

DOI: 10.12731/wsd-2018-2-116-128

УДК 661.872.22-13-12: 616-079.1 616-08-031.84

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ Fe_3O_4 ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ РАКОВЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Тюрикова И.А.

Цель работы: Разработка методики получения магнитных наночастиц Fe_3O_4 для диагностики и лечения онкологических заболеваний с учетом требований к их физическим параметрам, используемым прекурсорам и биосовместимому стабилизирующему веществу, обеспечивающему устойчивость и стабильность состава и характеристик частиц.

Методология проведения работы: Обозначены принципы, в соответствии с которыми произведен подбор веществ, участвующих в получении наноразмерного Fe_3O_4 стабильного состава и характеристик. Разработка методики получения магнитных наночастиц осуществлялась согласно требованиям для различных медицинских приложений. Изучение полученных наночастиц производилось методами рентгенофазового анализа, посредством микроскопии и анализа размерных характеристик, а также исследований магнитных свойств образцов с использованием специально спроектированной и сконструированной для данной цели установки.

Результаты: Показано соответствие параметров магнитных наночастиц Fe_3O_4 (размер 10–13 нм, узкое распределение частиц по размерам, удельная намагниченность насыщения 69 – 81 Гс·см³/г, стабильность состава, обеспечиваемая последовательностью приготовления магнитной жидкости) и предложенной методики их получения, разработанной с учетом токсикологических принципов и требований, предъявляемых к объектам, применяемым в медицине, позволяющие рекомендовать полученные наночастицы для дальнейших клинических испытаний.

Область применения результатов: диагностика и лечение раковых заболеваний, магнитно-резонансная томография, адресная доставка лекарственных средств, гипертермия.

Ключевые слова: Fe_3O_4 ; магнетит; магнитные наночастицы; МРТ; гипертермия; адресная доставка лекарств; рак.

DEVELOPMENT OF MAGNETIC Fe_3O_4 NANOPARTICLES FORMATION METHOD FOR DIAGNOSIS AND TREATMENT OF CANCER DISEASES

Tyurikova I.A.

Objective: *Developing of the technique for obtaining magnetic Fe_3O_4 nanoparticles for the diagnosis and treatment of oncological diseases, taking into account the requirements for their physical parameters, precursors and biocompatible stabilizing substance ensuring the steadiness and stability of the composition and characteristics of the particles.*

Methodology: *Principles, according to which the selection of the participating in the preparation of nano-sized Fe_3O_4 with a stable composition and characteristics precursors is carried out were indicated. The development of the method for obtaining magnetic nanoparticles was carried out according to the requirements of different medical applications. The nanoparticles were studied by X-ray diffraction analysis, microscopy and analysis of dimensional characteristics, magnetic properties of samples were investigated by using a specially designed and constructed for this purpose installation.*

Results: *The correspondence of the Fe_3O_4 magnetic nanoparticles parameters (size 10–13 nm, narrow particle size distribution, specific saturation magnetization 69 – 81 G·cm³/g is shown, stability of the composition is provided by the sequence of the magnetic fluid preparation) and the proposed method for their preparation, developed taking into account the toxicological principles and requirements imposed on objects used in medicine, allowing to recommend the obtained nanoparticles for further clinical trials.*

Keywords: *Fe_3O_4 ; magnetite; magnetic nanoparticles; MRI; hyperthermia; drug delivery; cancer.*

Введение

В последние годы, в связи с перспективами практических применений, все большее внимание уделяется разработке методов синтеза наноразмерных структур, в частности обладающих магнитными свойствами, и исследованию их физико-химических параметров [1, 2]. Использование наноматериалов в медицине и фармакологии является приоритетным направлением, позволяющим решать актуальные проблемы, связанные с ди-

агностикой и лечением различных заболеваний, в частности, раковых, а применение магнитных наночастиц способно упростить как обнаружение пораженных участков тканей на раннем этапе, так и адресную доставку лекарственных средств, а также терапию локальных областей новейшими многообещающими методиками, такими как гипертермия [3, 4].

Среди множества получаемых на сегодняшний день магнитных наночастиц: на основе металлов (Co, Fe, Ni), оксидов железа, ферритов (MgFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , LiFe_5O_8), а также CoPt, FePt и др. [5, 6], – особый интерес для медицины представляют оксидные частицы, которые, хотя и обладают более слабыми, но при этом относительно стабильными магнитными свойствами, чем металлические, однако являются более устойчивыми к окислению и имеют низкую токсичность [7].

Для получения НЧ, в основном, используют физические и химические методы, при этом методы «сверху вниз» не позволяют обеспечить получение мелких частиц с узким распределением по размерам, физические методы, как правило, требуют высоких энергозатрат, что увеличивает стоимость конечного продукта. Использование химических, в частности, жидкофазных методов, позволяет снизить себестоимость готового продукта, а также, в ряде случаев, имеет определенные технологические преимущества, например, возможность контроля формы НЧ, плавного изменения их размеров, получение НЧ с узким распределением по размерам, что необходимо для устойчивости МЖ. Одним из наиболее успешных жидкофазных методов, позволяющих получать магнитные наночастицы Fe_3O_4 , имеющие более высокие магнитные характеристики, чем $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, является метод химического осаждения, предложенный Элмором [8, 9], не лишенный, однако, недостатков (применение неустойчивых солей железа, непостоянный состав растворов-прекурсоров), из-за которых состав получаемых частиц нестабилен и труднопроизводим, отчего случайным образом меняются параметры готового продукта.

Несмотря на достаточно богатый многолетний опыт в получении различных магнитных жидкостей и наличие существенного исследовательского материала [10–12], проблему получения магнитных наночастиц для медицинских приложений нельзя считать решенной в связи с отсутствием методики, учитывающей и стадию подбора прекурсоров для данной области, и четкую технологическую последовательность процесса, и возможность получения частиц с набором удовлетворяющих физических параметров продукта. Для применения магнитных наночастиц в области медицины важно учесть возможности метода обеспечить получение ча-

стиц малого размера, подвергаемых биодegradации либо выведению из организма во избежание накопления в избыточных количествах, узкого распределения по размерам, с высокими магнитными характеристиками, стабильного состава и физических параметров, а также возможности получения магнитных наночастиц, отвечающих токсикологическому критерию как готового продукта, так и используемых прекурсоров. На наш взгляд, только такой комплексный подход позволяет решить поставленную задачу по разработке методики получения магнитных наночастиц Fe_3O_4 , применяемых в медицине, в частности для лечения и диагностики онкологических заболеваний.

Экспериментальная часть

Раствор, содержащий ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} , готовили окислением Fe^{2+} в водном растворе соли Мора $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (ЗАО«Вектон», ГОСТ 4208-72, ХЧ) пероксидом водорода, при этом контроль за соотношением Fe^{2+}/Fe^{3+} осуществляли по потенциалу окислительно-восстановительного электрода при потенциометрическом титровании до значения 0,588 В, соответствующим соотношению ионов Fe^{2+}/Fe^{3+} равном 1:2 [13]. В концентрированный раствор аммиака (ЗАО«Вектон», ГОСТ 24147-80, ОСЧ) капельно при перемешивании вводили раствор солей. Далее колбу с образовавшимся раствором устанавливали на постоянный магнит и отделившийся магнитный осадок многократно промывали до pH7, после чего магнитную жидкость обрабатывали водным 15%-ным раствором стабилизатора маннита $C_6H_{14}O_6$ (ИМП).

Методы исследования

Для исследования полученных образцов применяли рентгенодифракционный анализ (дифрактометр Bruker-AXS D8 ADVANCE), растровую электронную микроскопию (Supra 55VP), определение размера и распределения частиц по размерам проводили с помощью лазерного анализатора наночастиц Horiba Jobin Yvon SZ-100, для исследования магнитных характеристик материала использовали спроектированную и сконструированную для изучения жидких образцов экспериментальную установку.

Результаты и обсуждение

Как было упомянуто выше, наиболее распространенным химическим способом получения наночастиц магнетита является жидкофазный метод химического осаждения, предложенный Элмором [8, 9]. В соответствии с

описанной в экспериментальной части методикой нами был усовершенствован данный метод, с учетом расчетного и экспериментального подходов предложена последовательность получения магнитных наночастиц Fe_3O_4 в составе стабильных магнитных жидкостей с применением совместимого с водой стабилизирующего вещества маннита [13].

Использование двойной соли железа(II), сравнительно более устойчивой на воздухе, чем простые соли железа [14], и непрерывный контроль соотношения ионов железа в растворе при парциальном окислении соли Мора позволяют точно задавать отношение ионов железа в растворе и при последующем осаждении получать осадок состава $m\text{FeO}\cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$, где $m=n$. Такое осаждение происходит наиболее полно, а отсутствие иной фазы в магнитном осадке (рис.1) не снижает его магнитных характеристик. Рентгенофазовый анализ (рис.1) показал, что в осадке присутствует только Fe_3O_4 , а исследования, посвященные изучению влияния температуры на состав сухого магнитного вещества, позволили сделать вывод, что постоянство данного состава сохраняется вплоть до начала разложения маннита на сахара маннозу и галактозу (примерно 160°C), происходящего при температуре, существенно превышающей необходимую и достаточную для применения в медицине.

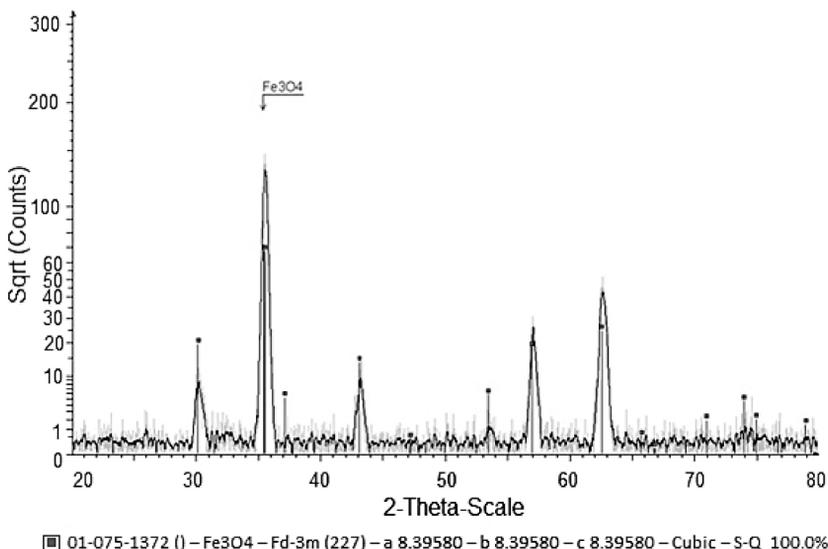


Рис. 1. Рентгенограмма образца магнитного осадка

Применение НЧ в биомедицинских целях требует выбора способа получения непокрытых НЧ, так как использование поверхностно-активных веществ может привести к увеличению их токсичности. В то же время, отсутствие стабилизирующего покрытия приводит к агрегации НЧ, а потому стабилизатор необходим, для медицинских приложений он должен быть биосовместимым, предсказуемо биоразлагаемым, нетоксичным, не нарушать свойств НЧ. В качестве стабилизатора в рамках данного исследования использован раствор маннита, ранее не применявшийся для стабилизации наночастиц магнетита. При невысокой вязкости его водных растворов оказалось возможным получение устойчивой магнитной жидкости с высокой удельной намагниченностью насыщения $69 - 81 \text{ Гс}\cdot\text{см}^3/\text{г}$ [15].

На рис. 2 представлена зависимость удельной намагниченности насыщения от магнитного поля концентрированной магнитной жидкости. Для получаемых образцов характерна узкая петля гистерезиса, конечная ее ширина становится заметной только при стократном изменении масштаба. Особенностью кривых гистерезиса всех изучаемых образцов является то, что обратный восходящий ход гистерезиса проходит ниже прямого нисходящего хода, иначе говоря, обратный восходящий ход, заканчиваясь при нулевой напряженности магнитного поля возбуждения, не совпадает с нулем напряженности магнитного поля возбуждения для прямого нисходящего хода гистерезисной кривой, что можно объяснить присутствием остаточного намагничивания, повышающего суммарное значение магнитного поля. Изучение влияния маннита на изменение магнитных характеристик жидкости показало, что в случае отсутствия стабилизатора, значение удельной намагниченности насыщения отличается незначительно, что можно объяснить несущественным изменением вязкости раствора, содержащего маннит, относительно нестабилизированной магнитной жидкости, а петля гистерезиса заметно расширяется, что, вероятно, связано со степенью стабилизации и устойчивостью магнитной жидкости, в которой присутствуют агрегаты различного размера: чем менее устойчива магнитная жидкость, тем более выражена гистерезисная кривая. Существенно также влияние концентрации магнитной жидкости на ее магнитные характеристики, что связано с броуновским движением частиц в дисперсионной среде и одновременным действием магнитных сил, соответствующим образом ориентирующих магнитные частицы в магнитном поле. Для высококонцентрированных магнитных жидкостей, дисперсионная фаза которых распределена преимущественно в межчастичном пространстве, движение частиц затруднено, а для сильнораз-

бавленных растворов требуется прикладывание большего поля, поэтому подбор необходимой концентрации магнитной жидкости является задачей, решаемой для конкретного приложения.

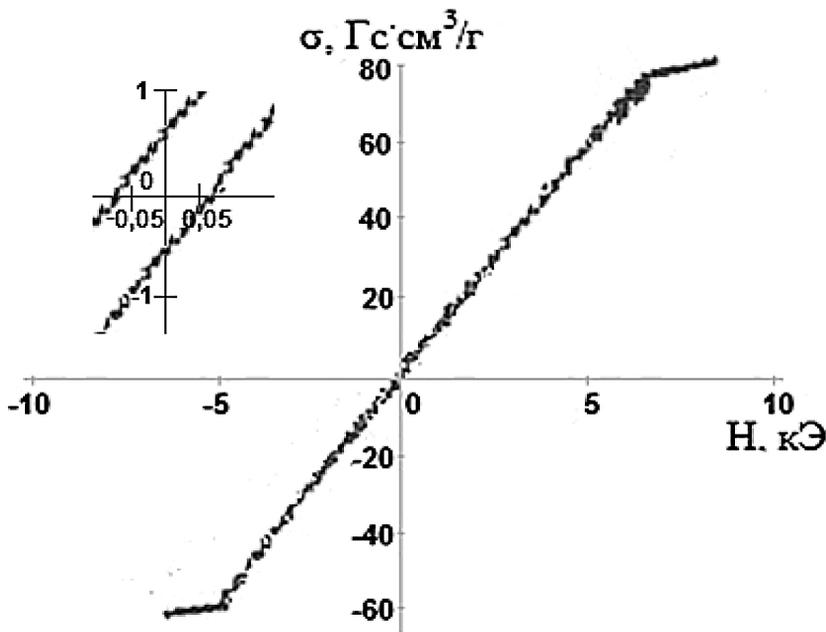


Рис. 2. Зависимость удельной намагниченности насыщения от магнитного поля

Важно отметить, что помимо защиты от агломерации и окисления, покрытие стабилизирующим веществом может играть роль спейсера для присоединения фармацевтических агентов или биомолекул к магнитному носителю. Применение маннита в качестве стабилизатора частиц позволяет как сохранить их стабильность в растворе и обеспечить его длительную устойчивость, так и делает возможным модификацию поверхности НЧ различными функциональными группами, что позволяет ковалентно связывать НЧ с биомолекулами или лекарственными средствами. Фиксация и депонирование носителей лекарственных препаратов магнитным полем в области опухоли дает возможность значительно уменьшить дозу, а использование локальной гипертермии позволяет проводить терапию онкозаболеваний без применения химических препаратов [16].

Получаемые согласно предложенной методике наночастицы Fe_3O_4 характеризуются узким мономодальным распределением частиц по размерам, 90% частиц находятся в интервале 10–13 нм, средний размер составляет $12,0 \pm 0,6$ нм, что подтверждается многократными измерениями, проведенными с использованием лазерного анализатора наночастиц (рис. 3). Средний размер частиц, рассчитанный по уширению дифракционных отражений, составил $D_{\text{XRD}} \sim 12,4$ нм, что хорошо коррелирует с результатами, полученными с применением лазерного анализатора.

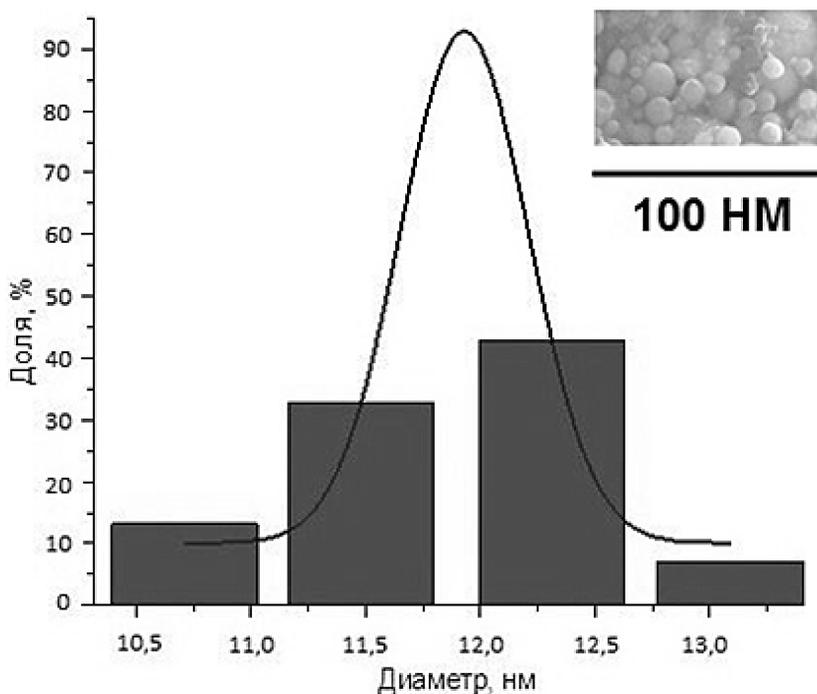


Рис. 3. Распределение наночастиц Fe_3O_4 по размерам и изображение частиц, полученное с помощью РЭМ

Наночастицы с такими размерными характеристиками составляют стабильную твердую компоненту магнитной жидкости, поскольку склонность частиц к агломерации существенна при значительном разбросе частиц по размерам. При рассмотрении возможности использования магнитных частиц в биомедицине встает ряд вопросов, связанных с после-

дующим безопасным для организма выводом НЧ. Важно отметить, что оптимальным размером НЧ, циркулирующих в сосудистой системе, является 10–30 нм, НЧ около 10 нм и менее могут быть подвергнуты почечной фильтрации и быстро выводиться из организма посредством почечного клиренса [17, 18]. Малые размеры НЧ желательны также и для маркировки клеточных органелл. Кроме того, чем меньше НЧ, тем больше вероятность их перемещения через эндотелий (и выше скорость перемещения), а, следовательно, возможно более вероятное попадание НЧ к конкретной цели, в сравнении с небольшим количеством более крупных НЧ, с трудом проходящих через эндотелий и медленно приближающихся к цели, но при этом с той же общей массой магнитного материала [19]. Полученные в соответствии с предложенной методикой частицы Fe_3O_4 по своим размерным характеристикам удовлетворяют предъявляемым требованиям для возможности применения в медицине.

Заключение

На основании результатов проведенного исследования разработана методика получения магнитных наночастиц Fe_3O_4 , которые можно рекомендовать к применению в медицинских целях, в частности для диагностики и лечения раковых заболеваний. Предлагаемая методика учитывает протекающие в реакционной смеси процессы и требования, предъявляемые к нанообъектам для данной сферы, и способствует получению магнитных наночастиц со средним размером 12 нм, узким мономодальным распределением по размерам, удельной намагниченностью насыщения $69 - 81 \text{ Гс}\cdot\text{см}^3/\text{г}$ в форме устойчивой магнитной жидкости, поддержание стабильности которой обеспечивается раствором маннита. Разработанная методика предусматривает применение безопасных прекурсоров и получение магнетитовых наночастиц, характеризующихся низкой токсичностью [16].

В медицине они могут быть использованы как переносчики биологически активных и лекарственных веществ, будучи модифицированными с различными функциональными группами через стабилизирующее вещество, контрастные материалы для магниторезонансной томографии, биосенсоры, для реализации уникальных методов, таких как целевая доставка, термическая терапия, например, при нагреве лазерным или СВЧ излучением до температур разрушения расположенной вокруг патологической ткани [20] в комплексе с магнитным полем, осуществляющим доставку частиц до локальной области и пр. Всестороннее изучение по-

лученного с учетом предъявляемых к медицинским материалам требований позволяет рекомендовать магнитные наночастицы Fe_3O_4 , приготовленные в соответствии с данной методикой, для дальнейших клинических испытаний.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов

Список литературы

1. Губин С.П. и др. Магнитные наночастицы: методы получения, строения и свойства // Успехи химии. 2005. № 74 (6). С. 539–574.
2. Attarad A. et al. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles // Nanotechnol Sci Appl. 2016. Vol. 9, pp. 49–67.
3. Shen L., Li B., Qiao Y. Fe_3O_4 Nanoparticles in Targeted Drug/Gene Delivery Systems // Materials. 2018. Vol. 11 (2), pp. 324–353.
4. Ghazanfari M.R. Perspective of Fe_3O_4 Nanoparticles Role in Biomedical Applications // Biochemistry Research International. 2016. Vol. 2016, Article ID 7840161.
5. Gu H. et al. Biofunctional magnetic nanoparticles for protein separation and pathogen detection // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 2006. Vol. 0, pp. 941–949.
6. Bao Y. et al. Magnetic nanoparticles: material engineering and emerging applications in lithography and biomedicine // J Mater Sci. 2016 Vol. 51 (1), pp. 513–553.
7. Berry C., Curtis A. Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36 (13), pp. 198–206.
8. Silva V.A. J. Synthesis and characterization of Fe_3O_4 nanoparticles coated with fucan polysaccharides // J. Magn. Magn. Mater. 2013. Vol.343, pp. 138–143.
9. Hariani P.L. et.al. Synthesis and Properties of Fe_3O_4 Nanoparticles by Co-precipitation Method to Removal Procion Dye // International Journal of Environmental Science and Development. 2013. Vol. 4 (3), pp. 336–340.
10. Бибик Е.Е., Бузунов О.В. Достижения в области получения и применения ферромагнитных жидкостей. Обзоры по электронной технике // М-во электронной промышленности СССР. Серия 6 (Материалы). 1979. №7 (660). С. 22–24.
11. Spizzo F. et al. Synthesis of Ferrofluids Made of Iron Oxide Nanoflowers: Interplay between Carrier Fluid and Magnetic Properties // Nanomaterials. 2017. Vol.7, pp. 373–388.
12. Dhumal J. et al. Fe_3O_4 Ferrofluid Nanoparticles: Synthesis and Rheological Behavior // International Journal of Materials Chemistry and Physics. 2015. Vol. 1 (2), pp. 141–145.

13. Демидов А.И., Полатайко И.А. Способ получения ферромагнитной жидкости: Патент РФ на изобретение №2593392, заявка №2015121189. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 10.08.2016
14. Кнунянц И.Л. Краткая химическая энциклопедия. Том 2. М.: Книга по требованию, 1963. 1182 с.
15. Tyurikova I.A., Demidov A.I. Synthesis of Water-Based Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles, Stabilized by Oleic Acid and Mannitol // *Inorg. Mater.* 2017. Vol. 53 (4), pp. 413–418.
16. Байтукалов Т.А. и др. Превращение частиц ультрадисперсного порошка железа в организме // Тр. 11 Междунар. Плесской конф. по магнитным жидкостям. Иваново: ИГЭУ. 2004. С. 276–280.
17. Fedotcheva T.A. Prospects for Using Gold, Silver, and Iron Oxide Nanoparticles for Increasing the Efficacy of Chemotherapy // *Pharm Chem J.* 2015. Vol. 49, pp. 220–230.
18. Neuwelt E.A. et al. Ultrasmall superparamagnetic iron oxides (USPIOs): a future alternative magnetic resonance (MR) contrast agent for patients at risk for nephrogenic systemic fibrosis (NSF)? // *Kidney International.* 2009. Vol. 75, pp. 465–474.
19. Robinson I. et al. Synthesis of Co Nanoparticles by Pulsed Laser Irradiation of Cobalt Carbonyl in Organic Solution // *J. Phys. Chem.* 2009. Vol. 113, pp. 9497–9501.
20. Куликова М.В., Кочубей В.И. Синтез и оптические свойства наночастиц оксида железа для фотодинамической терапии // *Известия самарского научного центра РАН.* 2012. Т.14 (4). С. 206–209.

References

1. Gubin S.P. et al. Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties. *Russ. Chem. Rev.* 2005. Vol. 74 (6), pp. 539–574.
2. Attarad A. et al. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnol Sci Appl.* 2016. Vol. 9, pp. 49–67.
3. Shen L., Li B., Qiao Y. Fe₃O₄ Nanoparticles in Targeted Drug/Gene Delivery Systems. *Materials.* 2018. Vol. 11 (2), pp. 324–353.
4. Ghazanfari M.R. Perspective of Fe₃O₄ Nanoparticles Role in Biomedical Applications. *Biochemistry Research International.* 2016. Vol. 2016, Article ID 7840161.
5. Gu H. et al. Biofunctional magnetic nanoparticles for protein separation and pathogen detection. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 2006. Vol. 0, pp. 941–949.
6. Bao Y. et al. Magnetic nanoparticles: material engineering and emerging applications in lithography and biomedicine. *J Mater Sci.* 2016 Vol. 51 (1), pp. 513–553.

7. Berry C., Curtis A. Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36 (13), pp. 198–206.
8. Silva V.A. J. Synthesis and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles coated with fucan polysaccharides. *J. Magn. Magn. Mater.* 2013. Vol. 343, pp. 138–143.
9. Hariani P.L. et al. Synthesis and Properties of Fe₃O₄ Nanoparticles by Co-precipitation Method to Removal Procion Dye. *International Journal of Environmental Science and Development.* 2013. Vol. 4 (3), pp. 336–340.
10. Bibik E.E., Buzunov O.V. Dostizhenija v oblasti poluchenija i primenenija ferromagnitnyh zhidkostej. Obzory po jelektronnoj tehnike [Achievements in the field of obtaining and using ferromagnetic liquids. Electronic Surveys]. *Ministry of electronic technology of the USSR. Series 6 (Materials).* 1979. Vol. 7 (660), pp. 22–24.
11. Spizzo F. et al. Synthesis of Ferrofluids Made of Iron Oxide Nanoflowers: Interplay between Carrier Fluid and Magnetic Properties. *Nanomaterials.* 2017. Vol. 7, pp. 373–388.
12. Dhupal J. et al. Fe₃O₄ Ferrofluid Nanoparticles: Synthesis and Rheological Behavior. *International Journal of Materials Chemistry and Physics.* 2015. Vol. 1 (2), pp. 141–145.
13. Demidov A.I., Polatajko I.A. *Sposob poluchenija ferromagnitnoj zhidkosti* [Method for obtaining a ferromagnetic liquid]: Russian patent №2593392, application №2015121189. Registered 10.08.2016.
14. Knunjanc I.L. *Kratkaja himicheskaja jenciklopedija* [Brief Chemical Encyclopedia]. Vol. 2. Moscow: Kniga po trebovaniju publ., 1963. 1182 p.
15. Tyurikova I.A., Demidov A.I. Synthesis of Water-Based Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles, Stabilized by Oleic Acid and Mannitol. *Inorg. Mater.* 2017. Vol. 53 (4), pp. 413–418.
16. Bajtupalov T.A. Prevrashhenie chastic ul'tradispersnogo poroshka zheleza v organizme [Transformation of particles of ultradisperse iron powder in the body]. *Proceedings of 11 Intern. magnetic liquids Pless conf.* Ivanovo: IGJeU. 2004, pp. 276–280.
17. Fedotcheva T.A. Prospects for Using Gold, Silver, and Iron Oxide Nanoparticles for Increasing the Efficacy of Chemotherapy. *Pharm Chem J.* 2015. Vol. 49, pp. 220–230.
18. Neuwelt E.A. et al. Ultrasmall superparamagnetic iron oxides (USPIOs): a future alternative magnetic resonance (MR) contrast agent for patients at risk for nephrogenic systemic fibrosis (NSF)? *Kidney International.* 2009. Vol. 75, pp. 465–474.
19. Robinson I. et al. Synthesis of Co Nanoparticles by Pulsed Laser Irradiation of Cobalt Carbonyl in Organic Solution. *J. Phys. Chem.* 2009. Vol. 113, pp. 9497–9501.

20. Kulikova M.V., Kochubej V.I. Sintez i opticheskie svojstva nanochastic oksida zheleza dlja fotodinamicheskoj terapii [Synthesis and optical properties of iron oxide nanoparticles for photodynamic therapy]. *Izvestija samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2012. Vol. 14 (4), pp. 206–209.

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Тюрикова Ирина Андреевна, аспирант

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

polatayko_irina@spbstu.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Tyurikova Irina Andreevna, PhD student

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

29, Polytechnicheskaya Str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

SPIN-code: 9928-2688

ORCID: 0000-0001-9722-5916

ResearcherID: P-1232-2018

Scopus Author ID: 57193797576