

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(УО «ВГТУ»)

УДК 621.762.274:534-8

Рег. №20210818

УТВЕРЖДАЮ



Первый проректор УО «ВГТУ»

В.А.Жизневский

« 12 » 2025 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«РАЗРАБОТКА СОНОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ
УЛЬТРАМЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И ОКСИДОВ,
ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ»
(заключительный)

Научный руководитель НИР,
д.ф.м.н., профессор

В.Н. Шут

« 30 » 12 2025 г.

Начальник НИЧ

В.А. Сажин

« 30 » 12 2025 г.

Витебск 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
доктор физ.-мат. наук,
профессор, профессор
кафедры «АПП»



подпись, дата


30.12.2025

В.Н.Шут

(введение, раздел 1,2,3, 4
заклучение)

Исполнители:

Научный сотрудник



подпись, дата

С.Е. Мозжаров
(раздел 1,4)

Старший преподаватель

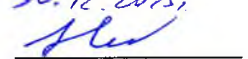


подпись, дата

30.12.2025

В.Ф. Куксевич
(раздел 1)

Студент



подпись, дата

М.А. Шлепоченко
(раздел 3)

Нормоконтролер



подпись, дата

30.12.2025

С.А. Клименкова

РЕФЕРАТ

Отчет 61 с., 1 кн., 36 рис., 79 источников

УЛЬТРАМЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ, УЛЬТРАЗВУК, ДИСПЕРСНОСТЬ, АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ

Объектом исследования являются ультрамелкодисперсные порошки металлов и оксидов.

Целью работы является разработка сонохимических методов получения ультрамелкодисперсных порошков металлов и оксидов, исследование их структуры и свойств.

В ходе выполнения работы исследованы морфология и кристалличность порошков меди при низких плотностях токов. С использованием ультразвука получены порошки содержащие медь и оксид меди. Суспензии полученного порошка полностью подавляют рост Золотистого стафилокока (*Staphylococcus aureus*), Клебсиеллы пневмонии (*Klebsiella pneumoniae*) и Синегнойной палочки (*Pseudomonas aeruginosa*).

Проведена оптимизация процесса получения магнетита с различной стехиометрией при ультразвуковом воздействии. Исследована дисперсность и морфология полученных порошков. Разработаны методы модификации указанных порошков. Исследованы их физические свойства. С использованием порошка магнетита полученного методом жидкофазного окисления и модифицированного ПВС с глутаровым альдегидом проведена магнитная сепарация цельной крови.

Методом химического восстановления с использованием ультразвука получены порошки никеля, кобальта и никель-кобальта. Показано, что использование ультразвука позволяет значительно уменьшить среднеарифметический размер частиц порошков. Термогравитационный и рентгенофазный анализ порошков показал их высокую чистоту. Проведена модификация поверхности и анализ их цитотоксичности. Порошок никеля с покрытием Au использован для магнитной сепарации лейкоцитов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Оптимизация сонноэлектрохимического процесса получения ультрамелкодисперсных порошков Cu в широком диапазоне плотностей тока; закономерности изменения дисперсности полученных порошков и их антибактериальные свойства	9
1.1 Оптимизация процесса получения ультрадисперсных порошков меди и исследование дисперсности порошков меди, полученных сонноэлектрохимическим методом при низких и высоких плотностях тока	9
1.2 Исследование антибактериальной активности порошков на основе меди	15
2 Разработка процесса получения магнетита с различной стехиометрией при воздействии ультразвука; изучение влияния стехиометрии на стабильность кристаллической структуры Fe ₃ O ₄	18
2.1 Оптимизация процесса получения магнетита с различной стехиометрией при ультразвуковом воздействии	18
2.2 Изучение стабильности порошков магнетита при термическом воздействии	24
3 Модификация поверхности порошков Fe ₃ O ₄ для использования в биомедицине и исследование их физических и биологических свойства	27
3.1 Разработка методов модификации поверхности порошков Fe ₃ O ₄	27
3.2 Исследование физических свойств модифицированных порошков	31
3.3 Исследование возможности использования модифицированных порошков Fe ₃ O ₄ в биологических применениях	35
4 Получение порошков Co, Ni, Co-Ni при воздействии ультразвука и исследование их свойств	39
4.1. Получение порошков Co, Ni, Co-Ni при воздействии ультразвука	39
4.2 Физические свойства порошков никеля, кобальта и никель-кобальта	42
4.3 Модификация поверхности порошков на основе Ni и Co для	47

использования в биомедицине и исследование их свойств	
4.4 Биологические свойства модифицированного порошка на основе Ni и его применение для магнитной сепарации	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	56

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существуют различные методы получения ультрадисперсных порошков: химические, физические, механические [1]. Несмотря на многообразие этих методов, поиск простых, экономичных и экологически безопасных способов синтеза ультрадисперсных материалов остается актуальным. В последнее время для получения мелкодисперсных и наноразмерных порошков различного назначения активно развиваются методы с применением ультразвука.

Эффекты воздействия УЗ на химические процессы в жидких средах достаточно хорошо исследованы [2]. Кроме нагрева среды и интенсификации массопереноса, воздействие УЗ вызывает кавитационные явления — образование микропузырьков, при коллапсе которых могут быть достигнуты очень высокая температуры (>5000 К), давление (>20 МПа) и скорость охлаждения ($> 10^7$ К/с), а также происходит генерация ударных волн. Благодаря этому на кавитационных пузырьках возникают дополнительные центры зародышеобразования и одновременно разрушаются агрегаты частиц под действием ударных волн. Все эти факторы благоприятствуют использованию ультразвука для получения ультрадисперсных и наноразмерных материалов. При этом, применение наноматериалов в медицине и фармакологии является приоритетным направлением.

Многие микроорганизмы за короткий период времени приобретают устойчивость, или резистентность, к антибиотикам, и это серьезная проблема для антибактериальной терапии. Приобретенная резистентность считается сегодня биологической закономерностью, которая, хотя и в разной степени, проявляется у всех микроорганизмов. К химиопрепаратам адаптируются не только бактерии, но и грибы, и вирусы. Поэтому врачи все время ищут новые подходы к профилактике и лечению, в частности - к лечению гнойно-воспалительных заболеваний. Для борьбы с ними разрабатывают и новые классы антибиотиков, и физические методы воздействия: фотодинамическую терапию, NO-терапию, воздействие низкочастотным ультразвуком (15—100 кГц), потоком гелиевой и аргоновой плазмы [3]. В качестве антисептических средств давно применяют некоторые препараты меди [4]. Установлено, что наночастицы меди обладают широким спектром антимикробного действия по отношению к грамположительным и грамотрицательным бактериям. Противогрибковые свойства наночастиц меди лишь незначительно уступают таковым у лекарственных средств содержащих хлоргексидин [5].

Особый интерес для медицины представляют и ультрадисперсные порошки, обладающие магнитными свойствами, что связано с возможностью дистанционного управления ими и конструкциями на их основе при наложении внешнего магнитного

поля. В настоящее время синтезирован широкий спектр магнитных наночастиц: на основе металлов Co, Fe, Ni, оксидов железа, а также ряда ферритов $MgFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $LiFe_5O$ [6-9]. Оксидные частицы обладают более слабыми магнитными свойствами, чем наночастицы на основе металлов, однако они более устойчивы к окислению, обладают низкой токсичностью и хорошей биосовместимостью. Наиболее широкое применение в биомедицине получили суперпарамагнитные наночастицы оксида железа, что обусловлено их низкой токсичностью и стабильностью магнитных характеристик (синтетические частицы $\gamma-Fe_2O_3$ (маггемит), Fe_3O_4 (магнетит) или $\alpha-Fe_2O_3$ (гемматит). Суперпарамагнитные порошки оксида железа являются единственными клинически одобренными наночастицами оксидов металлов и наиболее широко используемыми в различных биомедицинских применениях [10,11].

Металлические наночастицы занимают особое место среди других нанообъектов. В частности, среди них следует отметить НЧ переходных металлов, которые представляют большой интерес в связи с их относительно высокой химической активностью и такими свойствами, как каталитические [12-18], магнитные [19-22], механические [23,24], оптические [25,26], электрические [27,28] и биологические [29-32]. Это дает возможность использовать металлические НЧ в различных областях, включая катализ, медицину и физику [33]. Среди металлов Ni НЧ представляют большой интерес благодаря особым электронным, оптическим и магнитным свойствам, которые расширяют их применение в области медицины. Они используются в качестве носителя лекарств доставки к месту поражения [34], в магнитно-резонансной томографии [35]. Следует отметить, что биологически активный Co нашёл применение в виде радиоактивного Co при стерилизации медицинского оборудования, а также в качестве источника излучения для медицинской и промышленной радиографии [36].

Для биомедицинского применения наночастиц необходимо выполнить ряд требований: образовать устойчивую коллоидную систему в водных растворах и других биосовместимых растворителях, иметь возможность вариации параметров раствора в интервалах, которые определяются целью исследования в каждом конкретном случае. Однако ввиду высокой реакционной активности для наночастиц практически не существует инертной среды. Одной из особенностей поведения наночастиц в растворе является их склонность к агрегации, поэтому практическое использование растворов наночастиц требует их модификации, в частности нанесения покрытия на поверхность магнитного «ядра». Применяемые покрытия можно разделить на органические (сурфактанты и полимеры) и неорганические (кремнезем, углерод, благородные металлы). Помимо защиты от агрегации, окисления, кислотной и щелочной коррозии покрытие

может играть роль спейсера для присоединения фармацевтических агентов или биомолекул к магнитному носителю. В зависимости от того, как и чем модифицирована поверхность магнитных частиц, существуют основные области их биомедицинских применений:

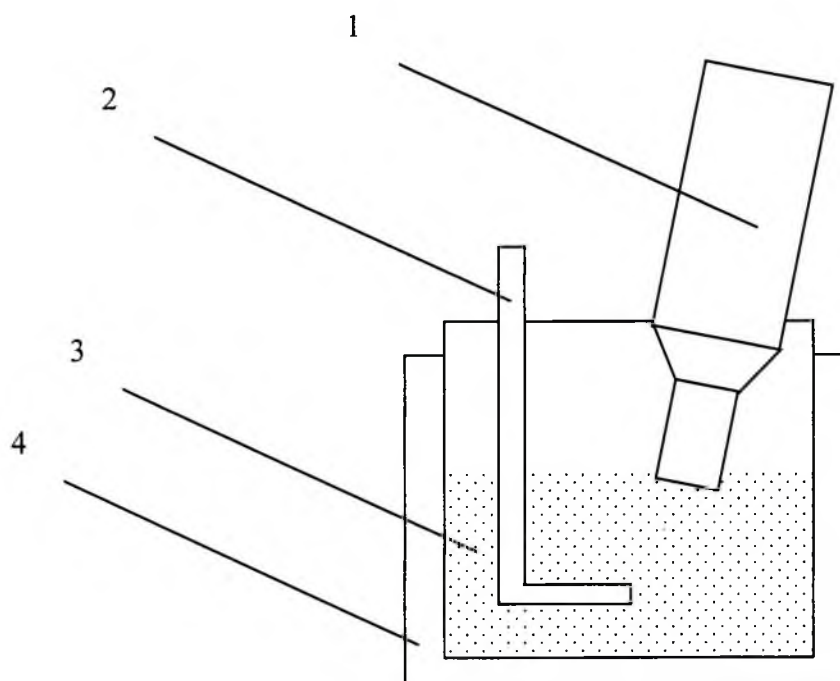
- диагностика и инструменты исследований (биосенсоры, MRI, маркеры биомолекул, биосепарация и пробоподготовка, исследования молекулярного взаимодействия);
- адресное терапевтическое воздействие (целевая доставка терапевтических молекул, управляемая локальная гипертермия опухолей).

1 Оптимизация соноэлектрохимического процесса получения ультрамелкодисперсных порошков Cu в широком диапазоне плотностей тока. Закономерности изменения дисперсности полученных порошков и их антибактериальные свойства

1.1 Оптимизация процесса получения ультрадисперсных порошков меди и исследование дисперсности порошков меди, полученных соноэлектрохимическим методом при низких и высоких плотностях тока

Для получения медных порошков использовалась система, подобная описанной Reisse [37]. Схема установки приведена на рисунке 1.1

В установке имеется два электрода, один из которых (сонород) служит одновременно и катодом и источником ультразвука. Анод изготовлен из пластинчатого медного анода АМФ толщиной 4 мм. Ультразвуковая часть установки разработана на базе генератора с рабочей частотой 22 кГц и электрической мощностью 1 кВт. В качестве сонорода используется титановый концентратор.



1- сонород; 2- анод; 3- электролит; 4-термостат;

Рисунок 1.1 - Схема установки для получения медных порошков соноэлектрохимическим методом

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нанопорошки и методы их получения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.portalnano.ru/read/prop/pro/materials/functional/4cosmos/nanoporoshki> – Дата доступа: 15.06.2016.
2. Bang, J.H. Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials/ J.H Bang., K.S Suslick. //Adv. Mater. □ 2010. □ Vol. 22. □ P1039–1059.
3. Рогаткин, Д.А. Наносеребро и микроорганизмы/ Д.А Рогаткин, О.Д. Смирнова // Химия и жизнь. –2012. – №10. – С. 38–41
4. Першин, Г.Н., Гвоздева Е.И. Учебник фармакологии/ Г.Н Першин, Е.И. Гвоздева Москва, Медгиз, . –1961 . – 403 с.
5. Воробьева, С.А. Применение в наномедицине и фармакологии наночастиц металлов и их неорганических соединений, полученных межфазным и контактным взаимодействием/ Воробьева С.А., Ржеусский С.Э.// -ВЕСТНИК РГМУ. – 6 . –2018. – С. 111-115
6. Berryl, C. C. Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine- Topical review/ Catrine. C. Berryl , Adam S. G. Curtis // J. Phys. D: Appl. Phys. – 36 . – 2003. – R198–R206
7. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine - Topical review // Q A Pankhurst [et al.]// J. Phys. D: Appl. Phys. – 36 . – 2003. – R167–R181.
8. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии/ Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко Л.Б. - М.: Металлургия, 1986. - 168 с.
9. Шут, В.Н. Морфология и дисперсность порошков магнетита, полученных при воздействии ультразвука// Шут, В.Н., С.Е. Мозжаров, В.Ф. Куксевич./ Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. 2019, №4, с. 96-100.
10. Wang, J. Magnetic-Field-Induced Growth of Single-Crystalline Fe₃O₄ Nanowires// J. Wang, Q. Chen, C. Zeng, B. Hou. / Adv. Mater. -2004.-V.16(20, P137-140
11. Cornell, R. M. The Iron Oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses/ R. M. Cornell, U. Schwertmann., U. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.–2003.– 683 p.
12. Yan, N. Nanometallic chemistry: deciphering nanoparticle catalysis from the perspective of organometallic chemistry and homogeneous catalysis / N. Yan, Y. Yuan, P.J. Dyson // Dalton Trans. – 2013. – V. 42. – P. 13294-13304.

13. Peng, G. Adsorbate diffusion on transition metal nanoparticles / G. Peng, M. Mavrikakis // *Nano Lett.* – 2015. – V. 15. – P. 629-634.
14. Scholten, J.D. Transition metal nanoparticle catalysis in ionic liquids / J.D. Scholten, B.C. Leal, J. Dupont // *ACS Catal.* – 2012. – V. 2. – P. 184-200.
15. Kim, Y. Activation energies of plasmonic catalysts / Y. Kim, D.D. Torres, P.K. Jain // *Nano Lett.* – 2016. – V. 16. – P. 3399-3407.
16. Campbell, C.T. The energetics of supported metal nanoparticles: relationships to sintering rates and catalytic activity / C.T. Campbell // *Acc. Chem. Res.* – 2013. – V. 46(8). – P. 1712-1719.
17. Yang, L. Transition-metal-ion-mediated polymerization of dopamine: mussel-inspired approach for the facile synthesis of robust transition-metal nanoparticle–graphene hybrids / L. Yang, J. Kong, D. Zhou, J.M. Ang, S.L. Phua, W.A. Yee, H. Liu, Y. Huang, X. Lu // *Chem. Eur. J.* – 2014. – V. 20. – P. 7776-7783.
18. Guisbiers, G. Size-dependent catalytic and melting properties of platinum-palladium nanoparticles / G. Guisbiers, G. Abudukelimu, D. Hourlier // *Nanoscale Res. Lett.* – 2011. – V. 6. – P. 396-401.
19. Vijayaprasath, G. Comparative study of structural and magnetic properties of transition metal (Co, Ni) doped ZnO nanoparticles / G. Vijayaprasath, R. Murugan, T. Mahalingam, G. Ravi // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2014. – P. 7205-7213.
20. Kumar, S. Magnetic and structural characterization of transition metal co-doped CdS nanoparticles / S. Kumar, S. Kumar, S. Jain, N.K. Verma // *Appl. Nanosci.* – 2012. – V. 2. – P. 127-131.
21. Issa, B. Magnetic nanoparticles: surface effects and properties related to biomedicine applications / B. Issa, I.M. Obaidat, B.A. Albiss, Y. Haik // *Int. J. Mol. Sci.* – 2013. – V. 14. – P. 21266-21305.
22. Akbarzadeh, A. Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine / A. Akbarzadeh, M. Samiei, S. Davaran // *Nanoscale Res. Lett.* – 2012. – V. 7. – P. 144-157.
23. Hu, H. Synthesis and properties of transition metals and rare-earth metals doped ZnS nanoparticles / H. Hu, W. Zhang // *Opt. Mater.* – 2006. – V. 28. – P. 536-550.
24. Meyers, M.A. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – V. 51. – P. 427-556.
25. Wobbe, M.C.C. Chemical trends in the optical properties of rocksalt nanoparticles / M.C.C. Wobbe, M.A. Zwijnenburg // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2015. – V. 17. – P. 28892-28900.

26. Arda, L. Structural and mechanical properties of transition metals doped ZnMgO nanoparticles / L. Arda, O. Ozturk, E. Asikuzun, S. Ataoglu // Powder Technol. – 2013. – V. 235. – P. 479-484.
27. Willing, S. Metal nanoparticle film based room temperature Coulomb transistor / S. Willing, H. Lehmann, M. Volkmann, C. Klinke // Nano-Struct. Nano-Objects. – 2018. – V. 14. – P. 19-48.
28. Parida, P. The electronic and magnetic properties of a few transition-metal clusters / P. Parida, A. Kundu, S.K. Pati // J. Clust. Sci. – 2009. – V. 20. – P. 355-364.
29. Jawoor, S.S. Green synthesis of nano sized transition metal complexes containing heterocyclic Schiff base: Structural and morphology characterization and bioactivity study / S.S. Jawoor, S.A. Patil, M. Kumbar, P.B. Ramawadgi // J. Mol. Struct. – 2018. – V. 1164. – P. 378-385.
30. Shin, Y. Simple preparation and stabilization of nickel nanocrystals on cellulose nanocrystal / Y. Shin, I.-T. Bae, B.W. Arey, G.J. Exarhos // Mater. Lett. – 2007. – V. 61. – P. 3215-3217.
31. Auffan, M. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective / M. Auffan, J. Rose, J.-Y. Bottero, G.V. Lowry, J.-P. Jolivet, M.R. Wiesner // Nat. Nanotechnol. – 2009. – V. 4. – P. 634-702.
32. Azam, A. Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: a comparative study / A. Azam, A.S. Ahmed, M. Oves, M.S. Khan, S.S. Habib, A. Memic // Int. J. Nanomed. – 2012. – V. 7. – P. 6003-6009.
33. Ojea, M.J.H. Nanoparticles of Ni(II) and Co(II) metallo-organic molecular materials / M.J.H. Ojea, A.P. Balague, D.R. Maneru, E.C. Sanudo // J. Nanoparticle Res. – 2014. – V. 16. – P. 2209-2217.
34. Chaudhary, J. Synthesis and biological function of Nickel and Copper nanoparticles / J. Chaudhary, G. Tailor, B.L. Yadav, O. Michael // Heliyon. – 2019. – V. 5. – N. 01878.
35. Manikandan, A. Synthesis, optical and magnetic properties of pure and Co-doped ZnFe₂O₄ nanoparticles by microwave combustion method / A. Manikandan, L.J. Kennedy, M. Bououdina, J.J. Vijay // Magn. Magn. Mater. – 2014. – V. 349. – P. 249-258.
36. Schladt, T.D. Synthesis and bio-functionalization of magnetic nanoparticles for medical diagnosis and treatment / T.D. Schladt, K. Schneider, H. Schild, W. Tremel // Dalton Trans. – 2011. – V. 40. – P. 6315-6343.
37. Reisse, J. Quantitative sonochemistry / J. Reisse [et al.] // Ultrason. Sonochem. – 1996. – № 3. – P. 147–151.

38. Zhu, J. Novel method for the preparation of lead selenide: Pulse sonoelectrochemical synthesis of lead selenide nanoparticles/ J. Zhu, S.T. Aruna, Y. Koltypin, A. Gedanken // Chem. Mater. – 2000. – Vol. 12. № 1. – P. 143–147.

39. Шут, В.Н. Физические и антибактериальные свойства ультрадисперсных порошков меди / В.Н Шут, С.Е Мозжаров, В.В. Янченко // Вестник ВГТУ. – 2016. – № 2 (31) . – С. 98-105

40. Шут, В.Н. Физические и антибактериальные свойства ультрадисперсных порошков оксида меди/ Шут В.Н. [и др.]// Актуальные проблемы физики твердого тела сборник докладов VIII Международной научной конференции 24 - 28 сентября 2018 г., Минск . –Том 3. – С. 119-121

41. Способ получения нанодисперсного порошка меди / Сименюк Г.Ю. , Образцова И.И. , Еременко Н.К. - патент RU 2426805, опубл. 20.08.2011 Бюл. № 23

42. Катасонов, П. А., Гарифуллин Р. А. Термический анализ дисперсного магнетита, синтезированного в плазменно-электролитическом процессе/ П. А.Катасонов , Р. А. Гарифуллин/ Письма о материалах .– 2013,т.3 .– С.322-325

43. Дифференциальная сканирующая калориметрия [Электронный ресурс] Режим доступа [https://ru.wikipedia.org/wiki/Дифференциальная сканирующая калориметрия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Дифференциальная_сканирующая_калориметрия) .– Дата доступа: 15.11. 2022

44. Термогравиметрия [Электронный ресурс] Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/Термогравиметрия> .–Дата доступа: 15.11. 2022

45. Юрьев, Б.П. Исследование процесса окисления магнетита/ Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. .–2016.– Т. 59. № 10 .–С. 735 – 739.

46. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости/ Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков.- М.: Химия, –1989. – 239 с.

47. Николаев, В.И. Об оценке размеров наночастиц с помощью эффекта Мессбауэра/ В.И.Николаев, А.М.Шипилин, И.Н. Захарова // Физика твёрд. тела. – 2001. – Т. 43, №. 8. – С. 1455–1457.

48. Петрановская, А.Л. Модифицирование поверхности нанокристаллического магнетита изопропилатом алюминия / А.Л. Петрановская [и др.]// Химия, физика и технология поверхности: Межвед. Сб. Науч. Тр. ИХП им. А.А. Чуйко НАН Украины. – К.: Наук. думка, 2007. – № 13. – С. 310–321.

49. Thach, C.V., Hai N.H., Chau N. / Size Controlled Magnetite Nanoparticles and Their Drug Loading Ability/ C.V.Thach ,N.H.Hai, N. Chau // Journal of the Korean Phys. Soc. – 2008. – V. 52, №. 5. – P. 1332–1335.

50. Шпак, А.П. Нанокomпозиты медико-биологического назначения на основе ультрадисперсного магнетита / А.П. Шпак [и др.]// Физикохимия наноматериалов и супрамолекулярных структур. – Киев: Наук. думка, – 2007. – Т.1. С. 45 – 87.
51. Юртов Е.В., Мурадова А.Г., Зайцева М.П.; РХТУ им. Менделеева. Способ получения магнетита. Патент № 2620422 РФ, МПК-2015.01 С1; Заявл.05.07.2016; Оpubл. 25.15.2017, Бюл.№15
52. Першина, А.Г. Использование магнитных наночастиц в биомедицине / А.Г. Першина [и др.] // Бюллетень сибирской медицины. – 2008. – № 2. – С.70–78.
53. Colombo, M. Biological applications of magnetic nanoparticles / M. Colombo [et al.] // Chem. Soc. Rev. – 2012. – Vol. 41, № 11. – P. 4306–4334.
54. Lu, A.-H. Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application, Reviews /An-Hui Lu, E. L. Salabas, Ferdi Schuth // Angew. Chem. Int. Ed. – 2007. – № 46.– P. 1222–1244.
55. Ito, Akira Medical Application of Functionalized Magnetic Nanoparticles / Akira Ito [et al.] // Journal of bioscienceand bioengineering. – 2005. –Vol. 100, № 1. – P. 1–11.
56. Bonnemain, B. Superparamagnetic Agents in Magnetic Resonance Imaging: Physicochemical Characteristics and Clinical Applications, a Review / B. Bonnemain // Journal of Drug Targeting. – 1998. – Vol. 6, № 3. – P. 167–174.
57. Pankhurst, Q.A. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine - Topical review // Q.A. Pankhurst [et al.] // J. Phys.D: Appl. Phys. – 36. – 2003. – R167–R181.
58. Martinez-Mera, I. Synthesis of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles without surfactants at room temperature / I. Martinez-Mera[et al.] // Materials Letters – 61. – 2007. – P. 4447–4451.
59. Bruce, Ian J. Surface Modification of Magnetic Nanoparticles with Alkoxysilanes and Their Application in Magnetic Bioseparations // Ian J. Bruce, Tapas Sen // Langmuir. – 2005. – 21. – P. 7029–7035.
60. Muppalaneni, S. Polyvinyl Alcohol in Medicine and Pharmacy: a Perspective / Srinath Muppalaneni, Hossein Omidian // J Develop Drugs. – 2013. – V. 2, Is. 3. – P. 1–5.
61. Rahayu, Lale Budi Hutami Synthesis and Characterization of Fe₃O₄ nanoparticles using polyvinyl alcohol (PVA) as capping agent and glutaraldehyde (GA) as crosslinker / Lale Budi Hutami Rahayu [et al.] // International Conference on Chemistry and Material Science (IC2MS) // 2017 IOP Publishing IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 299. – 2018.
62. Kim, S.Y. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol-grafted Fe₃O₄ magnetic nanoparticles through glutaraldehyde [Electronic resource] / Su Yeon Kim, B. Ramaraj

- and K. R. Yoona // *Surf. Interface Anal.* – 2012. – Published online in Wiley Online Library. – Mode of access: wileyonlinelibrary.com/journal/sia.
63. Krishnan, Kannan M. Biomedical Nanomagnetism: A Spin Through Possibilities in Imaging, Diagnostics, and Therapy /Kannan M. Krishnan//*IEEE Transactions on Magnetics.* – 2010. –Vol. 46, № 7. – P. 2523–2558
64. Partington, K. M. A novel method of cell separation based on dual parameter immunomagnetic cell selection/ K M Partington, E J Jenkinson, G Anderson // *J Immunol Methods.* –1999. –Mar 4. – 223(2) . – P. 195-205
65. Yan, N. Nanometallic chemistry: deciphering nanoparticle catalysis from the perspective of organometallic chemistry and homogeneous catalysis / N. Yan, Y. Yuan, P.J. Dyson // *Dalton Trans.* – 2013. – V. 42. – P. 13294-13304.
66. Peng, G. Adsorbate diffusion on transition metal nanoparticles / G. Peng, M. Mavrikakis // *Nano Lett.* – 2015. – V. 15. – P. 629-634.
67. Scholten, J.D. Transition metal nanoparticle catalysis in ionic liquids / J.D. Scholten, B.C. Leal, J. Dupont // *ACS Catal.* – 2012. – V. 2. – P. 184-200.
68. Kim, Y. Activation energies of plasmonic catalysts / Y. Kim, D.D. Torres, P.K. Jain // *Nano Lett.* – 2016. – V. 16. – P. 3399-3407.
69. Campbell, C.T. The energetics of supported metal nanoparticles: relationships to sintering rates and catalytic activity / C.T. Campbell // *Acc. Chem. Res.* – 2013. – V. 46(8). – P. 1712-1719.
70. Yang, L. Transition-metal-ion-mediated polymerization of dopamine: mussel-inspired approach for the facile synthesis of robust transition-metal nanoparticle–graphene hybrids / L. Yang, J. Kong, D. Zhou, J.M. Ang, S.L. Phua, W.A. Yee, H. Liu, Y. Huang, X. Lu // *Chem. Eur. J.* – 2014. – V. 20. – P. 7776-7783.
71. Guisbiers, G. Size-dependent catalytic and melting properties of platinum-palladium nanoparticles / G. Guisbiers, G. Abudukelimu, D. Hourlier // *Nanoscale Res. Lett.* – 2011. – V. 6. – P. 396-401.
72. Vijayaprasath, G. Comparative study of structural and magnetic properties of transition metal (Co, Ni) doped ZnO nanoparticles / G. Vijayaprasath [et al.] // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2014. – P. 7205-7213.
73. Kumar, S. Magnetic and structural characterization of transition metal co-doped CdS nanoparticles / S. Kumar [et al.] // *Appl. Nanosci.* – 2012. – V. 2. – P. 127-131.
74. Issa, B. Magnetic nanoparticles: surface effects and properties related to biomedicine applications / B. Issa [et al.] // *Int. J. Mol. Sci.* – 2013. – V. 14. – P. 21266-21305.

75. Akbarzadeh, A. Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine / A. Akbarzadeh, M. Samiei, S. Davaran // *Nanoscale Res. Lett.* – 2012. – V. 7. – P. 144-157.
76. Hu, H. Synthesis and properties of transition metals and rare-earth metals doped ZnS nanoparticles / H. Hu, W. Zhang // *Opt. Mater.* – 2006. – V. 28. – P. 536-550.
77. Meyers, M.A. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – V. 51. – P. 427-556.
78. Рудаковская П.Г. Новые бифункциональные органические лиганды для модификации наночастиц золота и магнетита и гибридные материалы на их основе: синтез, свойства, возможности применения/ П.Г. Рудаковская // диссертация на соискание степени кандидат химических наук – Москва. –. –2015 .- 185 с.
79. Тризна, Н. М., Мамчиц, Л. П. Основы материаловедения в стоматологии. Методы токсиколого-гигиенической оценки стоматологических материалов/ Н. М. Тризна, Л. П. Мамчиц// Гомель: УО «Гомельский государственный медицинский университет», 2007. — 44 с.