

Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 3 / 2025, Vol. 8, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.77.052.2.

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-3-2

Коллоидная защита гидрозоля магнетита полисахаридами

¹ Ерасов В.С. *,

¹ Чжу Ц.,

¹ Шапошников П.А.,

¹ Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова,
МИРЭА – Российский технологический университет,

* Ответственный автор E-mail: Vadim.ersv@yandex.ru

Аннотация: данная статья посвящена исследованию стабилизации водных дисперсий магнитных наночастиц Fe_3O_4 с использованием полисахаридных стабилизаторов. Изучено влияние электролитов – коагулянтов и полисахаридов-стабилизаторов на устойчивость гидрозолей магнетита и их устойчивость при физиологическом pH с добавками полисахаридов и без них. Полученные результаты демонстрируют эффективность неионогенных полисахаридов, таких как гидроксипропилметилцеллюлоза и гидроксипропилцеллюлоза в стабилизации магнитных наночастиц от коагуляции электролитов и во времени, что важно для их применения в медицине.

Цели. Получение и исследование гидрозолей магнетита и исследование их стабилизации полисахаридами во времени и при добавлении неиндифферентного и индифферентного электролитов.

Методы. Исследование коагуляции гидрозолей проводилась фотометрически. Размер наночастиц гидрозолей определялся методом динамического светорассеяния.

Результаты. Неионогенные полисахариды, такие как гидроксипропилметилцеллюлоза и гидроксипропилцеллюлоза, перспективны для стабилизации водных дисперсий (гидрозолей) магнитных наночастиц Fe_3O_4 .

Выводы. Порог коагуляции гидрозоля магнетита неиндифферентным электролитом – гидроксидом натрия 20,5 раз ниже порога коагуляции гидрозоля магнетита индифферентным электролитом – хлоридом натрия. Наибольшую защиту гидрозоля магнетита от коагуляции хлоридом натрия проявляют гидроксипропилметилцеллюлоза и гидроксипропилцеллюлоза. Наибольшую защиту гидрозоля магнетита от коагуляции гидроксидом натрия проявляет гидроксипропилметилцеллюлоза. Наибольшую устойчивость во времени золей при pH 7,4 (pH крови), создаваемым добавлением фосфатно-солевой буферной смеси, проявляют золи с добавками также гидроксипропилметилцеллюлозы.

Ключевые слова: коллоидная химия, наночастицы, нанотехнология, золи, дисперсные системы, полимеры, углеводы, полисахариды, магнетит, магнитные наночастицы, оксиды железа, коагуляция

Для цитирования: Ерасов В.С., Чжу Ц., Шапошников П.А. Коллоидная защита гидрозоля магнетита полисахаридами // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 3. 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-3-2

Поступила в редакцию: 5 июня 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 10 августа 2025 г.; Принята к публикации: 14 сентября 2025 г.

Colloidal protection of magnetite hydrosols with polysaccharides

¹ Erasov V.S.,

¹ Zhu Ts.,

¹ Shaposhnikov P.A.,

¹ Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies,

MIREA – Russian Technological University,

* Corresponding author E-mail: Vadim.ersv@yandex.ru

Abstract: this article investigates the stabilization of aqueous dispersions of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles using polysaccharide stabilizers. The effect of electrolyte coagulants and polysaccharide stabilizers on the stability of magnetite hydrosols and their stability at physiological pH with and without the addition of polysaccharides is studied. The results demonstrate the effectiveness of nonionic polysaccharides, such as hydroxypropyl methylcellulose and hydroxyethylcellulose, in stabilizing magnetic nanoparticles from electrolyte coagulation and over time, which is important for their application in medicine.

Objectives. To obtain and characterize magnetite hydrosols and to study their stabilization with polysaccharides over time and with the addition of non-indifferent and indifferent electrolytes.

Methods. Hydrosol coagulation was studied photometrically. The size of hydrosol nanoparticles was determined using dynamic light scattering.

Results. Nonionic polysaccharides, such as hydroxyethyl cellulose and hydroxypropyl methylcellulose, are promising for stabilizing aqueous dispersions (hydrosols) of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles.

Conclusions. The coagulation threshold of magnetite hydrosol with a non-differentiated electrolyte, sodium hydroxide, is 20,5 times lower than the coagulation threshold of magnetite hydrosol with an indifferent electrolyte, sodium chloride. Hydroxyethyl cellulose and hydroxypropyl methylcellulose exhibited the greatest protection of magnetite hydrosol from coagulation with sodium chloride. Hydroxypropyl methylcellulose exhibited the greatest protection of magnetite hydrosol from coagulation with sodium hydroxide. Sols containing hydroxypropyl methylcellulose exhibit the greatest stability over time at pH 7.4 (the pH of blood), created by the addition of a phosphate-buffered saline mixture.

Keywords: colloidal chemistry, nanoparticles, nanotechnology, sols, dispersed systems, polymers, carbohydrates, polysaccharides, magnetite, magnetic nanoparticles, iron oxides, coagulation

For citation: Erasov V.S., Zhu Ts., Shaposhnikov P.A. Colloidal protection of magnetite hydrosols with polysaccharides. Chemical Bulletin. 2025. 8 (3). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-3-2

The article was submitted: June 5, 2025; Approved after reviewing: August 10, 2025; Accepted for publication: September 14, 2025.

Введение

Использование магнитных наночастиц в медицинских целях является перспективным междисциплинарным направлением, обладающим большим потенциалом как в терапии, так и в диагностике. Особенностью магнитных наночастиц является возможность манипулировать ими посредством внешних магнитных полей. Это обусловлено тем, что они обладают специфическими магнитными свойствами: суперпарамагнетизмом, высокой коэрцитивной силой, низкой температурой Кюри и высокой магнитной восприимчивостью.

Магнитные наночастицы в форме суперпарамагнитных наночастиц оксида железа перспективны в качестве контрастных агентов МРТ. Использование магнитных наночастиц в биодиагностике включают контроль тока крови, опухолевых и тканеспецифичных контрастных агентов, тканей и

клеточных конкретных контрастных агентов для МРТ, контроль движения клеток и биомолекулярные исследования. По сравнению с парамагнитными ионами, супермагнитные наночастицы имеют более высокую молярную релаксацию, и при использовании в качестве частиц для контроля потока крови и тканеспецифичных агентов они могут обеспечить преимущества при более низких концентрациях [1-10].

Наиболее распространенными магнитными наночастицами являются наночастицы смешанного оксида железа (II) и железа (III) – магнетита Fe₃O₄, а также его окисленной формы γ-модификации оксида железа (III) – маггемита γ-Fe₂O₃. Это обусловлено их невысокой стоимостью, простотой получения, низкой цитотоксичностью, биосовместимостью и биоразлагаемостью.

Магнетит Fe_3O_4 является ферромагнетиком, а в наноразмерном состоянии его частицы приобретают суперпарамагнитные свойства. Маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ обладает ферримагнитными свойствами и имеет структуру, близкую к структуре магнетита. Магнетит и маггемит перспективны в плане их биосовместимости. Для ее повышения, а также снижения токсичности и иммуногенности магнитные наночастицы можно инкапсулировать в полимерную оболочку. Использование магнитных наночастиц для доставки лекарств должно решать такие вопросы, как способность нести лекарство, желаемый профиль высвобождения, стабильность водной дисперсии, биосовместимость с клетками и тканями и сохранение магнитных свойств после модификации полимерами или химическими средствами. Магнитные наночастицы оксидов железа демонстрируют хорошую систему доставки лекарств [1-10].

В качестве эффективных стабилизаторов лиофобных дисперсных систем, таких как золи, эмульсии и пены могут использоваться биополимеры, в том числе полисахариды. Преимущество использования биополимеров для стабилизации дисперсных систем состоит в их биоразлагаемости, экологической безопасности и, во многих случаях, биосовместимости. В работах [11, 12] исследовалась стабилизация наночастиц сернокислой соли хитозана, стабилизированной различными полисахаридами. Было показано, что способность анионных полисахаридов стабилизировать положительно-заряженные наночастицы зависит от концентрации полисахаридов. При небольших концентрациях полисахаридов, когда адсорбция небольшая, преобладает флокуляция частиц полимерами. С повышением концентрации полимеров они становятся стабилизаторами наночастиц вследствие того, что адсорбция полимеров на поверхностях наночастиц возрастает. Затем, с ростом концентрации полимера их стабилизирующая способность снова падает, видимо вследствие того, что адсорбированные полимеры, заряженные противоположно по отношению к поверхности частицы, тем самым понижают заряд ее поверхности.

Ежегодное число публикаций, посвященных магнитным наночастицам и их биомедицинскому применению с 2013 г. превышает 5000, с каждым годом все увеличиваясь [2]. Но несмотря на всю обширность этой литературы, стабилизация водных дисперсий (гидрозолей) наночастиц магнетита остается практически не изученной. Не изученной остается и коагуляция гидрозолей магнетита под воздействием различных электролитов. Получение наночастиц магнетита по реакции сооса-

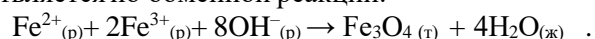
ждения ионов железа (II) и железа (III) с добавлением в качестве стабилизатора анионного полисахарида — альгината натрия осуществлялось, например, в работе [13], где далее исследовалась адсорбция на поверхности полученных частиц, покрытых полисахаридными оболочками катионов Ni^{2+} и Co^{2+} . Однако, непосредственно стабилизирующее действие альгината натрия на наночастицы магнетита в работе не изучалось. В работе [14] поверхность наночастиц магнетита покрывалась хитозаном, полученные частицы осаждались, сушились, затем пептизировались и сшивались глутаровым альдегидом. Влияние хитозана на устойчивость гидрозоля так же при этом не исследовалось.

Таким образом представляет интерес изучение влияния на устойчивость гидрозолей магнетита добавок как электролитов, вызывающих коагуляцию, так и полимерных стабилизаторов, в том числе полисахаридов, защищающих их от этой коагуляции.

Материалы и методы исследований

В качестве прекурсоров золя использовались: сульфат железа (II) семиводный $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, хч (Reactivtorg); хлорид железа (II) шестиводный $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, хч (Reactivtorg); гидроксид натрия, хч (Reactivtorg). В качестве пептизатора использовалась соляная кислота, хч (Reactivtorg). В качестве электролитов-коагуляторов использовались: гидроксид натрия, хч (Reactivtorg) и хлорид натрия, хч (Reactivtorg). Для создания и поддержания pH 7.4 использовалась фосфатно-солевая буферная смесь (ПанЭко). В качестве стабилизаторов гидрозолей использовались следующие полисахариды: гидроксипропилметилцеллюлоза (ГПМЦ) от поставщика «Формако» (производство — Китай), гидроксипропилцеллюлоза (ГЭЦ) марки «Сульфател», карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), гуаровая камедь (ГК) и ксантан — три последних полисахарида от поставщика «Форвардс Ингридиентс». Формулы данных полисахаридов приведены на рис. 1.

За основу получения золя магнетита была взята методика, рассмотренная в [15]. Синтез наночастиц магнетита, проводимый в щелочной среде из сульфата железа (II) и хлорида железа (III), осуществляется по обменной реакции:



Для проведения указанной реакции в колбах на 100 мл готовили растворы реагентов следующих концентраций: 0.01 М $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и 0.02 М $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. В плоскодонную колбу на 200 мл сначала переливали раствор с FeCl_3 . Затем к нему медленно добавляли весь раствор $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. В стакане ёмкостью 500 мл растворяли 25 г NaOH в

100 мл воды, а затем его нагревали до 80-90 °С. При интенсивном перемешивании быстро выливали в стакан смесь солей железа. Поддерживая температуру смеси на уровне 50-60 °С и перемешивая, продолжали нагревать стакан в течение 10-15 минут. Полученный черный осадок подвергается воздействию внешнего магнитного поля, создаваемого ниодимовым магнитом, что использовалось для ускорения осаждения осадка. К суспензии до-

бавляли 500 мл воды, и затем, после осаждения с помощью магнита, осадок декантировали и повторяли его промывку еще два раза до нейтральной pH, после чего фильтровали и добавляли к нему 10 мл 0.1 М HCl соляной кислоты. Наблюдался переход осадка в золь интенсивной краснокоричневой окраски. Концентрация золя, согласно стехиометрическим расчетам, составляет 0.4 г/л.

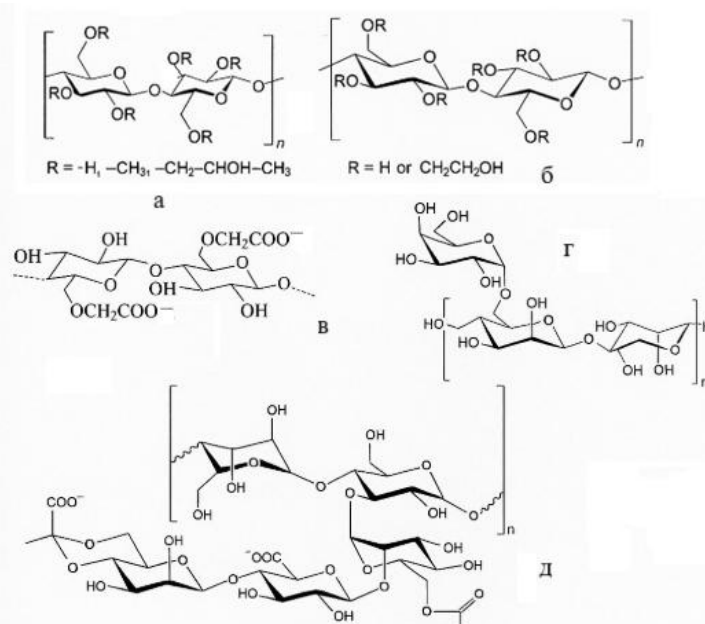


Рис. 1. Полисахариды, использованные для изучения стабилизации гидрозоля магнетита: а – гидроксиметилпропилцеллюлоза (ГПМЦ); б – гидроксиэтилцеллюлоза (ГЭЦ); в – карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ); г – гуаровая камедь (ГК); д – ксантан.

Fig. 1. Polysaccharides used to study the stabilization of magnetite hydrosol: а – hydroxymethylpropyl cellulose (HPMC); б – hydroxyethyl cellulose (HEC); в – carboxymethyl cellulose (CMC); г – guar gum (GA); д – xanthan.

Для исследования порога коагуляции золя магнетита индифферентным электролитом – NaCl и неиндифферентным электролитом – NaOH отбирали в пробирки по 10 мл золя. Затем туда добавлялся раствор электролита с возрастанием добавляемого объема в каждую последующую пробирку с шагом 0.1 мл. При этом концентрации хлорида и гидроксида натрия в исходных растворах составляли, соответственно 3.41 М и 0.05 М, соответственно. При помощи спектрофотометра КФК-3ОМ-3 измеряли оптическую плотность получившихся золь и определяли объемы электролитов, достаточных для коагуляции. Порог коагуляции электролитами рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{коаг}} = \frac{c_{\text{эл}} V_{\text{эл}}}{V_3} \quad (1)$$

где $c_{\text{эл}}$ – концентрация электролита; $V_{\text{эл}}$ – объем порции раствора электролита; V_3 – объем золя с учетом порции раствора электролита, минимально необходимого для достижения порога коагуляции.

Для исследования коллоидной защиты золя магнетита полисахаридами от указанных электролитов в пробирки отбиралось по 10 мл золя. Затем туда добавлялись растворы полисахаридов с возрастанием добавляемого объема в каждую последующую пробирку с шагом 0.1 мл. После чего добавлялся раствор электролита в объеме, соответствующем порогу коагуляции. Защитное число для полисахаридов рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{защ}} = \frac{c_{\text{п}} V_{\text{п}}}{V_3} \quad (2)$$

где $c_{\text{п}}$ – концентрация полисахарида; $V_{\text{п}}$ – объем порции раствора полисахарида; V_3 – объем золя с учетом порции раствора электролита, добавленного в количестве, минимально необходимого для достижения порога коагуляции и порции раствора полисахарида, минимально необходимой для предотвращения коагуляции.

С течением времени за счет коагуляции происходит укрупнение размера частиц гидрозоля, а

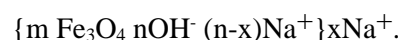
следовательно и рост оптической плотности. Но, с другой стороны, наиболее крупные агрегаты частиц при этом могут осаждаться на дно и тем самым выводиться из объема золя, исследуемого фотометрически. Это, напротив, способствует снижению оптической плотности (осветление системы). Поэтому в качестве меры устойчивости золь при определенном времени их жизни было взято относительное изменение оптической плотности в процентах от исходной оптической плотности:

$$D_{\text{отн}} = \frac{100|D - D_0|}{D_0} \quad (3)$$

У более устойчивой системы с течением времени оптическая плотность меняется меньше. Размер частиц гидрозоля измеряли методом динамического светорассеяния при помощи анализатора размеров частиц Photocor Complex (Россия).

Результаты и обсуждения

При получении гидрозоля магнетита сначала образуются мицеллы, которые могут быть описаны формулой:



Частицы гидрозоля тут же подвергаются обратной коагуляции (флокуляции). Благодаря этому выпадает черный осадок, представляющий собой агрегаты (флокулы) наночастиц. При пептизации осадка соляной кислотой поверхность магнетита меняет знак и заряжается положительно. Это вызывает взаимное отталкивание первичных частиц в агрегатах (флокулах), что приводит к распаду последних с получением гидрозоля, имеющего следующую формулу:

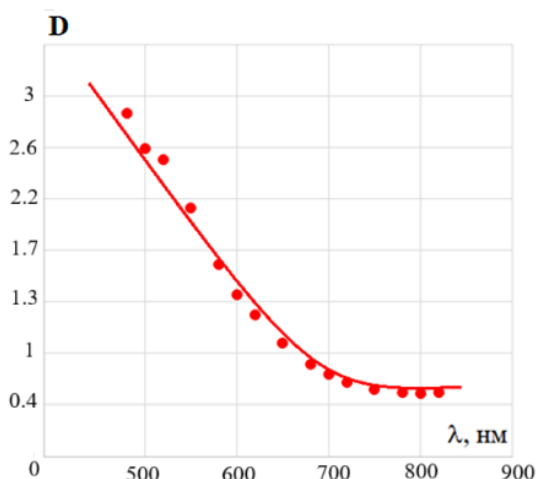
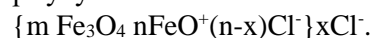


Рис. 2. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от длины волны света.
Fig. 2. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the wavelength of light.

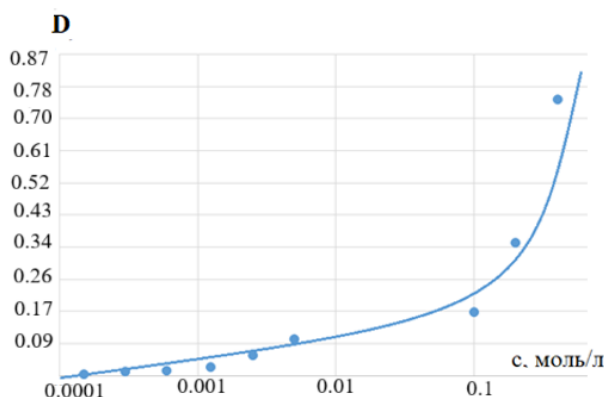


Рис. 3. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от его концентрации при длине волны света 780 нм.

Рис. 3. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от его концентрации при длине волны света 780 нм.

Зависимость оптической плотности золя магнетита от длины волны света представлено на рис. 2. Для исследований была выбрана длина волны $\lambda = 780$ нм, т.к. при этом минимизируется вклад поглощения света в величину оптической плотности.

Зависимость оптической плотности золя магнетита от его массовой концентрации представлены на рис. 3. Исходный золь разбавляли до оптической плотности около 0,07 ($\lambda = 780$ нм).

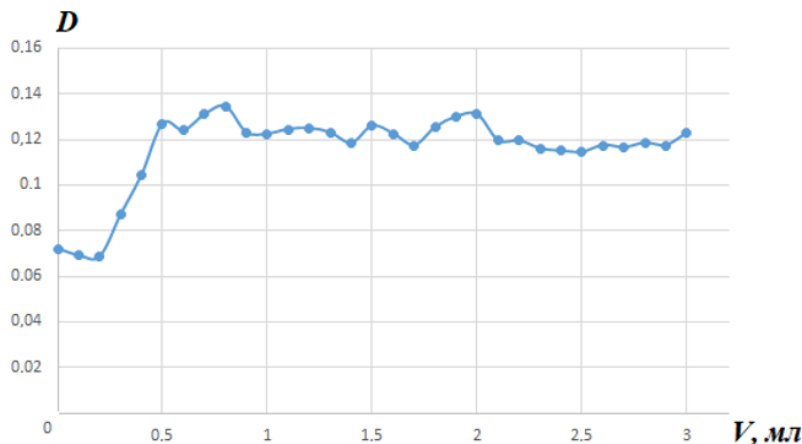


Рис. 4. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от добавления NaCl.

Fig. 4. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the addition of NaCl.

По отношению к магнетиту хлорид натрия выступает как индифферентный электролит, т.е. он не влияет на потенциал поверхности наночастиц, а только сжимает двойной электрический слой. График зависимости оптической плотности золя от объема NaCl, добавленного к нему, показан на рис.4. Как видно из него, оптическая плотность резко возрастает в интервале от около 0.25 до 0.5 мл, а дальше оптическая плотность остается практически постоянной. За пороговый объем для коагуляции было взято значение добавленного объема электролита $V_{эл} = 0.35$ мл. По формуле (1) рассчитали порог коагуляции полученного золя магнетита хлоридом натрия, который составил

$$1.15 \cdot 10^{-1} \text{ М.}$$

По отношению к магнетиту гидроксид натрия выступает как неиндифферентный электролит, вследствие способности достраивать кристаллическую решетку оксидов железа. График зависимости оптической плотности гидрозоля от объема раствора NaOH, добавленного к нему, показан на рис. 5. Как видно из него, оптическая плотность резко возрастает после добавления 1.2 мл NaOH. Величина pH системы при этом достигает 13. Рассчитанная по формуле (1) величина порога коагуляции гидрозоля магнетита гидроксидом натрия составила $5.6 \cdot 10^{-3} \text{ М.}$

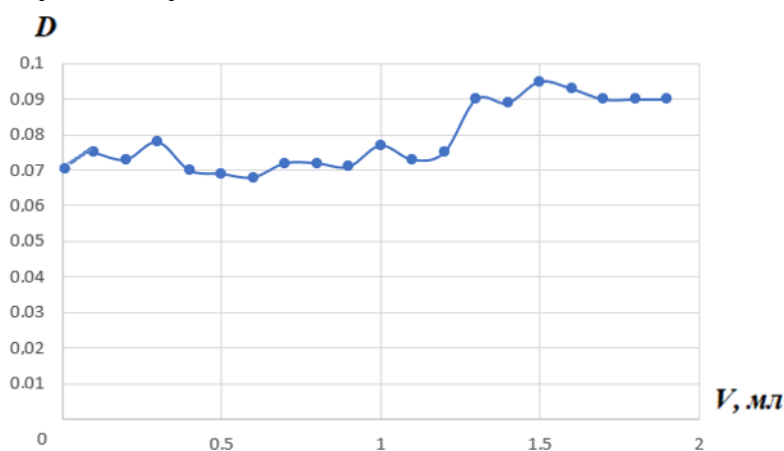


Рис. 5. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от добавления NaOH.

Fig. 5. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the addition of NaOH.

Графики зависимости оптической плотности золей с добавками полисахаридов и NaCl, взятого в концентрации, равной порогу коагуляции от объемов добавленных растворов полисахаридов показаны на рис. 6. Рассчитанные по формуле (2) защитные числа для ГПЦ, ГПМЦ и ГК приведены в табл. 1. Как видно, коллоидную защиту от хлорида натрия обеспечивают неионогенные полисахариды, причем ГПМЦ и ГЭЦ имеют приблизительно одинаковые защитные числа, а у ГЭЦ за-

щитное число выше, то есть его защитная способность ниже. Анионный полисахарид КМЦ, напротив, способствует повышению коагуляции золя хлоридом натрия. Отсутствие защиты золя добавками КМЦ можно объяснить возможным наличием примеси хлорида натрия в используемой КМЦ, оставшееся от процесса ее производства [16], что повышает концентрацию хлорида натрия выше порога коагуляции.

Таблица 1

Защитные числа гидрозоль магнетита от коагуляции хлоридом натрия для разных полисахаридов.

Table 1

Protection values of magnetite hydrosol against coagulation with sodium chloride for different polysaccharides.

Полисахарид	$C_{защ}, \%$
Гидроксипропилметилцеллюлоза	$1 \cdot 10^{-4}$
Гидроксиэтилцеллюлоза	$1 \cdot 10^{-4}$
Гуаровая камедь	$2.3 \cdot 10^{-3}$

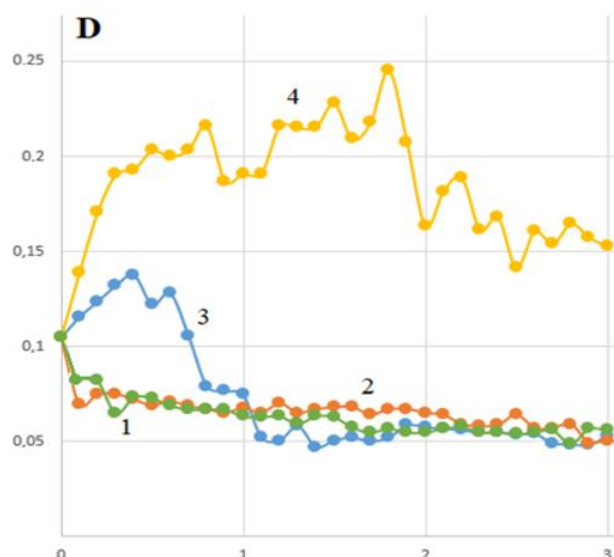


Рис. 6. Зависимость оптической плотности гидрозоль магнетита от добавления полимера и NaCl : 1 – ГПМЦ; 2 – ГЭЦ; 3 – ГК; 4 – КМЦ.

Fig. 6. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the addition of polymer and NaCl: 1 – HPMC; 2 – HEC; 3 – GC; 4 – CMC.

Влияние добавок полисахаридов на оптическую плотность золя с добавлением полисахаридов и гидроксида натрия, взятого в концентрации, равной порогу коагуляции, приведены на рис. 7 и

рис. 8. Среди рассматриваемых полисахаридов вместо ГК был взят анионный полисахарид ксантан.

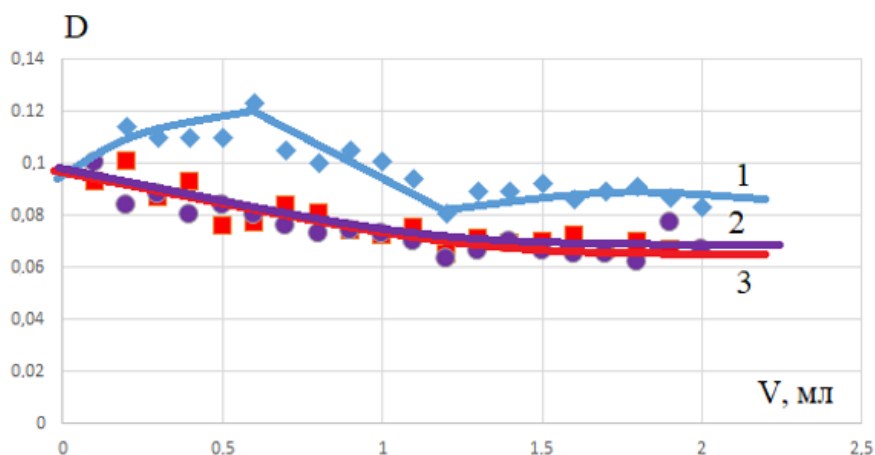


Рис. 7. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от добавления полимера и NaOH (исходная концентрация 0.025%): 1 – ксантан; 2 – КМЦ; 3 – ГЭЦ.

Fig. 7. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the addition of polymer and NaOH (initial concentration 0.025%): 1 – xanthan; 2 – CMC; 3 – HEC.

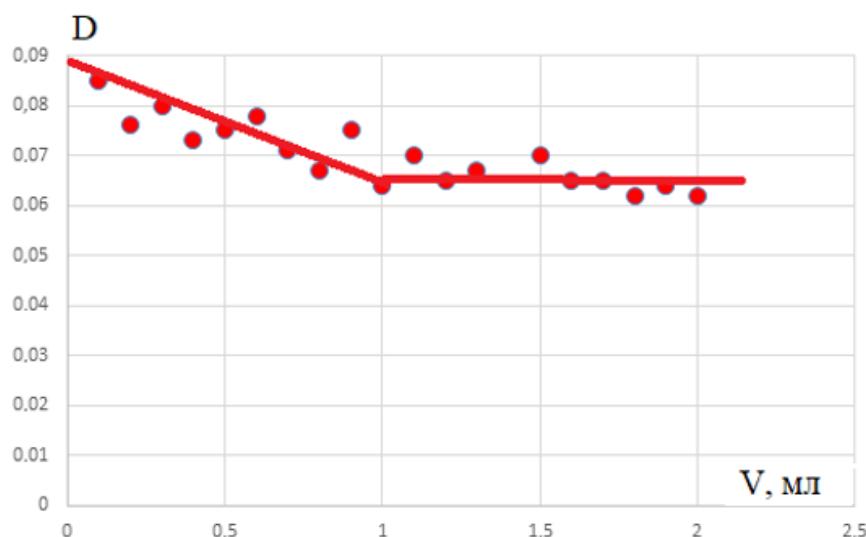


Рис. 8. Зависимость оптической плотности гидрозоля магнетита от добавления ГПМЦ и NaOH (исходная концентрация 0.006%).

Fig. 8. Dependence of the optical density of magnetite hydrosol on the addition of HPMC and NaOH (initial concentration 0.006%).

В случае ГК, ГЭЦ и ГПМЦ снижение оптической плотности происходит плавное, без резких перегибов. Рассчитанные по формуле (2) защитные числа от коагуляции гидроксидом натрия золя магнетита для различных полисахаридов приведены в табл. 2. Наименьшим защитным числом обладает КМЦ. ГПЦ и анионный КМЦ имеют приблизительно равные защитные числа, которые в 4 раза выше, чем у КМЦ. Таким образом, КМЦ защищает гидрозоля от коагуляции гидроксидом натрия, что не наблюдалось в случае его коагуляции хлоридом натрия. Анионный полисахарид

ксантан также защищает золь от коагуляции гидроксидом натрия и имеет защитное число, близкое к ГПЦ и КМЦ. Защита анионными полисахаридами от коагуляции, не смотря на то, что при адсорбции на поверхности частиц они снижают их электрический потенциал, может быть объяснена структурно-механическим фактором устойчивости, положительное влияние которого на стабилизацию частиц в данных случаях превышает отрицательное влияние нейтрализации заряда поверхности, как это наблюдалось в [11, 12] для золя сернокислой соли хитозана.

Таблица 2

Защитные числа гидрозоля магнетита от коагуляции гидроксидом натрия для разных полисахаридов.

Table 2

Protection values of magnetite hydrosol against coagulation with sodium hydroxide for different polysaccharides.

Полисахарид	$C_{защ}$, %
Гидроксипропилметилцеллюлоза	$5 \cdot 10^{-4}$
Гидроксиэтилцеллюлоза	$2 \cdot 10^{-3}$
Карбоксиметилцеллюлоза	$2 \cdot 10^{-3}$
Ксантан	$2.3 \cdot 10^{-3}$

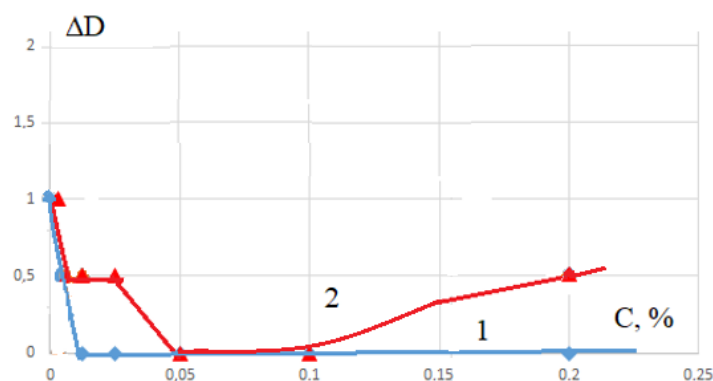


Рис. 9. Относительное изменение оптической плотности золей магнетита при pH 7,4 (pH крови), созданной введением фосфатно-солевой буферной смеси через 2 суток в присутствии: 1 – ГПМЦ; 2 – ГЭЦ.

Fig. 9. Relative change in the optical density of magnetite sols at pH 7.4 (blood pH), created by introducing a phosphate-buffered saline mixture after 2 days in the presence of: 1 – HPMC; 2 – HEC.

В связи с медицинским применением наночастиц магнетита для диагностики и в качестве агентов доставки лекарственных средств важное практическое значение имеет исследование золей магнетита при физиологических значениях pH. Для исследования было взято значение pH 7.4, т.к. pH человеческой крови в норме находится в диапазоне от 7.3 до 7.5. Согласно литературным данным, при pH среды 7.4 поверхность магнетита приобретает отрицательный заряд [17-19]. При разбавлении гидрозоля магнетита вместо дистиллированной воды раствором фосфатно-солевого буфера для создания pH среды 7.4 коагуляции не наблюдалось. Следовательно, поверхность золя перезаряжается, и он попадает в зону относительной стабильности уже с отрицательным зарядом

поверхности своих частиц.

Далее была измерена оптическая плотность полученных гидрозолей в буферном растворе с pH 7.4 – непосредственно после получения и через 2 суток. По формуле 3 были рассчитаны значения относительного изменения оптической плотности гидрозолей. На рис. 9 показано относительное изменение оптической плотности гидрозолей магнетита в зависимости от концентрации ГМЦ и ГЭЦ. Как видно, добавление полисахаридов снижает величины этого относительного изменения, причем в случае добавки ГМЦ оптическая плотность практически не изменилась в течении двух суток во всем исследуемом интервале концентраций.

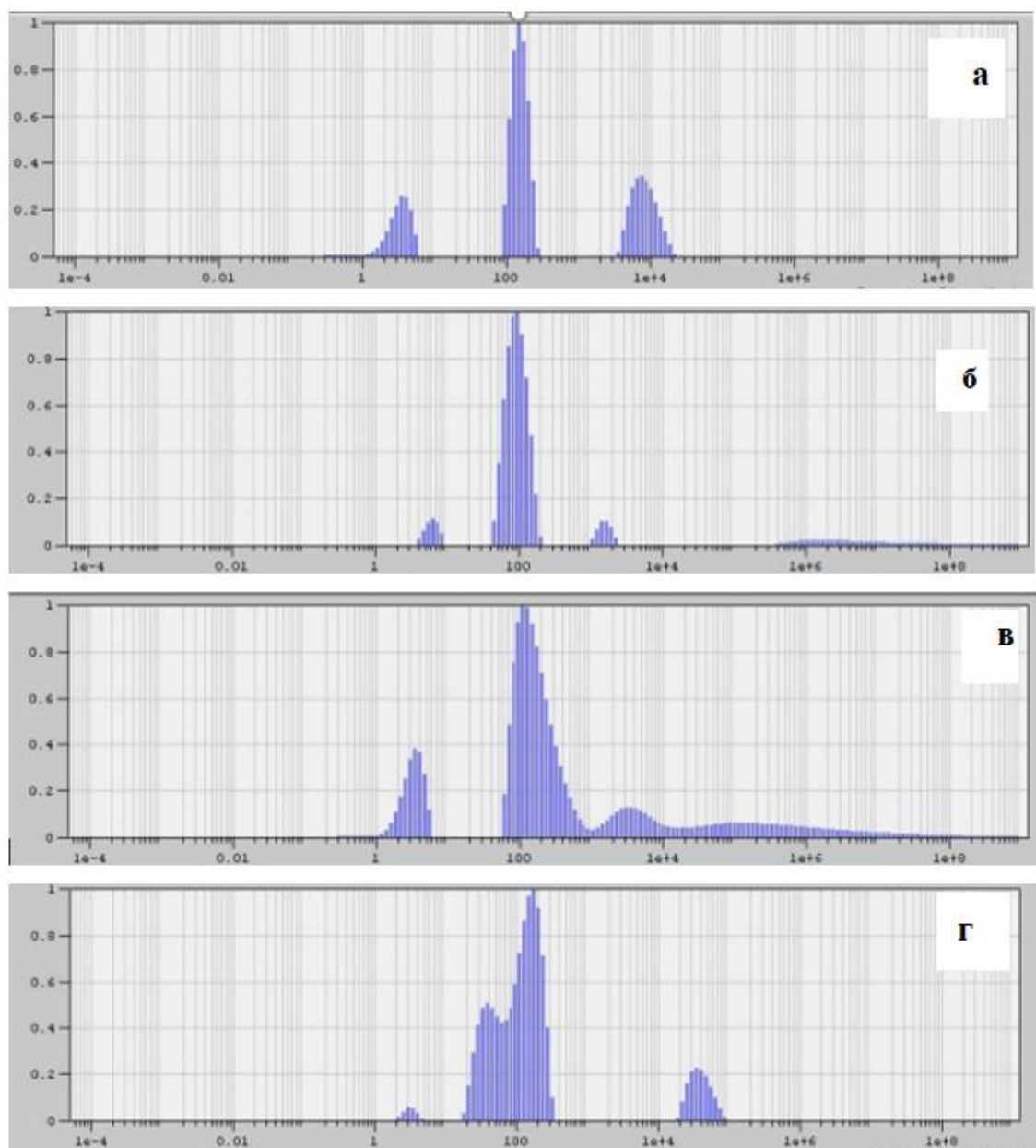


Рис. 10. Распределение рассеяния света частицами магнетита в зависимости от их размера: а – золь магнетита при pH 1.5; б – золь магнетита при pH 1.5 с добавкой 0.06 % ГПМЦ; в – золь магнетита при pH 7.4; г – золь магнетита с добавкой ГПМЦ при pH 7.4.

Fig. 10. Distribution of light scattering by magnetite particles depending on their size: a – magnetite sol at pH 1.5; b – magnetite sol at pH 1.5 with the addition of 0.06% HPMC; c – magnetite sol at pH 7.4; d – magnetite sol with the addition of HPMC at pH 7.4.

Методом динамического светорассеяния измерили распределение рассеяния света частицами гидрозоля магнетита в зависимости от их размера. Для этого были взяты гидрозоли магнетита и гидрозоли магнетита с добавкой 0.06% ГПМЦ при pH 1.5 и 7.4 через трое суток после получения. Результаты представлены на рис. 10. Как видно из них, добавка полисахарида ГПМЦ в обоих случаях способствует стабилизации гидрозоля магнетита,

так как при этом сохраняется больше частиц, размеры которых лежат в диапазоне менее 100 нм, что особенно заметно при pH 7.4.

Выводы

Можно сделать вывод, что неионогенные полисахариды, такие как ГПМЦ и ГЭЦ, перспективны для стабилизации водных дисперсий (гидрозолей) магнитных наночастиц Fe_3O_4 , при этом большую способность их стабилизировать проявил ГПМЦ.

Список источников

1. Мельников М.Я., Трахтенберг Л.И. Гибридные наночастицы биоактивных и лекарственных веществ. М.: Техносфера, 2020. 408 с.
2. Petrov K.D., Chubarov A.S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications // Encyclopedia J. 2022. Vol. 2. P. 1811 – 1828.
3. Tanish S., Moili R., Prithvi R.M., Shurthilaya R. Advances in Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications // Biomed J. Sci. & Tech. Res. 2022. Vol. 46 (3). P. 37446 – 37454.
4. Nguyen M.D., Tran H.-V., Xu Sh., Lee T.R. Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 1 – 34.
5. Materon E.M., Miyazaki C.M., Carr O., Joshi N., Picciani P.H.S., Dalmachio C.J., Shimizu F.M. Magnetic nanoparticles in biomedical applications: A review // Appl. Surface Sc. Adv. 2021. Vol. 6. P. 100163 – 100180.
6. Monteserín M., Larumbe S., Martínez A.V., Burgui S., Francisco Martín L. Recent Advances in the Development of Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications // J Nanoscience Nanotech. 2021. Vol. 21 (5). P. 2705 – 2741.
7. Воронин Д.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Щукин Д.Г., Горин Д.А. Магнитные композиты с наночастицами магнетита: получение, управление физическими свойствами, применение // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Физика. 2013. Т. 13 (2). С. 50 – 54.
8. Трофимова Т.В., Сайкова С.В., Карпов Д.В., Чистяков Д.И., Павликов А.Ю. Оптимизация условий получения стабильных гидрозолей наночастиц магнетита // J. Siberian University. Chemistry. 2020. Vol. 13 (1). P. 99 – 108.
9. Hasany S.F., Abdurahman N.H., Sunarti A.R., Jose R. Magnetic iron oxide nanoparticles: chemical synthesis and application review // Current Nanoscience. 2013. Vol. 9. P. 561 – 575.
10. Никифоров В.Н. Биомедицинские применения магнитных наночастиц // Наука и технология в промышленности. 2011. № 1. С. 90 – 99.
11. Ерасов В.С., Мальцева Ю.О. Получение наночастиц сульфата хитозана в водной среде и их коллоидная защита полисахаридами // Тонкие химические технологии. 2024. Vol. 19 (2). P. 111 – 126.
12. Ерасов В.С., Мальцева Ю.О. Адсорбция каппа-каррагинана на поверхности хитозана и его сернокислой соли и стабилизация им хитозан-сульфатных наночастиц // Chemical Bulletin. 2023. Vol. 6 (2). P. 5 – 18.
13. El-Shamy O.A.A., El-Azabawy R.E., El-Azabawy O.E. Synthesis and Characterization of Magnetite-Alginate Nanoparticles for Enhancement of Nickel and Cobalt Ion Adsorption from Wasterwater // J. Nanomaterials. 2019. P. 1 – 8.
14. González-Martínez E., Pérez A.G., Martínez D.A.G., Águila C.R.D., Urbina E.C., Ramírez D.U., Madeira H.Y. Chitosan-coated magnetic nanoparticles; exploring their potentialities for DNA and Cu(II) recovery // Inorganic and Nano-Metal Chemistry. 2020. P. 103 – 106.
15. Бибик Е.Е. Коллоидные растворы и суспензии: руководство к действию. С.-Пб.: Профессия, 2017. 252 с.
16. Штильман М.И. (под ред.) Технология полимеров медико-биологического назначения: учебное пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 328 с.
17. Коваленко А.С., Шилова О.А., Николаев А.М., Мякин С.В. Сравнительный анализ характеристик водных суспензий магнитных наночастиц оксидов железа различного фазового состава // Коллоидный журнал. 2023. Т. 85 (3). С. 319 – 327.
18. Гзогян С.Р. Исследование состояния поверхности магнетита и кварца в ферромагнитной суспензии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. Т. 5. С. 189 – 199.
19. Линников О.Д. Закономерности сорбции ионов хрома (VI) магнетитом (обзор). 2021. Т. 57 (2). С. 115 – 140.

References

1. Melnikov M.Ya., Trakhtenberg L.I. Hybrid nanoforms of bioactive and medicinal substances. Moscow: Tekhnosfera, 2020. 408 p.
2. Petrov K.D., Chubarov A.S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications. Encyclopedia J. 2022. Vol. 2. P. 1811 – 1828.
3. Tanish S., Moili R., Prithvi R.M., Shurthilaya R. Advances in Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications. Biomed J. Sci. & Tech. Res. 2022. Vol. 46 (3). P. 37446 – 37454.
4. Nguyen M.D., Tran H.-V., Xu Sh., Lee T.R. Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 1 – 34.

5. Materon E.M., Miyazaki C.M., Carr O., Joshi N., Picciani P.H.S., Dalmachio C.J., Shimizu F.M. Magnetic nanoparticles in biomedical applications: A review. *Appl. Sur-face Sc.Adv.* 2021. Vol. 6. P. 100163 – 100180.
6. Monteserín M., Larumbe S., Martínez A.V., Burgui S., Francisco Martín L. Recent Advances in the Development of Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications. *J Nanoscience Nanotech.* 2021. Vol. 21(5). P. 2705 – 2741.
7. Voronin D.V., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Shchukin D.G., Gorin D.A. Magnetic composites with magnetite nanoparticles: production, control of physical properties, application. *Izvestiya Saratov University. Nov. series. Physics.* 2013. Vol. 13 (2). P. 50 – 54.
8. Trofimova T.V., Saykova S.V., Karpov D.V., Chistyakov D.I., Pavlikov A.Yu. Optimization of conditions for obtaining stable hydrosols of magnetite nanoparticles. *J. Siberian University. Chemistry.* 2020. Vol. 13 (1). P. 99 – 108.
9. Hasany S.F., Abdurahman N.H., Sunarti A.R., Jose R. Magnetic iron oxide nanoparticles: chemical synthesis and application review. *Current Nanoscience.* 2013. Vol. 9. P. 561 – 575.
10. Nikiforov V.N. Biomedical applications of magnetic nanoparticles. *Science and technology in industry.* 2011. No. 1. P. 90 – 99.
11. Yerasov V.S., Maltseva Yu.O. Production of chitosan sulfate nanoparticles in an aqueous medium and their colloidal protection with polysaccharides. *Fine chemical technologies.* 2024. Vol. 19 (2). P. 111 – 126.
12. Yerasov V.S., Maltseva Yu.O. Adsorption of kappa-carrageenan on the surface of chitosan and its sulfate salt and stabilization of chitosan-sulfate nanoparticles by it. *Chemical Bulletin.* 2023. Vol. 6 (2). P. 5 – 18.
13. El-Shamy O.A.A., El-Azabawy R.E., El-Azabawy O.E. Synthesis and Characterization of Magnetite-Alginate Nanoparticles for Enhancement of Nickel and Cobalt Ion Adsorption from Wasterwater. *J. Nanomaterials.* 2019. P. 1 – 8.
14. González-Martínez E., Pérez A.G., Martínez D.A.G., Águila C.R.D., Urbina E.C., Ramírez D.U., Madeira H.Y. Chitosan-coated magnetic nanoparticles; exploring their potentialities for DNA and Cu(II) recovery. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry.* 2020. P. 103 – 106.
15. Bibik E.E. Colloidal solutions and suspensions: a guide to action. St. Petersburg: Profession, 2017. 252 p.
16. Shilman M.I. (ed.) Technology of polymers for medical and biological purposes: a tutorial. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2015. 328 p.
17. Kovalenko A.S., Shilova O.A., Nikolaev A.M., Myakin S.V. Comparative analysis of the characteristics of aqueous suspensions of magnetic nanoparticles of iron oxides of different phase compositions. *Colloid Journal.* 2023. Vol. 85 (3). P. 319 – 327.
18. Gzogyan S.R. Study of the surface state of magnetite and quartz in a ferromagnetic suspension. *Mining Information and Analytical Bulletin.* 2019. Vol. 5. P. 189 – 199.
19. Linnikov O.D. Regularities of chromium (VI) ion sorption by magnetite (review). 2021. Vol. 57 (2). P. 115 – 140.

Информация об авторах

Ерасов В.С., кандидат химических наук, доцент, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, Vadim.ersv@yandex.ru

Чжу Ц., студент, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет

Шапошников П.А., Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет

© Ерасов В.С., Чжу Ц., Шапошников П.А., 2025

Information about the authors

Erasov V.S., PhD (Chemistry), Associate Professor, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA – Russian Technological University, Vadim.ersv@yandex.ru

Zhu Q., Student, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA – Russian Technological University

Shaposhnikov P.A., Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA – Russian Technological University

© Yerasov V.S., Zhu Q., Shaposhnikov P.A., 2025