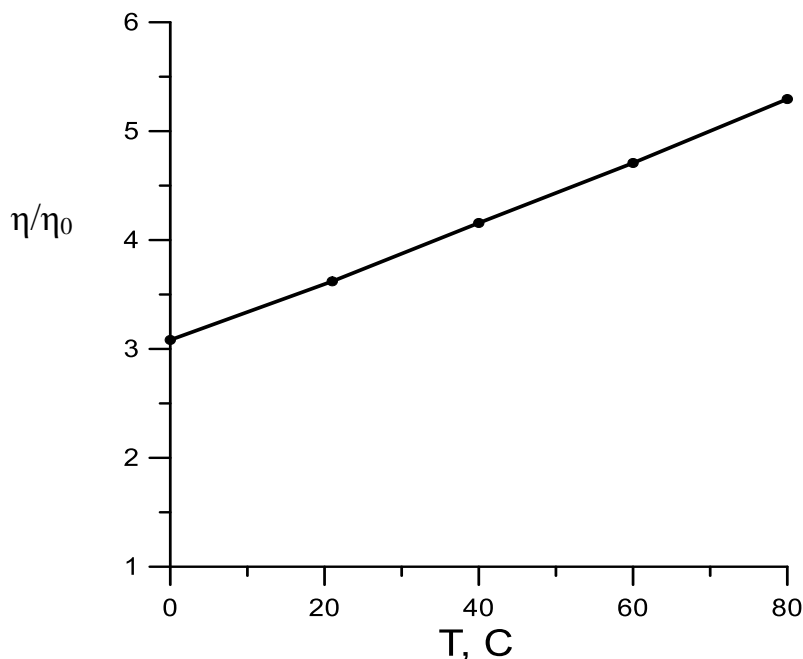
$$\frac{\varphi}{\varphi_m} = 1 + \frac{6(\delta+l)}{x_0(\alpha+2)} + \frac{4(\delta+l)^2}{x_0^2(\alpha+2)(\alpha+3)} \left( 3 + \frac{2(\delta+l)}{x_0(\alpha+1)} \right).$$

В расчетах принимались следующие значения:  $\delta = 0,8$  нм,  $l = 3,0$  нм. Предполагалось, что толщина слоя ПАВ равно удвоенной длине молекулы лауриновой кислоты 1,5 нм. С учетом ранее определенных параметров функции распределения можно найти отношение объемных долей частиц и магнитной фазы  $\varphi/\varphi_m = 5,41$ . Такое большое его значение объясняется значительной толщиной защитных оболочек, сравнимой с размерами частиц. Для образца жидкости, для которого в [4] был выполнен гранулометрический анализ,  $\varphi = 0,266$ . Объемная доля частиц для образцов 1–3 в настоящей работе находилась из пропорции восприимчивости ланжевена (восприимчивость в отсутствие взаимодействия между частицами) и  $\varphi$ .

## Результаты и их обсуждение

Измерения динамической вязкости образцов магнитной жидкости производились с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV-II+Pro. Измерительная система вискозиметра термостатировалась с помощью термостата Крио-ВТ-12-1. Измерения производились при нескольких значениях сдвиговой скорости в диапазоне 10–100 с<sup>-1</sup>. Все образцы проявляли свойства ньютоновских жидкостей – их вязкость не зависела от сдвиговой скорости.

На рисунке 1 представлены результаты измерения динамической вязкости образца 1 кобальт-ферритовой жидкости. Из рисунка хорошо видно, что с ростом температуры вязкость магнитной жидкости по отношению к вязкости базовой среды (воды) увеличивается. Полученная зависимость полностью противоречит существующим реологическим моделям [18–20]. Согласно им отношение вязкости коллоидного раствора к вязкости базовой среды есть универсальная функция объемной концентрации частиц и не должна зависеть от температуры.



**Рис. 1.** Температурная зависимость отношения динамической вязкости образца 1 к вязкости воды

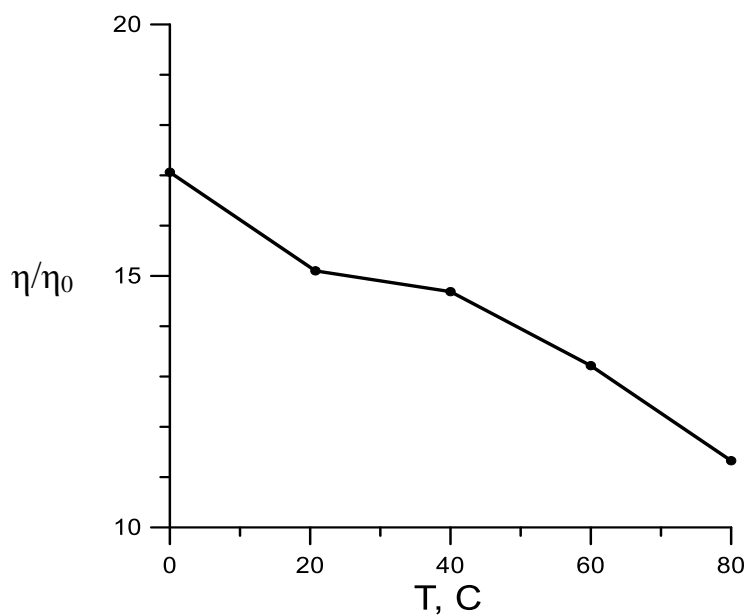
**Fig. 1.** Temperature dependence of the ratio of the dynamic viscosity of sample 1 to the viscosity of water

Для «классических» магнитных жидкостей на основе частиц магнетита, стабилизированных слоем молекул олеиновой кислоты в керосине, указанная закономерность выполняется, но только для жидкостей небольшой концентрации (порядка 10–20 объемных процентов). Для более концентрированных жидкостей отношение вязкостей уже не является константой, а убывает с температурой [21]. При высоких концентрациях жидкости относительная вязкость уменьшается в 100 раз и более. Наблюдаемый эффект объясняется уменьшением эффективной толщины стабилизирующих оболочек с ростом температуры.

Таким образом, приведенная на рисунке 1 температурная зависимость отношения вязкости образца 1 к вязкости воды даже качественно не согласуется ни с известными теоретическими моделями, ни с экспериментальными результатами для других жидкостей.

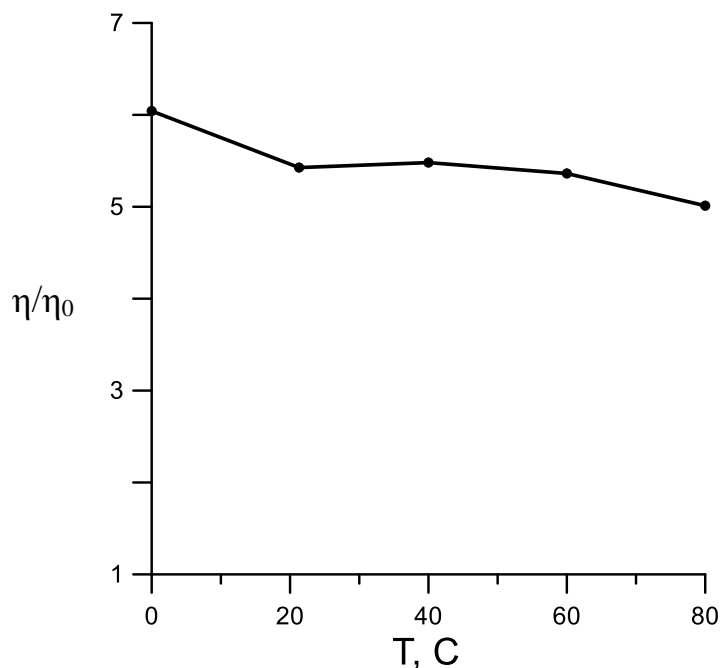
На рисунке 2 приведены результаты измерения вязкости жидкости с добавкой небольшой доли поливинилового спирта. В работе [4] такой образец использовался для исследования влияния вязкости на динамическую восприимчивость при постоянной температуре. Из рисунка хорошо видно, что полимерная добавка, увеличивая вязкость жидкости, качественно полностью видоизменяет температурную зависимость вязкости. С ростом температуры вязкость жидкости убывает уже быстрее, чем вязкость воды. Соответственно, относительная вязкость магнитной жидкости с добавкой поливинилового спирта убывает с ростом температуры.

В принципе возможна ситуация, когда влияние двухслойной стабилизации и полимерной добавки компенсируют друг друга. Это можно наблюдать на образце 3, полученном разбавлением образца 2.



**Рис. 2.** Температурная зависимость отношения динамической вязкости образца 2 к вязкости воды

**Fig. 2.** Temperature dependence of the ratio of the dynamic viscosity of sample No. 2 to the viscosity of water



**Рис. 3.** Температурная зависимость отношения динамической вязкости образца 3 к вязкости воды

**Fig. 3.** Temperature dependence of the ratio of the dynamic viscosity of sample 3 to the viscosity of water

Представленная на рисунке 3 температурная зависимость относительной вязкости образца 3 уже слабо зависит от температуры, как это и должно быть согласно известным теоретическим моде-

лям. Правда, чтобы достигнуть этого согласия, жидкость пришлось загустить добавкой поливинилового спирта, а затем добавить воды.

## Заключение

Выполнены измерения температурной зависимости динамической вязкости у трех образцов магнитной жидкости на основе частиц феррита кобальта, стабилизированных в воде двойным слоем ПАВ.

Обнаружено, что относительная вязкость исходного образца жидкости не является постоянной, а увеличивается почти в два раза в диапазоне температур 0–80С°. Относительная вязкость образца с добав-

лением 1,5%-ного поливинилового спирта уже уменьшается в полтора раза в исследованном температурном диапазоне. После разбавления второго образца в два раза водой его относительная вязкость практически перестала зависеть от температуры.

Полученные результаты полностью противоречат имеющимся реологическим моделям и должны стимулировать построение новых.

## Список литературы

1. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т. 112, вып. 3. С. 427–458.
2. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / пер. с англ. В. В. Кирюшина; под ред. В. В. Гогосова. М.: Мир, 1989. 357 с.
3. Лебедев А. В. Различие между броуновским и неелевским механизмами релаксации в подмагничивающем поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 4. С. 14–20. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-4-14-20>.
4. Лебедев А. В. Изменение динамической восприимчивости магнитной жидкости с магнитотвердыми частицами при росте вязкости базовой среды // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 140–151. <https://doi.org/10.17072/2223-1528-2022-12-4-140-151>.
5. Elmore W.C. On preparation of the magnetite high dispersed // Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 309–310.
6. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation / N. M. Gribov, E. E. Bibik, O. V. Buzunov, V. N. Naumov // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1990. Vol. 85. P. 7–10.
7. А. с. 457666 СССР, МПК C01G 49108. Способ получения феррожидкости / Бибики Е. Е., Лавров И. С. № 1801123; заявл. 22.06.1972; опубл. 25.01.1975. 2 с.
8. Патент 2725231 Российская Федерация, МПК C30B 29/26, C01G 49102. Способ получения частиц ферритов / Лысенко С. Н., Якушева Д. Э., Астафьева С. А. № 2019126993; заявл. 27.08.2020; опубл. 30.06.2020. 10 с.
9. Пшеничников А. Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 88–93.
10. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1996. Vol. 161. P. 94–102.
11. Bean C. P., Jacobs I. S. Magnetic granulometry and super-magnetism // Journal Applied. Physics. 1956. Vol. 27. P. 1448–1452.
12. Chantrell R. W., Popplewell J., Charles S. R. Measurements of particle size distribution parameters in ferrofluids // IEEE Transactions on Magnetics. 1978. Vol. 14, is. 5. P. 975–977.
13. Kaiser R., Miskolczy G. Magnetic properties of stable dispersions of subdomain magnetite particles // Journal Applied Physics. 1970. Vol. 41(3). P. 1064–1072.
14. Магнитостатические свойства коллоидов магнетита / Е. Е. Бибики, Б. Я. Матыгуллин, Ю. Л. Райхер, М. И. Шлиомис // Магнитная гидродинамика. 1973. Т. 9, № 1. С. 68–72.
15. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 041405.

16. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях / А. Ф. Пшеничников, А. В. Лебедев, А. В. Радионов, Д. В. Ефремов // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77, № 2. С. 207.
17. Пшеничников А. Ф., Гилев В. Г. Реология и намагниченность концентрированных магнетитовых коллоидов // Коллоидный журнал. 1997. Т. 59, № 3. С. 372–379.
18. Vand V. Viscosity of solution and suspensions // J. Phys. Colloid Chem. 1948. Vol. 52, no. 2. P. 277–299.
19. Chow T. S. Viscoelasticity of concentrated dispersions // Phys. Rev. E. 1994. Vol. 50. P. 1274.
20. Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheological Properties of Concentration Suspensions // J. Appl. Polym. Sci. 1971. Vol. 15. P. 2007–2021.
21. Лебедев А. В. Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71, № 1. С. 78–83.

## References

1. Shliomis M. I. Magnetic fluids. *Physics-Uspekhi*, 1974, vol. 17, pp. 153–169.
2. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985. 344 p.
3. Lebedev A. V. Razlichie mezhdu brounovskim i neelevskim mekhanizmami relaksatsii v podmagnichivayushchem pole [Difference between Brownian and Néel relaxation mechanisms in a magnetizing field]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika = Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 4, pp. 14–20. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-14-21-20>
4. Lebedev A. V. Izmenenie dinamicheskoi vospriimchivosti magnitnoi zhidkosti s magnitotverdymi chastitsami pri roste vyazkosti bazovoi sredy [Change in the dynamic susceptibility of a magnetic fluid with hard magnetic particles with an increase in the viscosity of the base medium]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 140–151. <https://doi.org/10.17072/2223-1528-2022-12-4-140-151>
5. Elmore W. C. On preparation of the magnetite high dispersed. *Phys. Rev.*, 1938, vol. 54, pp. 309–310.
6. Griбанov N. M., Bibik E. E., Buzunov O. V., Naumov V. N. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation. *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 1990, vol. 85, pp. 7–10.
7. Bibik E. E., Lavrov I. S. Sposob polucheniya ferrozhidkosti [Method of obtaining ferrofluid]. Patent SSSR, no. 457666, 1975.
8. Lysenko S. N., Yakusheva D. E., Astafyeva S. A. Sposob polucheniya chastits ferritov [Method for producing ferrite particles]. Patent RF, no. 2725231, 2020.
9. Pshenichnikov A. F. A mutual-inductance bridge for analysis of magnetic fluids. *Instruments and Experimental Techniques*, 2007, vol. 50, no. 4, pp. 509–514. <http://dx.doi.org/10.1134/S0020441207040136>
10. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analizis of concentrated ferrocolloids. *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 161, pp. 94–102.
11. Bean C. P., Jacobs I. S. Magnetic granulometry and super-magnetism. *Journal Applied Physics*. 1956, vol. 27, pp. 1448–1452.
12. Chantrell R. W., Popplewell J., Charles S. R. Measurements of particle size distribution parameters in ferrofluids. *IEEE Trans. on Magnetism*, 1978, vol. 14, is. 5, pp. 975–977.
13. Kaiser R., Miskolczy G. Magnetic properties of stable dispersions of subdomain magnetite particles. *Journal Applied Physics*, 1970, vol. 41(3), pp. 1064–1072.
14. Bibik E. E., Matygullin B. Ya., Raykher Yu. L., Shliomis M. I. Magnetostatic properties of magnetite colloids. *Magnetohydrodynamics*, 1973, vol. 9, no. 1, pp. 58–62.
15. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations. *Phys. Rev. E.*, 2001, vol. 64, pp. 041405.

16. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V., Radionov A. V., Efremov D. V. A Magnetic fluid for operation in strong gradient fields. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 2, pp. 196–201.
17. Pshenichnikov A. F., Gilev V. G. Rheology and magnetization of concentrated magnetite colloids. *Colloid Journal*, 1997, vol. 59, no. 3, pp. 372–379.
18. Vand V. Viscosity of solution and suspensions. *J. Phys. Colloid Chem.*, 1948, vol. 52, no. 2, pp. 277–299.
19. Chow T. S. Viscoelasticity of concentrated dispersions. *Phys. Rev. E*, 1994, vol. 50, pp. 1274.
20. Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheological properties of concentration suspensions. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1971, vol. 15, pp. 2007–2021.
21. Lebedev A. V. Viscosity of concentrated colloidal solutions of magnetite. *Colloid Journal*, 2009, vol. 71, no 1, pp. 82–87.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Лебедев Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики дисперсных систем, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: lav@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-3989-7893

**Aleksandr V. Lebedev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher at the Laboratory of Disperse Systems Dynamics, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation, e-mail: lav@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-3989-7893