

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

Инженерлік физика кафедрасы

Өмірзақ Аңсат Оразалыұлы

«Магнетит нанобөлшектерінің суперпарамагниттік қасиеттерін зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B072300 – «Техникалық физика» мамандығы

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

Инженерлік физика кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

«Инженерлік физика»

кафедра меңгерушісі

PhD доктор

_____ Р.Е. Бейсенов

« ____ » _____ 2020 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Магнетит нанобөлшектерінің суперпарамагниттік қасиеттерін зерттеу»

5B072300 – «Техникалық физика» мамандығы

Орындаған

Өмірзақ Аңсат

Пікір беруші:

PhD доктор

_____ Умирзаков А.Г.

Ғылыми жетекшісі:

PhD доктор

_____ Лесбаев А.Б.

« ____ » мамыр 2020 ж.

« ____ » мамыр 2020 ж.

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

Инженерлік физика кафедрасы

5B072300 – «Техникалық физика» мамандығы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

«Инженерлік физика»

кафедра меңгерушісі

PhD доктор

_____ Р.Е. Бейсенов

«_____» _____ 2020 ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: *Өмірзақ Аңсат*

Тақырыбы: *Магнетит нанобөлшектерінің суперпарамагниттік қасиеттерін зерттеу*

Университет ректорының «_____» _____ 2020 ж. №__ бұйырығымен бекітілген

аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «_____» мамыр 2020 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері: *магнетит нанобөлшектерін синтездеу және суперпарамагниттік қасиетке ие екендігіне көз жеткізу*

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер:

а) *магнетиттің шығу тарихына және алу жолдарына шолу;*

б) *магнетитті синтездеу әдістерін қарастыру және салыстыру.*

Ұсынылған негізгі әдебиет атауы: *1 Резинкина М. М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной пространственной конфигурации // Журнал технической физики.–2009.–Т.79. № 8.–С.8–17.*

2 Lesbayev A. B., Elouadi B., Borbotko T. V., Manakov S. M., Smagulova G. T., Voiprav O. V, Prikhodko N. G. Influence of Magnetite Nanoparticles on Mechanical and Shielding Properties of Concrete // Eurasian Chemico-Technological Journal – 2017. – Vol.19. № 3. – P. 223-229.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдер	ескертулер
Әдеби шолу	қантар 2019 ж	
Тәжірибелік бөлім	наурыз 2019 ж	
Дипломдық жұмысты қорғау	мамыр 2019 ж	

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жобаға) қойған **қолтаңбалары**
(жұмысқа қарасты тараулардың нұсқаумен)

Бөлім атауы	Кеңесшілер, (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Тәжірибелік жұмыстар	PhD Лесбаев А.Б		
Нормоконтролер	Ассистент Сарсембаева Б.Д		

Ғылыми жетекші

_____ Лесбаев А.Б

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

_____ Өмірзақ А.О.

Күні

« » _____ 2020 ж

АНДАТПА

Қазіргі таңда медицинаның дамуына байланысты көптеген ішкі дертті емдеуге болады. Бұл жетістіктің тікелей нанотехнологияға байланысты екені белгілі. Магнетит нанобөлшегі адам денсаулығына зиянсыз болғандықтан ісік ауруларын емдеуге таптырмас қажетті зат. Сол себепті осы нанобөлшектерді синтездеу және оның әдістерінің тиімділігін анықтау бітіру жұмысында баяндалды.

Бітіру жұмысы 39 беттен, 20 суреттен тұрады. Жұмысты орындау процесі кезінде 35 әдебиет көзі қолданылды және оларға бағдар қолданылған өлшемге сай жасалды.

Кілт сөздер: магнетит, нанобөлшек, суперпарамагнетизм, химиялық конденсация әдісі, сұйық фазалық жану әдісі, гистерезис тұзағы, сканерлеуші электрондық микроскоп, рентгеноқұрылымдық анализ.

Бұл жұмыста химиялық конденсация және сұйық фазалық жану әдістері арқылы магнетит нанобөлшектері алынды, мөлшері, құрылымы және суперпарамагниттік қасиетке зерттелді. Екі әдісті салыстыра отырып тиісінше шешім шығарылды.

Бітіру жұмысы мынадай бөлімдерден тұрады: Кіріспе, әдеби шолу, тәжірибелік бөлім, нәтижелерді талдау.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время в связи с развитием медицины можно лечить множество внутренних заболеваний. Известно, что это достижение напрямую зависит от нанотехнологии. Магнетит является незаменимым веществом для лечения опухолевых заболеваний, так как наночастица не вредна здоровью человека. Поэтому синтез этих наночастиц и определение эффективности его методов были изложены в выпускной работе.

Выпускная работа состоит из 39 страниц, 20 рисунков. В процессе выполнения работы использовано 35 источников литературы и составлено в соответствии с применяемыми критериями.

Ключевые слова: магнетит, наночастица, суперпарамагнетизм, метод химической конденсации, метод жидкофазного горения, петля гистерезиса, сканирующий электронный микроскоп, рентгеноструктурный анализ.

В этой работе были получены наночастицы магнетита с помощью химической конденсации и методов жидкофазного горения, изучены размеры, структура и суперпарамагнитные свойства.

Выпускная работа состоит из следующих разделов: введение, литературный обзор, практическая часть, анализ результатов.

ABSTRACT

Currently, due to the development of medicine, many internal diseases can be treated. It is known that this achievement depends directly on nanotechnology. Magnetite is an essential substance for the treatment of tumor diseases, since the nanoparticle is not harmful to human health. Therefore, the synthesis of these nanoparticles and the determination of the effectiveness of its methods were described in the final paper.

The final work consists of 39 pages, 20 pictures. In the course of the work, 35 literature sources were used and compiled in accordance with the applicable criteria.

Keywords: magnetite, nanoparticles, superparamagnetism, the method of chemical condensation, the method of solution combustion, hysteresis loop, scanning electron microscope, x-ray structure analysis.

In this work, magnetite nanoparticles were obtained using chemical condensation and liquid-phase combustion methods, and the size, structure, and superparamagnetic properties were studied.

The final work consists of the following sections: introduction, literature review, practical part, analysis of results.

ТҮСІНДІРМЕЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

Бұл жұмыста төменде келтірілген түсіндірмелер мен қысқартулар қолданылды:

Fe_3O_4 – Магнетит

СЭМ – Сканерлеуші электрондық микроскоп

ХК – Химиялық конденсация

СФЖ – Сұйық фазалық жану

ИММА – Иммуноанализ

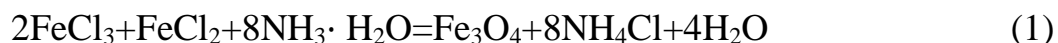
МАЗМҰНЫ

	КІРІСПЕ	9
1	ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ	10
1.1	Заттағы магнит өрісі	10
1.2	Нанотехнология	12
1.2.1	Нанобөлшек түрлері	12
1.2.2	Нанобөлшек қолдану аясы	15
1.2.3	Нанобөлшектерді синтездеу әдістері	16
1.3	Суперпарамагнетизм	17
1.3.1	Стонер-вольфарт бөлшектері	18
1.3.2	Гистерезис тұзағы	19
1.4	Магнетит	20
1.4.1	Магнетиттің физикалық және химиялық қасиеттері	20
1.5	Магнетитті синтездеу жолдары	21
1.5.1	Сұйық фазалық жану әдісі	21
1.5.2	Золь гель әдісі	22
1.5.3	Химиялық конденсация әдісі	23
1.6	Магнетит нанобөлшегін заманауи технологияда қолдану	23
1.7	Зерттеу әдістері	24
1.7.1	Электрондық және оптикалық микроскопия	24
1.7.2	Магнетит нанобөлшегінің магниттік қасиеттерін зерттеу	26
2	ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ	27
2.1	Магнетит нанобөлшегін алу	27
2.1.1	Магнетит нанобөлшегін ХК әдісі бойынша синтездеу	27
2.1.2	Магнетит нанобөлшегін СФЖ әдісі арқылы синтездеу	28
3	НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ	30
3.1	ХК әдісімен алынған магнетит нанобөлшегін зерттеу	30
3.2	СФЖ әдісімен алынған магнетит нанобөлшегін зерттеу	32
	ҚОРЫТЫНДЫ	35
	ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	36

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта магниттік нанобөлшектер ғылым мен техниканың әртүрлі саласында кеңінен қолданылады. Бұл мәлімдеме құрамына кіретін магниттік материалы бар полимерлі матрица болып табылатын композиттік бөлшектерге және магниттік қасиеттері бар біртекті құрамдас бөлшектерге де қатысты. Бүгінгі күні магнитті нанобөлшектердің көптеген өкілдері белгілі, олардың ішінде әртүрлі темір оксидтері, никель және кобальт нанобөлшектері. Ішіндегі ең танымалы – магнитит нанобөлшектері, мысалы, медицинада, биотехнологияда және технологияда (магниттік толтырылған полимерлі микросфералар) композиттік жүйелердің бөлігі ретінде сәтті қолданылады. Бұған, атап айтқанда, жасушалардың бөлінуі, дәрі-дәрмектердің мақсатты жеткізілуі, ақуыздардан тазарту және оқшаулау, ферменттердің иммобилизациясы, магниттік-резонанстық бейнелеу, гипертермия, иммунодиагноз жатады.

Магнетит нанобөлшектерін қолдану, ең алдымен, магнетиттің қажетті дисперстілігін алу әдісінің қарапайымдылығымен және оның басқа магниттермен салыстырғанда қоршаған орта әсеріне қатысты инерттілігімен байланысты. Ғылыми және патенттік әдебиеттерде Fe_3O_4 магнетит нанобөлшектерін алу әдістері кеңінен сипатталған. Сонымен қатар, иммуноанализ және клиникалық диагностика саласындағы заманауи технологиялардың жоғары дамуы, магниттік нанобөлшектерге бұрыннан да қатты жаңа талаптар қояды. Иммуноанализде (ИММА) және клиникалық диагностикада қолданылатын магнетит нанобөлшектерінің бүгінгі таңдағы қажетті негізгі сипаттамалары – қалдық магниттелудің болмауы (суперпарамагнетизм), нанобөлшектердің тар мөлшерде таралуы және магниттік сезімталдықтың жоғары мәні. Магнетиттің магниттік сезімталдығы негізінен оның кристалды құрылымымен анықталады және оны алу реакциясының жағдайына байланысты:



Жоғарыда көрсетілген реакциямен сипатталған магнетитті синтездеу әдісі 1900 жылдан бастап белгілі болды, алайда магнетиттің нанобөлшектері түзілуінің нақты механизмі әлі де жақсы зерттелмеген. Fe (II) тұзы Fe (OH)₂-де гидролизденеді және сулы оксидтермен әрекеттесіп магнетит түзеді деп есептеледі.

1 ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

1.1 Заттағы магнит өрісі

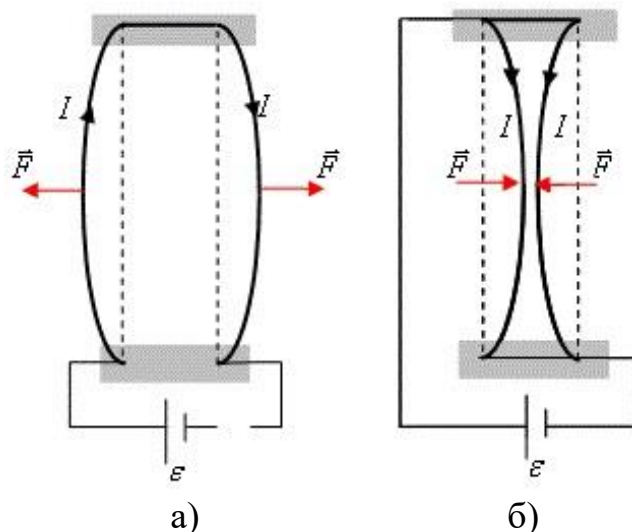
Қозғалыстағы заряд магнит өрісін тудырады. Сымдардан аққан өтетін ток күші үлкен болса, магнит өрісі де үлкен болады. Сымды орам қылып жасау арқылы үлкен магнит өрісін алуға болады. Сондай-ақ, ферромагнит материал таяқшасын электромагнитке енгізу арқылы магнит өрісін күшейтсе болады. Дыбыс зорайтқыштар, қозғалтқыштар және көлікті жабуға арналған орталық жүйедегі қуатты құлыптар секілді жерлерде электромагниттер қолданылады. Асқын өткізгіш сымдармен қуатты электромагниттер жасауға болады. Олар аса көп мөлшердегі токтың қолданылуына мүмкіндік береді, өйткені асқын өткізгіштің кедергісі болмайды, және олар қызбайды. Асқын өткізгіштердің кемшілігі жоғары температураларда жұмыс жасай алмайтындығында [4].

Магнит өрісі пайда болатын ортаға тәуелді. Тоғы бар өткізгіш кернеулігі H магнит өрісін тудырады, ток өзгерген жағдайда кернеулік те өзгереді. Магниттік индукция векторлық шама, сонымен қатар көп жағдайда кернеулік және магниттік индукция векторының бағыты бірдей болады. кернеулік пен магниттік индукция арасында тікелей пропорционалдық $B = \mu_a H$ формуласымен көрсетіледі, мұндағы μ_a - абсолют магниттік өтімділік.

Абсолют магниттік өтімділігі μ_a бұл сан берілген ортада магнит тұрақтысынан қанша есе үлкен екенін көрсетеді және салыстырмалы магниттік өтімділік деп аталады, яғни $\mu = \mu_a / \mu_0$. Магниттік өтімділік ферромагниттік денелерден басқа денелер үшін және ауа үшін бірге тең деп алынады. Ферромагниттік денелерде магниттік өтімділігі бірден әлдеқайда артық және де берілген материал үшін тұрақты шама болып қалмайды, оның магниттік жағдайына, яғни ферромагниттік магниттелген дененің магниттік индукциясына тәуелді болады.

Егер электр тоғы жүріп жатқан екі немесе бірнеше өткізгіштерді бір-біріне параллель орналастырсақ, онда бұл өткізгіштер өзара тартылады немесе тебіседі, яғни өздеріндегі токтардың бағытына байланысты. Әрбір тоғы бар өткізгіштің айналасында магнит өрісі пайда болуының нәтижесінде өткізгіштерінің осылай өзара әрекеттесуі пайда болады.

Біріне бірі қарсы бағытта өтіп жатқан токтары бар екі (1-сурет) а және б өткізгіштерін қарастырамыз. Суреттің төменгі бөлігінде көрсетілгендей бұранда ережесіне сәйкес осы өрістердің магниттік сызықтары бағытталған. Егер де өткізгіштер бойымен жоғарыдан қарасак, онда, а өткізгішінің айналасындағы магниттік сызықтары сағат тілінің бағытымен, ал б өткізгішінде сағат тіліне қарсы бағытталған.



1 Сурет - Тоғы бар өткізгіштердің әрекеттесуі: а - қарсы бағыттар, б - бірдей бағыттар

Өткізгіштердің арасындағы магнит сызықтары кеңістікте бірдей бағытта болады және өткізгіштер бірімен-бірі тебіседі, яғни магниттің аттас полюстары өзара тебісетіні сияқты. Егер де осы өткізгіштер арқылы бір бағыттағы токтар жіберсек (1 б-сурет), онда өткізгіштер айналасында туатын магнит өрісінің сызықтары өткізгіштер арасындағы кеңістікте қарама-қарсы бағытта болады. Өткізгіштердің өзара тартылатындығы сондықтан.

Заттардың магниттік қасиеттерін қарастыру кезінде оларды магнетиктер деп атаймыз. Барлық заттарды сыртқы магнит өрісіне енгізгенде заттар сыртқы магнит өрісінде өзінің меншікті магнит өрісін тудырады, яғни олар азды-көпті магниттеледі. Барлық материалдар магниттік қасиеттер көрсетуіне байланысты 3-ке бөлінеді:

- 1 Диамагнетиктер - сыртқы магнит өрісіне меншікті магнит өрісі қарсы бағытта болады. Нәтижесінде сыртқы магнит өрісі диамагнетиктердегі магнит өрісінен көп болады.
- 2 Парамагнетиктер - сыртқы магнит өрісі мен меншікті магнит өрісі бағыттас болады. Нәтижесінде сыртқы магнит өрісі парамагнетиктердегі магнит өрісінен кем болады.
- 3 Ферромагнетиктер сыртқы магнит өрісін көп есе күшейтеді.

Магниттелу векторы физикалық векторлық шама, яғни заттардың магниттелу дәрежесін сипаттау үшін енгізілген. Бірлік көлемдегі магнит моменттерінің қосындысын магниттелу векторы деп атайды.

Бүгінде тұрақты магниттер адам өмірінің көптеген салаларында пайдалы қолданыс табады. Кейде біз олардың қатысуын байқамаймыз, бірақ әр түрлі электр құралдары мен механикалық құрылғылардағы кез келген пәтерде, егер мұқият қарайтын болсақ, тұрақты магнитті табуға болады. Электр моторлары және динамик, бейнежазба және қабырға сағаты, ұялы телефон және микротолқынды пеш, тоңазытқыштың есігі, барлық жерде тұрақты магниттерді

кездестіруге болады. Олар медициналық техникада және өлшеу аппаратурасында, түрлі құрал-саймандарда және автомобиль өнеркәсібінде, тұрақты ток қозғалтқыштарында, акустикалық жүйелерде, тұрмыстық электр аспаптарында және көп жерде қолданылады: радиотехника, аспап жасау, автоматика, телемеханика және т.б. - осы салалардың бірде-бірі тұрақты магниттерді пайдаланбай жүрмейді.

1.2 Нанотехнология

Нанотехнология – кеңістіктің нанометрлік өлшеміндегі молекулалық жүйелерге, молекулаларға, жеке атомдарға әсер ету арқылы жаңа физикалық және химиялық қасиеттері бар молекулалар, наноқұрылымдарды, наноқұрылғыларды және материалдарды алу мүмкіндіктерін зерттейтін қолданбалы ғылым . Бір метрдің миллиардтан бір бөлігін нанометр дейміз (1 нанометр= 10^{-9} метр).

Нанобөлшек (ағылш. nanoparticle) – барлық үш өлшемде көлемі 1-ден 100 нм-ге дейін болатын қоршаған ортамен айқын белгіленген шекарасы бар оқшауланған қатты фазалы объект. Оқшауланған ультрадисперсті объектілерді белгілеу үшін, көп жағдайда бұрын белгілі терминдерді қайталайтын (коллоидты бөлшектер, ультрадисперсті бөлшектер), бірақ олардан анық белгіленген өлшемдік шекаралармен ерекшеленетін ең жалпы терминдердің бірі. 1 нм-ден кем өлшемді қатты бөлшектер әдетте кластерлерге, 100 нм-ден астам бөлшектер субмикрондарға жатады.

Дегенмен, нанобөлшектер қазіргі ғылымның ашылуы болып саналады, олар іс жүзінде ежелгі тарихы бар. Нанобөлшектерді кәстрөлдің бетінде жалтыраған әсерді жасау үшін Месопотамияда тоғызыншы ғасырда колөнершілер пайдаланған.

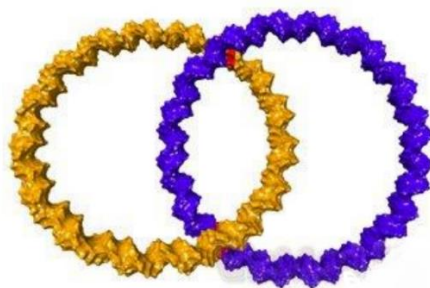
Тіпті осы күндері, Ренессанс және ортағасырлардан қалған керамика алтын немесе мыс түсті ерекше металл жылтырлығын сақтап қалған. Бұл жылтыр шынының мөлдір бетіне салынған металл пленкадан туындайды. Егер пленка атмосфералық тотығуға және басқа да атмосфералық әсерлерге қарсы болса, жылтыр әлі де сақталуы мүмкін[6].

1.2.1 Нанобөлшек түрлері

Кеңінен айтатын болсақ нанобөлшектерге келесілерді жатқызуға болады: органикалық макроциклді қосылыстардағы ірі молекулалар; (катенандар, ротаксандар, тораптар); полимерлер мен дендримерлер молекулалары; фуллерендер, нанотүтіктер, наносфералар, наноцилиндрлер, наноталшықтар, наножіп, нанодискі және т.б.; жақында ашылған графен, көміртеқ

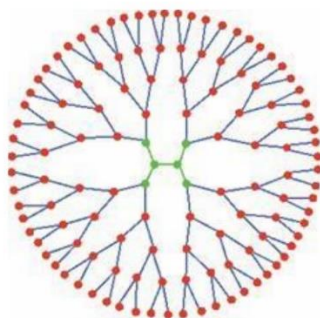
нанобөлшектерінің құрылысы негізінде жатқан; нанотрубоктардан, фуллерендерден және басқа нанобөлшектерден комбинациялар; нанобөлшектер.

Катенандар және олармен байланысты құрылымдар. Әзірге өте қызықты ковалентті емес макроциклді синтезделген құрылымдар - катенаналар, ротаксанттар, тораптар[7]. Бұл күрделі молекулаларда фрагменттер арасындағы химиялық байланыс орнына, бұл фрагменттер механикалық түрде жалғанған болуы мүмкін. Мысалы, катенандарда фрагменттер өзара тізбектегі буындар сияқты тіркелген. Мұндай химиялық тізбек құрылымдары кейде бір-біріне бұралған көптеген циклдік буындар секілді болады.



2 Сурет - Катенан құрылымының суреті

Дендримерлер. Макромолекулалық қосылыстар химиясы да үлкен жетістіктерге жетті. Сызықтық және тармақталған құрылымның әдеттегі полимерлерімен қатар дәстүрлі емес жоғары молекулалық қосылыстар - дендримерлер, сонымен қатар олардың әрі қарай полимерлену өнімдері - дендриттік полимерлер алынды. Дендример сыртқы түрі бойынша бір тамырдан өсетін ағаштың тәжіне ұқсайды (ағылш. Dendritic - ағаш тәрізді)[8]. Дендример молекуласында көп тармақталған молекулалық тізбектер (бұтақтар немесе денрондар) кететін реакция орталығы (тамыр) бар. Дендример синтезі кезең-кезеңмен жүзеге асырылады.

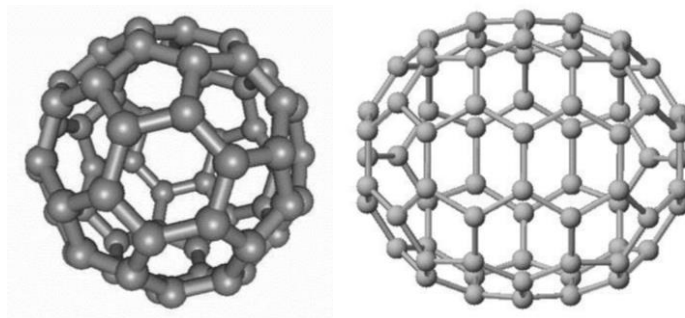


3 Сурет - Дендример құрылымының суреті

Фуллерендер. Нанохимияның үлкен жетістігі – фуллерен, бұл жаңалық көміртектің тағы бір аллотропты модификациясы болып табылатын (алмаздан,

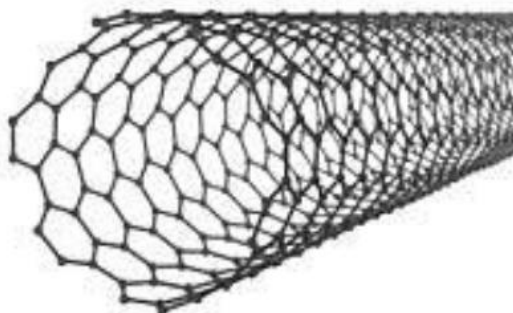
графиттен және карбинадан кейін). Фуллерен өз атауын американдық сәулетші Ричард Фуллердің (1895-1983) атымен аталды. Ол 1967 жылы Монреалда өткен көрмеде АҚШ павильонының күмбезін артикулярлық пентагондар мен алтыбұрыштар түрінде жасаған[9].

Алғаш рет фуллеренді 1985 жылы ағылшын ғалымы Крото және оның серіктестері анықтаған. Олар оны қатты графит үлгісіне қуатты лазер сәулесінің әсерінен пайда болатын көміртегі плазмасынан тапты . 1990 жылы Кретчмер мен Хоффман және серіктестері C_{60} қатты фуллеренін алды [10]. Олар оны екі көміртекті электрод арасындағы электр доғасындағы көміртекті атомизациялау нәтижесінде пайда болған күйеден бөліп алды.



4 Сурет - Фуллерен C_{60}

Нанотүтікшелер. Басқа да көміртекті нанобөлшектер алынды. бірақ оның құрылысы мен қасиеттері бойынша ерекшеленетін фуллерен. 1991 жылы жапон ғалымы Ииджима алды көміртекті нанотрубкалар [11]. Қабылданды олар графенді жазықтықтарды тегістеу жолымен түзіледі деп саналсын. жоғары температурада жіксіз түтіктер. Графен туралы әлі де әңгіме болады. Көміртекті нанотрубкаларды алу әдістері, құрылысы және қасиеттері шолуда [12].



5 Сурет - Нанотүтікше құрылымдық суреті

Нанотүтікшелер диаметрі бірден бірнеше ондаған нанометрге (нм) және ұзындығы бірнеше сантиметрге дейін жетеді.

1.2.2 Нанобөлшек қолдану аясы

Нанобөлшектерді қолдану келесі бағыттарда жүреді: машина жасау, электроника және оптоэлектроникада, информатикада, энергетикада, ауыл шаруашылығында, денсаулық сақтау саласында, экологияда және әскери өндірісте.

Денсаулық сақтау саласында - нанотехнология препараттарды әзірлеуде, тиімділігі жоғары нанопрепаративті формалар мен препараттарды аурудың фокусына жеткізу әдістерін жүзеге асыруды қамтамасыз етеді. Медициналық технология саласында (диагностикалық құралдарды жасау, жарақаттанбайтын операциялар, жасанды мүшелер жасау) кең перспективалар ашылады. Жалпыға белгілі, денсаулық сақтау нарығы әлемдегі ең маңыздылардың бірі болып табылады, сонымен бірге ол нашар құрылымдалған, және жетік зерттелмеген және орындалатын міндеттер гуманитарлық сипатта болады.

ДНҚ талшықтарымен қапталған алтынның коллоидтық бөлшектері ДНҚ-ның спецификалық комплементарлығын талдау үшін қолданылады [13]. Әдіс комплементарлы ДНҚ будандау түстің өзгеруімен бірге коллоид агрегациясына әкеледі.

Жақында органикалық шаблондар негізінде ферромагнитті сұйықтықтар алынды. Мұндай магнитті гидродинамикалық жүйелерді пайдалану принтерлерге арналған түсті магнитті сиялардың жаңа түрлерін жасауға мүмкіндік берді.

Медицинада ұзақ уақыт бойы адам ағзасының қажетті органдарына көптеген гидрофобты типті фармакологиялық препараттарды тасымалдау және жеткізу проблемасы бар. Нанобөлшектерді пайдалану осы мәселені шеше алады, ағза тіндерімен гидрофобты заттардың тікелей игерілуін қамтамасыз ету. Ісіктермен күрестің жаңа әдісінің авторлары жақын диапазондағы инфрақызыл сәулеленудің аралас әсерін қолданды. Ең бастысы нан шариктер мөлшері эритроциттерден шамамен 20 есе аз.

Информатикада - ақпаратты беру, өңдеу және сақтау жүйелерінің өнімділігін бірнеше есе арттыру, сонымен қатар есептеу жүйелерінің мүмкіндіктерін интеллект элементтерімен тірі объектілердің қасиеттеріне жақындата отырып, өнімділігі жоғары құрылғылардың жаңа архитектураларын құру; мамандандырылған компоненттері өздігінен білім алуға және үйлесімді әрекеттерді жасауға қабілетті функционалды жүйелерді басқару және үйлестіру мақсатына жету. Жартылай өткізгішті нанобөлшектер гетерогенді нанокатализде кеңінен қолданылады, олар жалпақ дисплейлерді, жарық диодтары мен датчиктерді шығаруда лазерлік технологияны жасаушыларды да қызықтырады.

1.2.3 Нанобөлшектерді синтездеу әдістері

Нано өлшемді материалдарды синтездеу әдісі екі топқа бөлінеді, олар төменнен жоғары және жоғарыдан төмен. Егер синтез атомдар мен молекулалардың жиналуы арқылы нанобөлшектердің пайда болуымен жүретін болса, онда бұл төменнен жоғары бөліміне жатады. Егер наноматериалдар макроматериалдарды механикалық немесе химиялық әдістермен жою арқылы алынған болса, онда бұл жоғарыдан төмен бөліміне жатады.

Сонымен қатар, синтездеу әдісінің жағдайына байланысты нанобөлшектерді химиялық, физикалық және биологиялық әдістермен алуға және тұрақтандыруға болады. Химиялық тәсіл – бұл золь-гель әдісі, тотығу әдісі, химиялық конденсация әдісі, гидротермиялық реакциялар, ағынды айдау әдісі, нанореакторларды қолдана отырып синтездеу, сұйық фазалы жану әдісі, электрохимиялық, интерфейстегі синтез, сонохимиялық ыдырау реакциялары, сұйықтықтың суперкритикалық әдісі.

Физикалық әдістер - бұл газды тұндыру, макроэлементтердің дисперсиясы, электронды сәулелік литография және басқалар. Көптеген әдістер нанобөлшектердің соңғы өлшемдерін дәл бақылауға мүмкіндік бермейді.[14]. Биологиялық әдістер бактериялар мен өсімдік жасушалары сияқты тірі ағзаларды қолданады, бұл организмдер кең таралған нанобөлшектерді шығаруда үлкен әлеуетке ие.

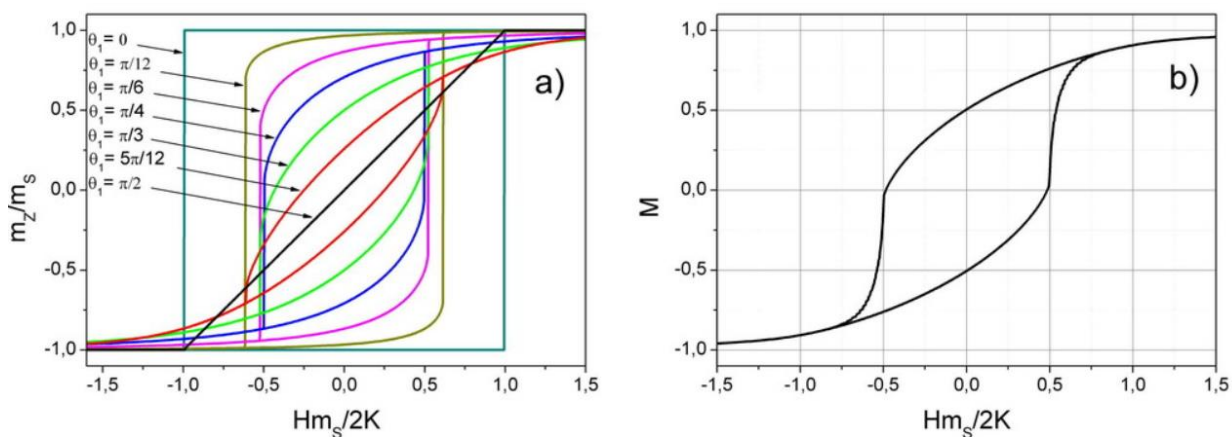
Fe_3O_4 нанобөлшектерінің қасиеттері дайындық әдісі мен тәжірибелік синтез жағдайларына байланысты. Соңғы жылдары Fe_3O_4 нанобөлшектерін синтездеуге арналған көптеген мақалалар пайда болды.[15] құрамында темір және темір тұздары бар сулы ерітіндідегі гидролиз арқылы мөлшері 37 және 9 нм болатын Fe_3O_4 нанобөлшектерін синтездеу әдісі сипатталған. Авторлар алынған нанобөлшектердің магниттік қасиеттерін молярлық қатынасты (Fe_{2+}) және (Fe_{3+}) темір иондарын, сонымен қатар бөлшектердің мөлшерін өзгерту арқылы басқаруға болатындығын көрсетті [16] авторлары гидролиз арқылы 15 нм қашықтықтағы суперпарамагниттік магнетитті нанобөлшектерді алды, авторлар нанобөлшектердің мөлшері магниттік қасиеттерге әсер ететінін анықтады. [17]-де химиялық тұндыру кезінде қанығу шегі 65 emu/g магниттелуімен 17 нм өлшемді магнетит нанобөлшектері алынды. [Chin S.F., Pang S.C., Tan C.H. Green synthesis of magnetite nanoparticles (via thermal decomposition method) with controllable size and shape // J. Mater. Environ. Sci. – 2011. № 2 (3). – P. 299 – 302] термиялық ыдырау арқылы орташа өлшемі 9 нм болатын суперпарамагниттік қасиеті бар Fe_3O_4 нанобөлшектері синтезделген. Ғалымдардың көптеген зерттеулері суперпарамагниттік қасиеттері бар бөлшектерге қызығушылық танытатынын көрсетті.

1.3 Суперпарамагнетизм

Суперпарамагнетизм – бұл ферромагниттік және феррагниттік бөлшектерде көрінетін магниттің бір түрі. Егер мұндай бөлшектер өлшемі өте аз болса, онда олар бір домендік күйге өтеді, яғни олар бүкіл көлемде біркелкі магниттеледі. Мұндай бөлшектердің магниттік моменті температураның әсерінен бағытты кездейсоқ өзгерте алады, ал сыртқы магнит өрісі болмаған кезде суперпарамагниттік бөлшектердің орташа магниттелуі нөлге тең болады. Бірақ сыртқы магнит өрісінде мұндай бөлшектер Кюри немесе Нель нүктелерінен төмен температурада да парамагниттер сияқты әрекет етеді. Алайда, суперпарамагниттердің магниттік сезімталдығы парамагниттерге қарағанда әлдеқайда көп[19].

1.3.1 Стонер-вольфарт бөлшектері

Анизотропты бірдоменді бөлшектер ансамблінің магниттік қасиеттерін түсіндіру бойынша алғашқы жұмыстар ағылшын физиктері Стонер және Вольфартпен орындалған. Магнитті және магнитті емес металдардың кейбір қатты ерітінділерін олардың арақатынасының белгілі бір интервалында зерттеу таза ферромагнетикаға тән емес коэрцитивтіліктің экстремалды жоғары мәнін көрсетті.



- анизотропияның жеңіл осіне (1) әртүрлі бұрышпен магниттелетін бір бөлшектер үшін гистерезис тұзағы (m_z — бөлшектердің магниттелу проекциясы магниттік өріс бағытына h , m_s — бөлшектердің магниттелуі, H — магниттік өріс, K — бір осьтік анизотропия константы).
- кеңістіктегі жеңіл осьтердің бірқалыпты бөлінген бағыттары бар бөлшектер ансамбліне арналған қайта магниттелу қисығы (m — ансамбльдің магниттілігіне нормаланған бөлшектер ансамблінің магниттілігі)

6 Сурет - $T = 0$ К кезінде бір осьті анизотропиясы бар бірдоменді бөлшектер үшін Стонермен және Вольфартпен есептелген қайта магниттеу қисықтары

Стонер мен Вольфарт қарапайым және сол уақытта осы нәтижелерді сәтті түсіндіруді ұсынды. Олар мұндай қатты ерітіндіде магнитті және магнитті емес фракцияларға ыдырау болады деп болжады, нәтижесінде нанометрлік масштабтағы ферромагнитті бөліктер түзіледі, бірқалыпты, бірақ магнитті емес ортада реттелмеген. Мұндай кішкентай бөлшектердің бір домендік болуына энергетикалық тұрғыдан пайдалы екендігі туралы пікірлерге сүйене отырып, олардың әрқайсысындағы магниттелудің кері айналуы бөлшек ішіндегі иондардың барлық магниттік моменттерін когерентті айналу арқылы жүреді, ал бұл өз кезегінде магниттеу кезінде бөлшектердің магниттелуінің абсолютті мәні өзгермейді деп болжайды. Осы идеяларға сүйене отырып, ғалымдар әртүрлі бөлшектердің ансамбльдері үшін $T = 0$ К-ге арналған магниттелудің реверсивті қисықтарын есептеді. Алынған нәтижелер эксперименттік мәліметтермен жақсы келісілді және нанобөлшектерді магниттендірудің осындай теориясы танылды және бүгінде танымал болып келеді. Сондықтан магниттелу реверсивтілігі оның магниттелуінің абсолютті мәнін өзгертпестен жүзеге асырылатын бір домендік анизотропты бөлшек әдетте стонер-вольфарт бөлшегі (СВ бөлшегі) деп аталады[20].

1.3.2 Стонер-вольфарт бөлшектерінің күйлері

Ланжевен бөлшектері ансамблінің магниттік қасиеттерінен айырмашылығы, онда анықтайтын ішкі параметр бөлшектердің магниттік моменті (нақты жүйелерде, осы параметрдегі дисперсия), ал сыртқы параметр - температура, SV бөлшектері ансамблінің магниттік қасиеттері көптеген қосымша параметрлерге байланысты. Олардың ішіндегі ең маңыздысы - бөлшектердің анизотропиясы және олардың ансамбльде өзара орналасуы. Сыртқы параметрлердің қатарына температурадан басқа ансамбльдің бастапқы күйі (ол тепе-тең емес болуы мүмкін) және ансамбльді бақылау уақыты, өлшеу уақыты қосылады. Магнит өрісінің мәндерінің белгілі бір диапозонында әр бөлшектің болуы, мысалы, униаксиалды анизотропия, магниттік моменттің бағдарларының фазалық кеңістігінде екі энергия минималын бөлетін кедергінің пайда болуына әкеледі. Әр минимумдағы өмір сүру ұзақтығы кедергінің биіктігімен және температурамен анықталады. Мұндай ансамбльде термодинамикалық тепе-теңдікті орнату белгілі бір температураға тән релаксация уақыты бар кедергі арқылы магниттік моментті термиялық активтендірілген қайта бағыттау арқылы жүреді.

Бұл процесс жүйені бақылау уақытына (өлшеу уақыты) және әр эксперименттің температуралық сипатына байланысты уақытында

жүретіндіктен, ансамбльдің магниттік күйін шартты түрде екі түрге бөлуге болады: блокталған және ашылған.

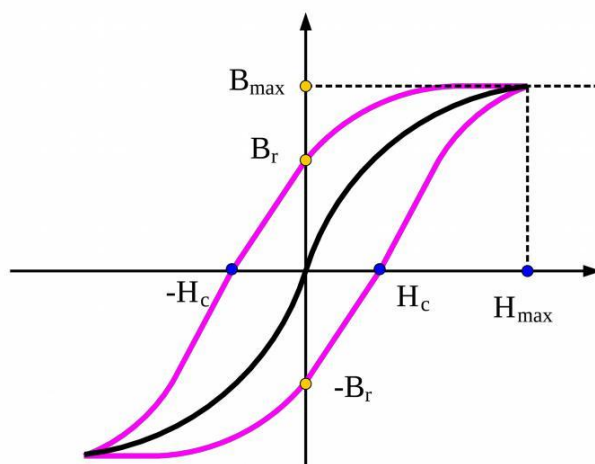
1)Блокталған жай-күй температураның барлық учаскесіне, әрбір экспериментальды нүктеде жүйе белгіленген өлшеу уақытында өзінің тепе-тең жағдайына жақындауға үлгермейтін кейбір тән температурадан төмен сәйкес келеді. Мұндай жағдайдың нәтижесі ретінде жүйенің магнитті қасиеттерінде магнит өрісінің тартылуымен магнитостатикалық өлшеу жағдайында коэрцитивтіліктің және қисық қайта магниттеудің қалдық магниттілігінің (реманенттілігінің) пайда болуына сәйкес келетін жүйенің метастабильділігіне байланысты блоктау әсерлері пайда болады.

2)Ашылған күйі характерлік температурадан жоғары температураның барлық бөлігіне сәйкес болады. Бұл температуралық учаскеде жүйе релаксация уақытымен салыстырғанда аз болып сипатталады және әрбір эксперименттік нүктеде жүйе өзінің осы нүктесіне сәйкес тепе-тең жағдайға жақындауға үлгереді. Нәтижесі ретінде бұғаттау әсерлері іс жүзінде көрсетілмейді [21][22].

1.3.3 Гистерезис тұзағы

Кез келген электромагниттің өзекшесінде токты ажыратқаннан кейін қалдық магнетизм деп аталатын магнитті қасиеттердің бір бөлігі сақталады. Қалдық магнетизм мөлшері өзек материалының қасиеттеріне байланысты және шыныққан Болатта және жұмсақ темірде аз мәнге жетеді. Алайда, қалай да жұмсақ темір болса да, қалдық магнетизм, егер аспаптың жұмыс істеу шарттары бойынша оның өзекшесін магниттеу, яғни нөлге дейін магниттеу және қарама-қарсы бағытта магниттеу қажет болған жағдайда белгілі әсер етеді. Шын мәнінде, электромагнит орамасында ток бағытын өзгерткен кезде (өзекшеде қалдық магнетизм болуына байланысты) алдымен өзекшені магнитсіздендіру қажет, содан кейін ғана ол жаңа бағытта магниттелген болуы мүмкін. Ол үшін қарама-қарсы бағыттың магниттік ағыны қажет. Басқаша айтқанда, өзекшенің магниттелуінің өзгеруі (магниттік индукция) орамамен жасалатын магниттік ағынның тиісті өзгерістерінен (магнит өрісінің кернеулігі) әрдайым артта қалады. Бұл магниттік индукцияның магнит өрісінің кернеулігінен артта қалуы гистерезис деп аталады. Өзекшені әрбір жаңа магниттеу кезінде оның қалдық магнетизмін жою үшін өзекшеге қарама-қарсы бағыттағы магниттік ағынмен әрекет етуге тура келеді.

Гистерезис тұзағы - магниттеудің сыртқы өрістің кернеулігіне тәуелділігін бейнелейтін қисық. Тұзақ ауданы көп болған сайын, магниттеуге үлкен индукция қажет.



7 Сурет – Гистерезис тұзағы

Қалдық индукция: $H=0$ кезінде сақталатын B_r индукция шамасы қалдық индукция деп аталады. H_c магнит өрісінің кернеулігі B индукциясын нөлге айналдыру үшін қажет коэрцитивті күш деп аталады.

1.4 Магнетит

1.4.1 Магнетиттің физикалық және химиялық қасиеттері

Магнетит (Fe^{3+} , Fe^{2+}) Fe_3O_4 формуласы бар минерал. Плиний ақсақалдың айтуынша, «Магнес» - атаудың шығу тегі грек тілінен шыққан. Ида (Греция) осы минералды ашқан аңызды шопанның есімімен аталған. Кристалдық құрылымы: кристалдар кубтық сингонияда, симметрияның гексаоктаэдрлі түрі.

Магнетит - оксидті темір кендерінің негізгі құрамдас бөлігі-темір кварциттер, магнетитті скарн және карбонатит кендері, сондай-ақ магнетитті "Қара теңіз құмдары"



8 Сурет - Магнетит минералы

Ірі өнеркәсіптік кен орындары-қисық мүйіз (Украина) және Курск магнитті аномалияның темір кварциттары. Сондай-ақ Магнитогорск, биік және рақым таулары (Орал). (Ірі кристалдар). Дашкесан кен орнының скарларында (Өзірбайжан). Кирун және Луоссаваара-Сев. Швеция, оз. Жоғарғы, АҚШ, П-лабрадор, Канада. Бушвельд, ОАР, кен таулары (Саксония) және т. б.[23][24].

1.5 Магнетитті синтездеу жолдары

1.5.1 Сұйық фазалық жану әдісі

Сұйық фазалық жану әдісі – қолдануға оңай, жылдам және энергияны үнемдеумен ерекшеленеді. Бұл процесс әртүрлі материалдардың жоғары таза және біркелкі нанобөлшектер ұнтақтарын өндіруде қолданылады. Бұл әдіс нанобөлшектердің кең ауқымын синтездеу үшін әмбебап болып табылады, соның ішінде алюминий оксидінің де нанобөлшектері ұнтағы бар. Сұйық фазалық жанумен синтездеу кезінде Сұйық фазалық жанумен синтездеу кезінде әдетте тұздар, нитраттар, металл сульфаттары және карбонаттар тотықтырғыш және қалпына келтіретін реагенттер ретінде, отын ретінде глицин, сахароза, несепнәр немесе басқа суда еритін көмірсутектер қолданылады. Алынатын ұнтақ әдетте металл оксидтерінің комбинациясы болып табылады және бір фазалы өнімдерді алу үшін өңдеуден өтуі қажет қажет. Сұйық фазалық жану әдісі реакция қыздырумен басталатынды, содан кейін экзотермиялық реакция болады, нәтижесінде ұнтақ түрінде соңғы өнім пайда болады. Бұл әдістің артықшылығы біртекті ультрадисперсті ұнтақтарды жылдам өндіру. Бұл жоғары жылдамдықпен жылу бөлетін экзотермиялық процесс болғандықтан жарылыс қаупі бар, сондықтан белгілі бір қауіпсіздік шараларын сақтай отырып жүзеге асырылуы тиіс.

[25] жұмыста Fe_3O_4 магнетит нанобөлшектерін сұйық фазалы жану әдісімен ауасыз ортада синтездеді. Эксперименттерде сұйықтықтың жануы кезінде пайда болатын газдардың шығарындысы есебінен ауаның түсуін болдырмайтын перфорацияланған резеңке тығыннан жасалған қақпағы бар колбаны қолданған. Синтездеу процесінде улы немесе қол жетімсіз реактивтер пайдаланылмады және сыртқы энергия қажет болмады. Глицин (отын) мен темір нитраты (тотықтырғыш) арасындағы тотығу реакциясы нәтижесінде орташа мөлшері 57,3 нм болатын магнетит нанобөлшектері синтезделді. Глицин (отын) мен темір нитраты (тотықтырғыш) арасындағы тотығу реакциясы нәтижесінде орташа мөлшері 57,3 нм болатын магнетит нанобөлшектері синтезделді. [26] Жұмыстың авторлары жанармай ретінде сахароза, лимон қышқылы және глюкозаны, ал темір нитратын тотықтырғыш ретінде қолданды. Магнетит нанобөлшектерінің синтезі ауада және ауасыз ортада жүргізген. Ауаның қатысуымен жану реакциясын жүргізу оттегінің

әсерінен $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$ + дейін тез тотығуға әкелді, сондықтан реакцияның соңғы өнімі магнетит $\alpha-Fe_2O_3$ және $\gamma-Fe_2O_3$ нанобөлшектердің қоспасы болды. Ауасыз ортада Fe_3O_4 мөлшері 10 нм (глюкоза) мен 18 нм (лимон қышқылы) аралығындағы кристаллиттермен синтезделді. Пайдаланылған отынға байланысты магнетит ұнтақтарының беткі қабаты $56 \text{ м}^2/\text{г}$ (лимон қышқылы) аралығында $106 \text{ м}^2/\text{г}$ (глюкоза) аралығында болды. Осылайша, бұл зерттеулер нанобөлшектердің сұйық фазалы жану арқылы синтезі синтезделген нанобөлшектердің мөлшерін реактивтердің концентрациясын өзгерту арқылы басқаруға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді. Алынған бөлшектердің тазалығы және әдістің тиімділігі нанобөлшектерді өнеркәсіптік масштабта өндіруге мүмкіндік береді.

1.5.2 Золь-гель әдісі

Материалтану ғылымында золь-гель әдісі – бұл қатты материалдарды молекулалардан жинау болып табылады. Бұл әдіс металл оксидтерін өндіру үшін, әсіресе кремний және титан оксидтерін өндіруде қолданылады. Бұл процесс мономерлерді коллоидты ерітіндіге (золь) айналдыруды, содан кейін оны гельге айналдыруды қамтиды. Коллоидтық жүйе дисперсті фазаның бөлшектерінен құралған кеңістіктік желіде орналасқан сұйық дисперсиялық ортадан тұрады.

Золь-гель әдісімен нанобөлшектерді синтездеу бірнеше сатылардан тұрады. Алдымен, коллоидты ерітінді гидролиз және поликонденсация реакциясын пайдаланып алынады, онда бөлшектердің мөлшері ондаған нанометрден аспайды. Әрі қарай бөлшектер арасындағы қосылыстар жүзеге асырылады және коллоидтық жүйе гель түрінде алынады, онда молекулалар немесе бөлшектер тұрақты гидроксидтер желісінде болады. Сондай-ақ, гелден еріткішті алу әдісін таңдау өте маңызды, бұл соңғы өнімнің сапасы мен қасиетіне әсер етеді. Золь-гель әдісінің жалпы ерекшелігі - ақырғы синтез өнімінде нанобөлшектері болады және наноқұрылымдары әр түрлі болады. Осы әдіс қорғаныш жабындарын, жұқа қабықшалар мен талшықтар, наноөлшемді ұнтақтар және макроскопиялық оптикалық элементтерді алу үшін және медицинада кеңінен қолданылады. Бұл әдісті қолдану туралы толығырақ ақпаратты [27] табуға болады.

[28] жұмысында орташа мөлшері 8 нм болатын магнетитті нанобөлшектер синтезделді. Синтез этил спиртін ($EtOH$) қолдану арқылы суперкритикалық жағдайда золь-гель әдісімен жүзеге асырылды.

Золь-гель әдісімен синтезге деген қызығушылық 1800 жылдан бастап байқалды, ол кезде тетраэтилортосиликаттың (ТЭОС) гидролизі SiO_2 талшықтар мен монолиттер түрінде түзілуіне әкелетінін байқады. Бұл бағыттағы зерттеудің маңыздылығы 1990 жылдары артқанын 35000-нан астам жұмыстардың золь-гель әдісіне арналғаны дәлелдейді.

1.5.3 Химиялық конденсация әдісі

Наноматериалдарды химиялық конденсация әдісімен синтездеу синтез процесінде нанобөлшектердің мөлшерін бақылау мүмкіндігін береді. Магнетитті нанобөлшектерді химиялық тұндыру арқылы синтездеу әдісінің принципі темірдің екі- не үшвалентті тұздарының сілтілік ортаға түсуіне негізделген.

Шпинель құрылымы бар Fe_3O_4 синтезінің ең көп таралған әдістеріне гидроксидтерді темір тұздарының ерітіндісіне қосу жолымен су ерітіндісінде бірге тұндыру, сондай-ақ стабилизаторлардың қатысуымен қайнайтын органикалық ерітінділерде темірдің металлорганикалық қосылыстарының термиялық ыдырауы кіреді .

Авторлар темір тұздарын пайдалана отырып, сондай-ақ рН 9-11 кезінде аммоний гидроксидінің 25% ерітіндісін су ерітіндісінде бірге тұндыру әдісімен магнетит нанобөлшектерін алу жөніндегі мәліметтерді келтіреді. Мөлшері $7,84 \pm 0,05$ нм және $6,3 \pm 0,2$ нм болатын магнетит нанобөлшектері алынды. Жұмыста тетраметиламмоний гидроксидімен наномангнетит синтезі бойынша нәтижелер келтірілген, алынған бөлшектер суперпарамагнит қасиетіне ие. Реймер әдісімен көмегімен бөлме температурасында 10-нан 20 нм-ге дейін магнетитті нанобөлшектерді синтездеді. Жұмыс авторлары су және этил спиртінің ерітіндісінде тұндыру әдісімен 15 нм-ден 58 нм-ге дейінгі нанобөлшектердің мөлшері бар кубтық формадағы наномангнетитті синтездеді.

Химиялық конденсация әдісінің басты артықшылығы – реагенттердің химиялық құрамын, ортаның температурасы мен рН-ын өзгерту арқылы құрылымдық, өлшемдік, морфологиялық және магниттік қасиеттерін реттей отырып нанобөлшектерді синтездеуге болады.

1.6 Магнетит нанобөлшегін заманауи технологияда қолдану

Жоғарыда айта кеткендей заттың наноөлшемге көшу кезінде магниттік қасиеттерінің айтарлықтай өзгеруіне жол ашады. Магнит өрісі болмаған кезде және Кюри нүктесінен жоғары температурада суперпарамагниттік нанобөлшектер қарапайым магниттер сияқты әрекет етеді, яғни олардың магниттік моменттері кездейсоқ орналасады, бірақ сыртқы өріс әсер еткенде олар өріс бойымен бағыттас бұрылып, күшті жалпы магниттік момент жасайды. Бұл механизм әртүрлі мақсаттарда, соның ішінде магнитті-резонанстық бейнелеу (MRI) негізінде қолдануға болады. Бұл әдіс ұзақ уақыттан бері теориялық тұрғыдан белгілі болды, бірақ оның практикалық қолданылуын алынған суреттердің контрастын денені құрайтын табиғи заттардың өте аз мөлшері (мысалы, дезоксигемоглобин) қамтамасыз ететіндігімен шектелді. Әдістің тиімділігі мен кескіннің контрастын SPION деп аталатын (superparamagnetic iron oxide, SPION) темір оксидтерінің суперпарамагниттік нанобөлшектерін қолданудың

арқасында айтарлықтай жақсартуға болады. Магнетит (Fe_3O_4), магемит (Fe_2O_3 гаммасы) немесе олардың комбинациясы негізінде жасалған мұндай бөлшектер табиғи түрде коллоидтық жүйенің тұрақтылығын арттыратын және денемен биологиялық үйлесімділігін қамтамасыз ететін зат қабатымен жабылуы керек. Магнитті-резонанстың сипатталған әдісінің артықшылығы - бұл сұйықтықтың көп мөлшерін қамтитын тіндердің айқын суреттерін алуға мүмкіндік береді (мысалы, зардап шеккен мүшелер немесе қатерлі ісіктер). Қазірдің өзінде мұндай нанобөлшектерді бірнеше ұйымдар коммерциялық жолмен шығарады SPION бөлшектерінің бетін контраст агенттерімен, белгілі бір ұлпалармен немесе жасушалар түрлерімен әрекеттесу мүмкіндігін беру үшін одан әрі химиялық жолмен өзгертуге болады. Бұл тәсіл өте перспективті, ол әр түрлі биомедициналық зерттеулердің белсенді дамып келе жатқан салаларының пайда болуына әкелді.

1.7 Зерттеу әдістері

1.7.1 Электрондық және оптикалық микроскопия

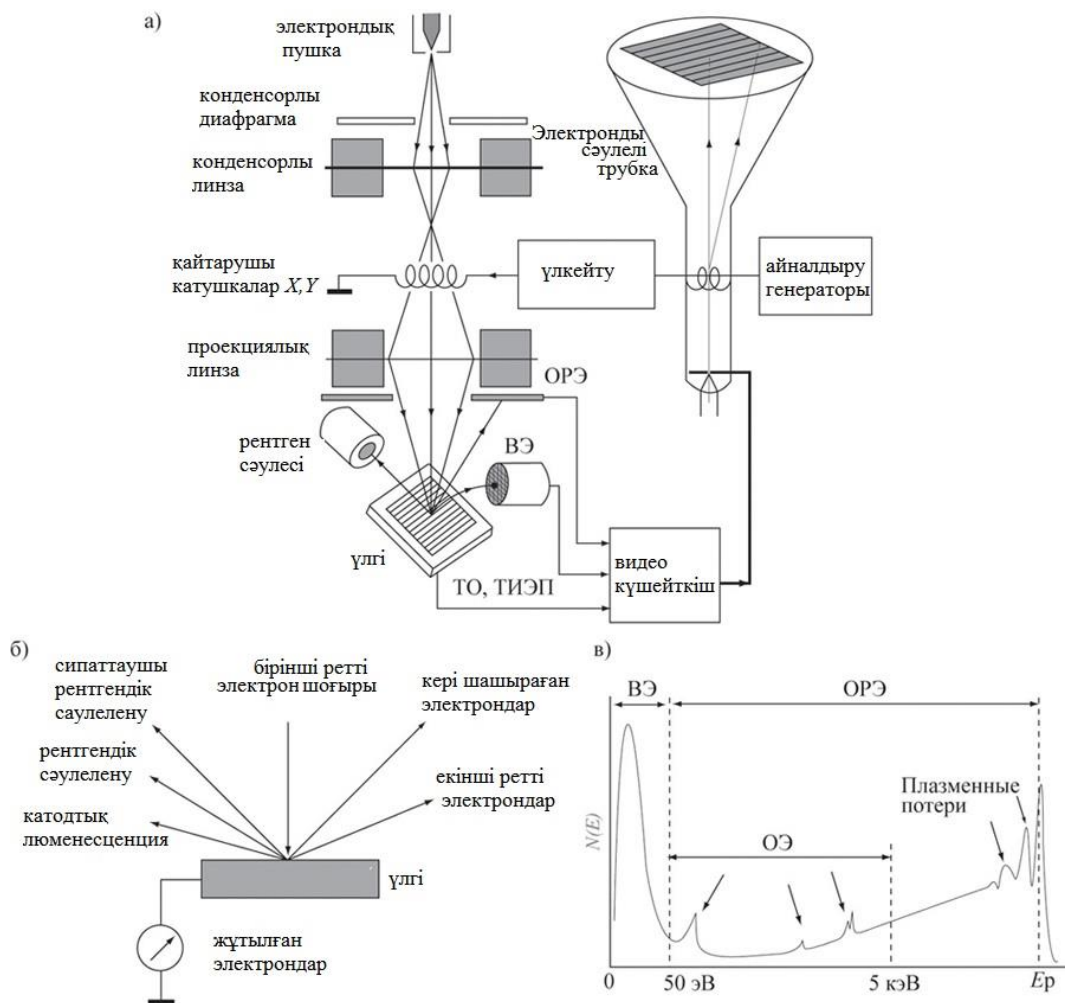
Алынған магнетит нанобөлшектерінің құрылымын, мөлшерін және морфологиясын зерттеу Quanta 200i 3D (FEI, АҚШ) маркалы 30 Кв үдеткіш кернеумен сканерлейтін электронды микроскопында жүргізілді. (әл-Фараби ат. ҚазҰУ ашық түрдегі нанотехнологиялар зертханасы., Алматы, Қазақстан).

Бұл модел ғылыми және өндірістік ортадағы үлгілерді дайындау және ақауды анализдеу, материалдарды анықтауға арналғын зеттеуші құрал болып табылады. Сипаттамасы: электрондық сәулелік рұқсат етілу көрсеткіші - 3.5 nm 30 kV жоғары вакуумды режим, үдетуші кернеу - 200V – 30kV, тоқ – 1 μA дейін, ионды сәулелі рұқсат етілу көрсеткіші – 10 nm (суреттер 12, 13).

Өндірістік вакуумдегі жағдайда зерттелуші үлгі орташа энергиялы фокусталған электрондық шокпен сканерленеді. Сигналды тіркеу механизміне сәйкес сканерлі электронды микроскоптың бірнеше жұмыс істеу режимдері болады: шағылған электрондар режимі, екінші ретті электрондар режимі, катодолюминесценция режимі және т.б. қолданылған әдістер үлгінің тек жоғарғы қабатының қасиеттерін ғана емес, сонымен бірге оларды алуға және көріністендіруге мүмкіндік береді.



9 Сурет - СЭМ моделі Quanta 3D 200i



10 Сурет - СЭМ-нің жұмыс істеу принципін көрсететін схемалық диаграмма

б – бірінші ретті электрондармен бетті сәулелендіру кезінде генерацияланатын сигналдар типі, в – үлгіден шығатын E_0 энергиямен сәулеленетін электрондардың энергетикалық спектрі.

1.7.2 Магнетит нанобөлшегінің магниттік қасиеттерін зерттеу

Магнетит нанобөлшектері үлгілерінің салыстырмалы магниттік өткізгіштігі олардың магниттік моментінің мәндерін және олардың ішіндегі магнит өрісінің кернеулігін өлшеу нәтижелерін пайдалана отырып, есептеу жолымен зерттелген. Үлгілердің магниттік моментін өлшеу Cryogenic 14TVibrating Sample Magnetometer вибрациялы магнитометрінде жүргізілді. Қондырғы мынадай құрылғылардан тұрады: электрондық өлшеу блогы; зерттелетін материал үлгісінің кварцты ұстағышы бар шток; механикалық тербеліс генераторы; көрсетілген құрылғыларды қосу тәртібі 11-суретте көрсетілген



11 Сурет - Вибрациялық магнитометр жүйесінің жиналу схемасы

Ұнтақ наномагнетит үлгісі пластикалық түтікке салынып, шток бекіткіштерінің арасында бекітілді. Механикалық тербелістердің генераторы ретінде электродинамикалық дауыс зорайтқыш қолданылды. Генератордан үлгіге тербелістерді беру шток арқылы орындалды. Үлгінің тербеліс амплитудасы 0,03 м, жиілігі – 200 Гц болды. Тербеліс амплитудасын тұрақтандыру үшін сыйымдылық датчигі қолданылды. Электрондық өлшеу блогы келесі модульдерден тұрады: басқару модулі, фазалық детектор, қуат көзі, өлшеу катушкаларынан түсетін сигнал күшейткіші, гармоникалық сигнал генераторы, гармоникалық сигнал генераторының қуат күшейткіші, Холл датчигі, өлшеу катушкалары.

Өлшеуіш катушкалардан келген сигнал фазалық детектрден және күшейткіштен кейін Холл датчигіне түседі. Үлгінің магнит моментінің мәндерін және оның ішіндегі магнит өрісінің индукциясын өлшеу нәтижелері дербес компьютердің көмегімен өңделеді. Үлгінің салыстырмалы магнитті өткізгіштігін есептеу келесі формулаға сәйкес орындалды:

$$\mu = \frac{M}{V \cdot H} + 1 \quad (2)$$

мұндағы μ - өлшемсіз бірліктерде үлгінің салыстырмалы магнитті өткізгіштігінің шамасы;

V - үлгі көлемі, м³;

M - үлгінің магниттік моменті, А·м²;

H - үлгінің ішіндегі магниттік өрістің кернеулігі, А/м.

Өлшеулер сыртқы магнит өрісінің индукция мәндерінде жүргізілді, тең - 14...14 Тл 0,02 Тл қадаммен өзгерген. Өлшеудің салыстырмалы қателігі ± 1 %. Қателіктің көзі 10-2 Гц құрайтын үлгінің тербеліс жиілігінің тұрақсыздығы болып табылады. Ол қоректену көзі элементтерінің және механикалық тербеліс генераторының электрлік параметрлерінің тұрақсыздығымен байланысты болуы мүмкін .

2 ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ

2.1 Магнетит нанобөлшегін алу

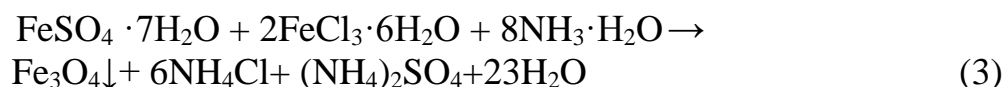
2.1.1 Магнетит нанобөлшегін химиялық конденсация әдісі бойынша алу

Магнетит нанобөлшектер қарапайым және тиімді синтез болып табылатын химиялық конденсация әдісі арқылы алынды. Әдебиеттерге шолу – химиялық конденсация әдісі, пайдаланылатын реагенттердің температурасы мен стехиометриялық қатынасын өзгерте отырып, синтезделген магнетит нанобөлшектерінің мөлшерін, құрылымын және физика-химиялық қасиеттерін басқаруға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді.

Магнетитті нанобөлшектерді синтездеу үшін келесі жабдықтар мен химиялық шыны ыдыстар қажет: термометр, аналитикалық баланс, қыздырылған магниттік араластырғыш, пеш, штатив, ыстыққа төзімді 1 литрлік колбалар, шыны ыдыстар. FeSO₄ • 7H₂O темір сульфаты, темір үшхлориді FeCl₃• 6H₂O және жоғары химиялық реагенттер қажет аммиактың 25% сулы ерітіндісі NH₄OH • H₂O.

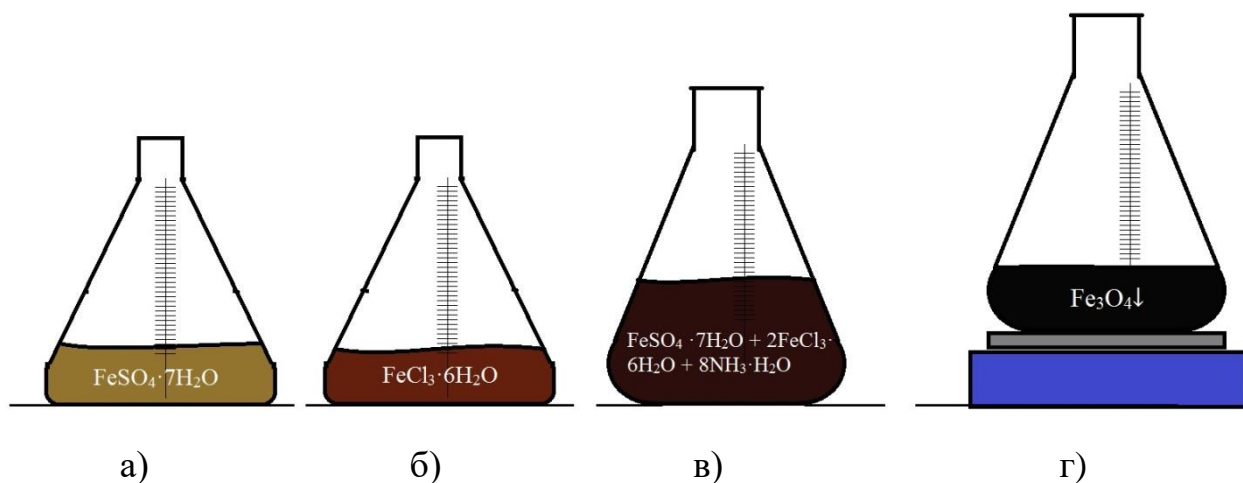
Синтез процесі темір тұздарының екі сулы ерітіндісін дайындаудан басталады. Темір сульфатының молярлық массасы 0,2 моль/литр су ерітіндісін дайындау үшін, 325 мл дистилденген суда 18,064 г FeSO₄•7H₂O ерітілді. Молярлық массасы 0,32 моль/литр болатын темір үшхлоридінің сулы ерітіндісін дайындау үшін, 325 мл дистилденген суда 28,11 г FeCl₃•6H₂O ерітілді. Темірдің дайындалған сулы ерітінділері ыстыққа төзімді колбаға

құйылып, магниттік араластырғышпен біркелкі араластырылды. Темір тұздарының сулы ерітіндісінің температурасы қатаң 50°C деңгейінде сақталды. $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ аммиактың 25% сулы ерітіндісін секундына бір тамшы жылдамдықпен темір тұздарының ерітіндісіне қосылды. $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ аммиақының сулы ерітіндісін толығымен тамғаннан кейін, магнетит нанобөлшектері түзілуінің соңғы реакциясы үшін ерітінді тағы 20 минут араластырылады. Магнетит нанобөлшектерінің түзілу процесі төменде көрсетілген химиялық реакцияға сәйкес өтеді:



Алынған тұнбалар сүзіліп, дистилденген сумен бейтарап ортаға дейін жуылды және кептіру шкафында 70°C температурада суды толық жойғанға дейін кептірілді. Жүргізілген зерттеулер ұсынылған әдіс Fe_3O_4 магнетит нанобөлшектерін 12,3 г дейін синтездеуге мүмкіндік беретінін көрсетті.

12-суретте темір тұздарының дайындалған су ерітінділерінің фотосуреттері (а,б,в) және синтездеу процесі аяқталғаннан кейін магнетит нанобөлшектері бар алынған ерітіндінің сыртқы түрі (г) келтірілген.



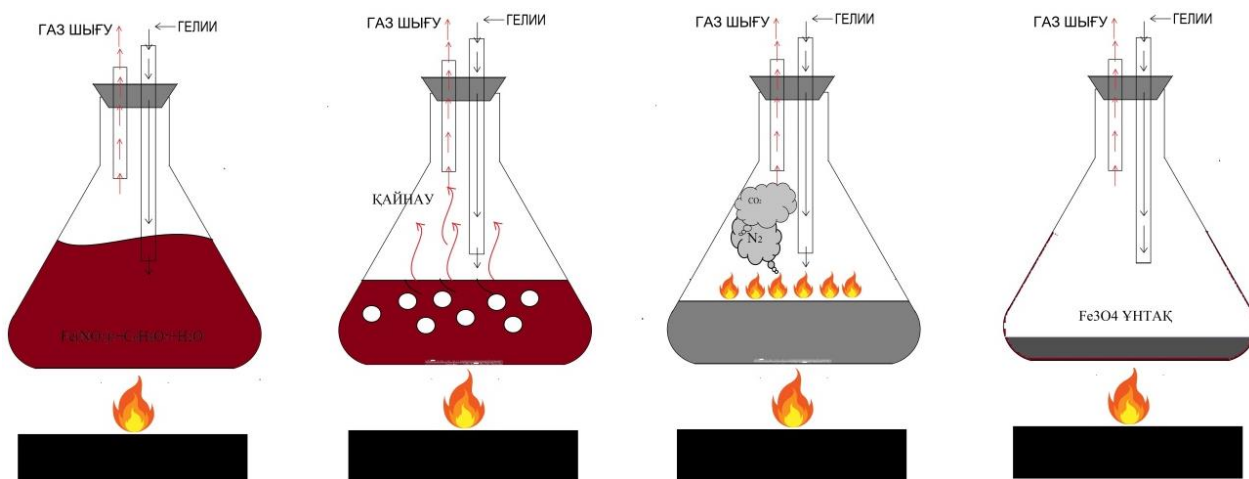
а-темір сульфатының сулы ерітіндісі; б - темір хлоридінің сулы ерітіндісі; в-сульфат пен темір хлоридінің аралас сулы ерітіндісі; г-магнетит нанобөлшектері бар ерітіндінің сыртқы түрі

12 Сурет - Темір тұздарының сулы ерітінділерінің сыртқы түрі

2.1.2 Магнетит нанобөлшегін сұйық фазалық жану әдісі арқылы алу

Fe_3O_4 магнетит нанобөлшектері сұйық фазалық жану әдісімен, жанғыштың тотықтырғышқа әртүрлі арақатынасында алынды. Бастапқы компоненттер ретінде қосымша тазартусыз темір нитраты ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) және лимон қышқылы ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) қолданылды. Отынның тотықтырғышқа

арақатынасының өзгеруі бастапқы ерітіндінің рН-ін өзгертеді және алынатын соңғы өнімнің дисперсиялығына әсер етеді. Магнетит нанобөлшектерін синтездеу темір нитраты мен лимон қышқылының 1:1, 1:1,5 және 1:2 арақатынастарында жүргізілді. Сұйық фазалы жану процесі төменде келтірілген реакцияға сәйкес лимон қышқылы мен темір нитратының химиялық әрекеттесуі нәтижесінде жүреді:



13 Сурет - Сұйық фазалық жану әдісімен магнетит нанобөлшегін алу процессінің схемалық көрінісі

Әр тәжірибеде темір нитратының $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ және лимон қышқылының $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ есептелген мөлшері, молярлық негізде қатынасы 1:2 мөлшерінде 30 мл дистилденген суда ерітілді және 20 минут мұқият араластырылды. Алынған біртекті ерітінді жалпақ түпті колбаға салынып, екі потрубкасы бар резеңке тығынмен жабылды - біріншісі гелийді жеткізу үшін пайдаланылды, екіншісі пайдаланылған газдарды шығару үшін қызмет етті. Бастапқыда гелий арқылы колбадағы ауаны шығардық, өйткені синтез кезіндегі атмосфера Fe_2O_3 нанобөлшектері темір оксидінің пайда болуына әкеледі. Темір оксидінің нанобөлшегі химиялық белсенді әрі жоғары температурада оттегімен оңай реакцияға түсетін болғандықтан, гелийдің инертті ортасы, өнімнің қасиеттерін сақтау үшін, суығанға дейін қажет. Су буланғаннан кейін және температурасы 390°C жеткен соң, қара ультрадисперсті ұнтақ түрінде соңғы өнім түзіліп, ерітіндінің өздігінен жану процесі жүреді. 13-суретте сұйық фазалық жану әдісі арқылы магнетит нанобөлшегінің синтездеу процесінің этаптары көрсетілген.



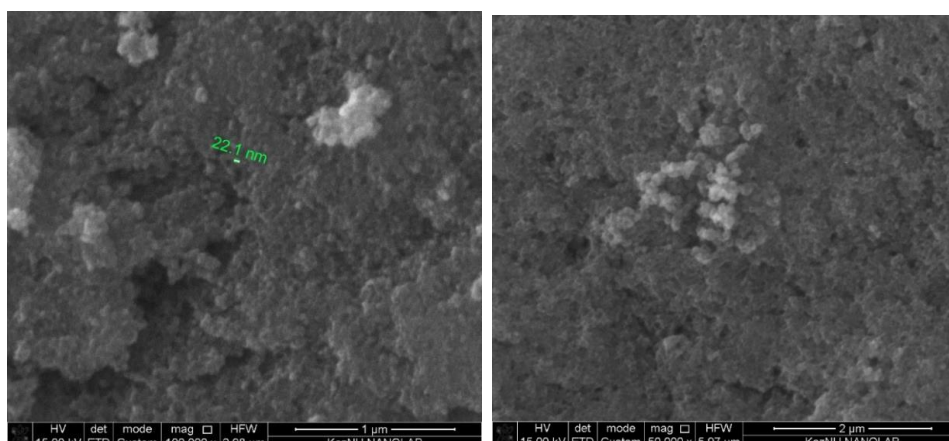
14 Сурет - Сұйық фазалық жану әдісімен Fe_3O_4 магнетит нанобөлшектерін синтездеу процесінің әр сатысындағы фотосуреттер

3 НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

3.1 ХК әдісімен алынған магнетит нанобөлшегін зерттеу

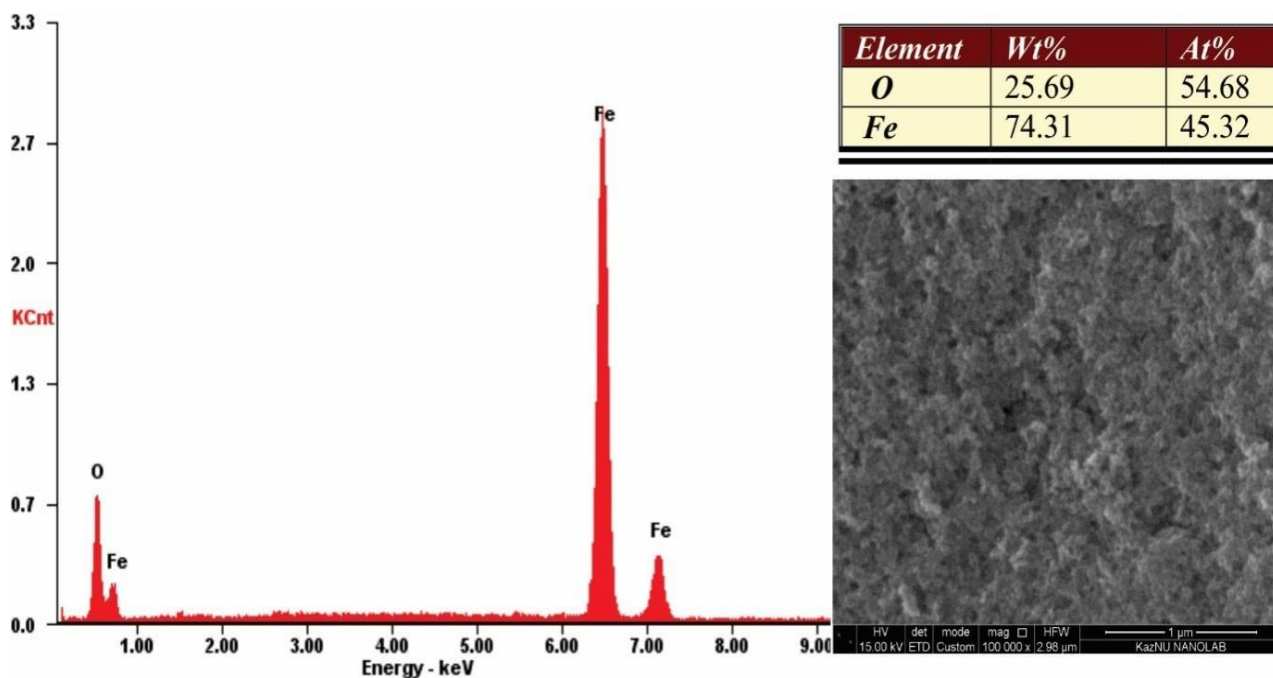
Химиялық конденсация әдісімен синтезделген магнетитті нанобөлшектер СЭМ арқылы зерттелді. СЭМ зерттеулері нанобөлшектердің оларды синтездеу кезінде аздап агрегациясы бар екенін көрсетеді. Түсірілімді зерттеу жеке магнетитті нанобөлшектердің сфералық пішінге ие және кеуекті емес тығыз құрылымға ие екендігін көрсетті.

Сканерлеуші электрондық микроскоп арқылы магнетит нанобөлшектерінің мөлшері анықталды. Зерттеу нәтижелері нанобөлшектердің $11 \pm 0,3$ нм орташа өлшемді сфералық формасы бар екенін көрсетеді.



15 Сурет - Химиялық конденсация әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің СЭМ түсірілімі

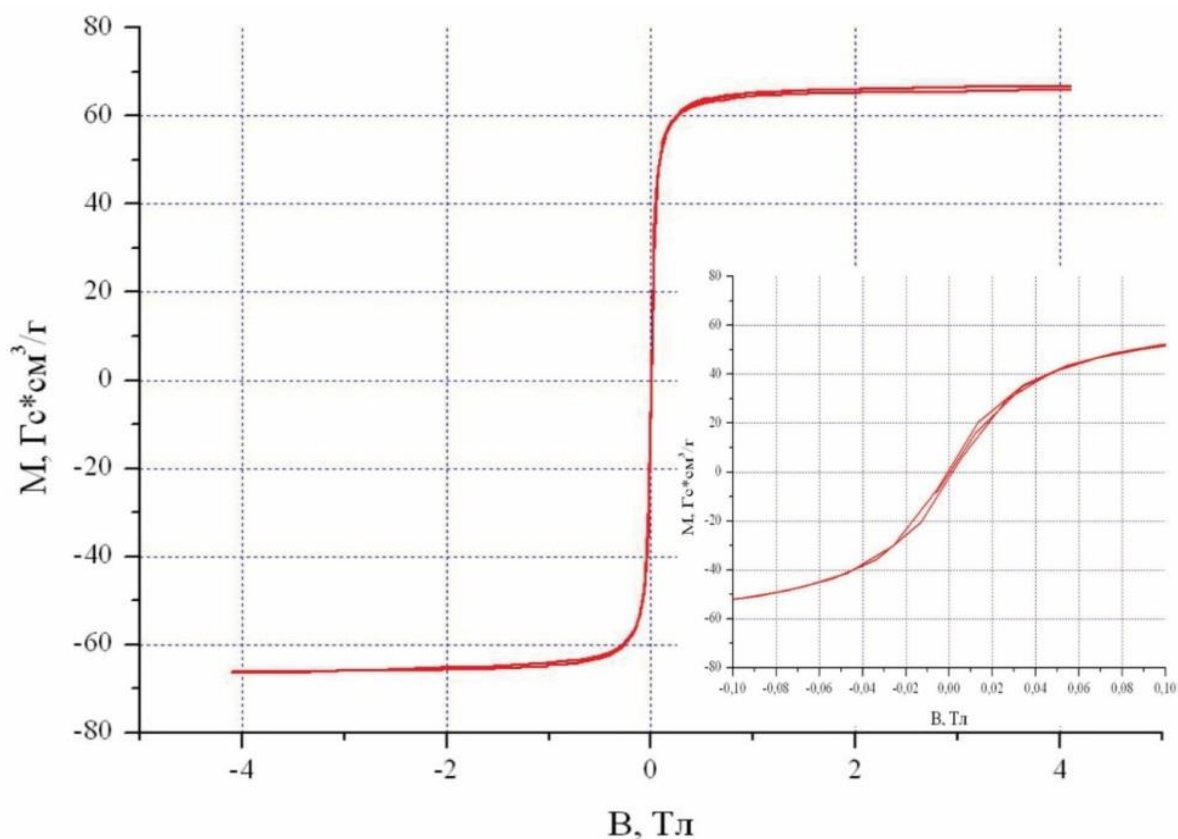
Алынған магнетит нанобөлшектері үлгілерінің химиялық құрамын анықтау үшін EDAX энергиясының дисперсиялық спектрометрімен элементтік талдау жасалды. Энергетикалық дисперсиялық спектр және химиялық құрамды зерттеу нәтижелері 16-суретте келтірілген. EDAX талдауына сәйкес темірдің (Fe) массалық үлесі 74,31%, ал атомдық фракциясы - 54,68%, оттегінің (O) массалық үлесі - 25,69%, ал атомдық үлесі- 45,32%.



16 Сурет - Химиялық конденсация әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің энергодисперсиялық спектр EDAX анализі

Химиялық конденсация әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің магниттік қасиеттерін зерттеу

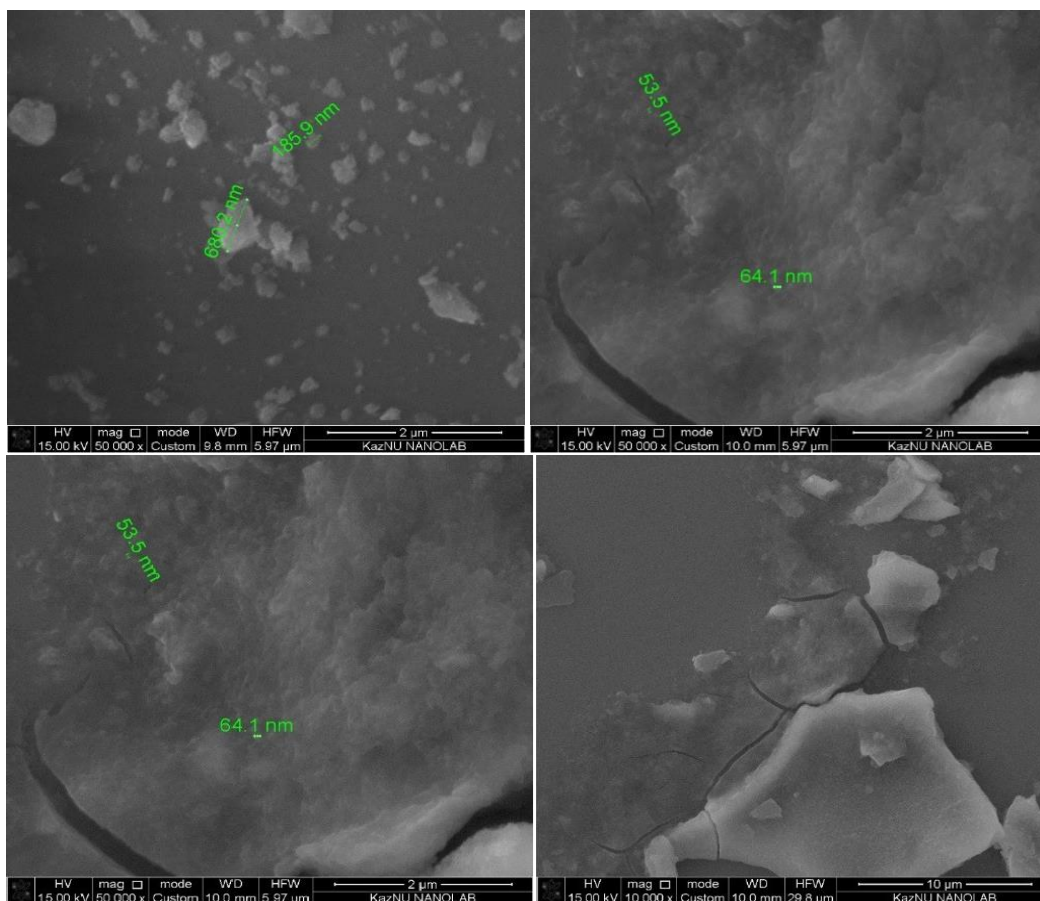
Алынған магнетит нанобөлшектері үлгілерінің магниттік момент шамаларын өлшеу Cryogenic 14 TVibrating Sample Magnetometer магнитометрінде жүргізілді. Өлшеу нәтижесі 17-суретте көрсетілген. Жүргізілген зерттеулер өрістердің магниттелу қисығында гистерезис болмауынан көрінетін магнетит нанобөлшектері суперпарамагниттікке айналатынын көрсетті. Суперпарамагниттік күйге өту магнетитті нанобөлшектердің бір домендік күйге ауысуымен және барлық көлемде біркелкі магниттелуге қол жеткізумен түсіндіріледі.



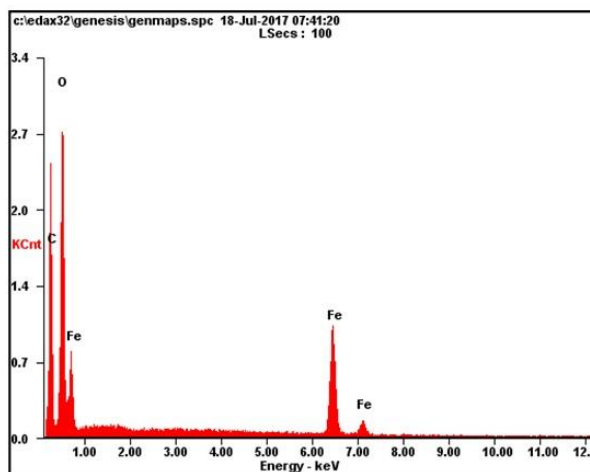
17 Сурет - Химиялық конденсация әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің бөлме температурасындағы магниттік гистерезисі

3.2 Сұйық фазалық жану әдісімен алынған магнетит нанобөлшегін зерттеу

Сұйық фазалық жану әдісімен синтезделген магнетитті нанобөлшектердің морфологиясы мен құрылымы сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) арқылы зерттелді. Төменде 18-суретте алынған үлгілердің СЭМ-де алынған суреттері берілген. Бұл зерттеулер көрсеткендей, синтез кезінде магнетит нанобөлшектері үлгілерде аморфты фаза басым, әсіресе 100 нм-ден асатын агломераттарда.



18 Сурет - Сұйық фазалық жану әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің СЭМ түсірілімі



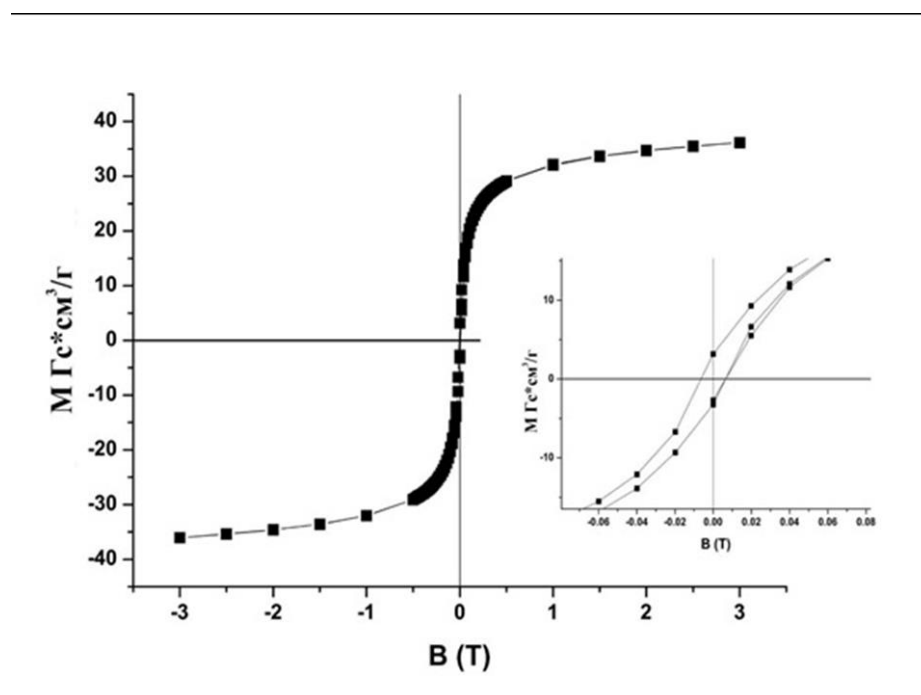
Element	Wt%	At%
--C	38.06	57.78
--O	27.04	30.82
-Fe	34.90	11.40
Matrix	Correction	ZAF

19 Сурет - Сұйық фазалық жану әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің энергодисперсиялық спектр EDAX анализі

EDAX талдауының нәтижелері ерітіндінің жану реакциясындағы отын концентрациясының тотықтырғышқа қатынасы 1:2 көміртегі мөлшері - 38,06% құрады. Жанармай концентрациясының жоғарылауымен сынамалардағы аморфты көміртегі басым болады.

Сұйық фазалық жану әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің магниттік қасиеттерін зерттеу

Магнетиттің құрғақ нанобөлшектерінің суперпарамагнитті қасиеттері бөлме температурасында зерттелді.



20 Сурет - Сұйық фазалық жану әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің магниттік гистерезисі

Суретте көрсетілген магниттеу қисығынан көрініп тұрғандай, магнетиттің нанобөлшектері суперпарамагнитті қасиеттерді көрсетеді, гистерезис пен қалдық магниттіліктің болмауы байқалады, коэрцитивті күш 0-ге жақын деуге болады. Осылайша, магнетиттің нанобөлшектері аз мөлшерге байланысты суперпарамагнитті қасиеттерге ие болды және жоғары магниттелген қанығу, 51.34 эме/г тең. Химиялық конденсация әдісімен алынған магнетит нанобөлшегінің магниттік қасиеттерімен айтарлықтай айырмашылық байқалмады. Бұл екі әдістің де қолайлылығын көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Магнетит нанобөлшектері химиялық конденсация және сұйық фазалық жану әдістерімен синтезделді. Алынған нанобөлшектерге сканерлеуші электронды микроскопия, рентгендік фазалық анализ және магнитометрия арқылы зерттеулер жүргізілді. Химиялық конденсация әдісімен алынған бөлшектердің орташа өлшемдері 15нм екені белгілі болды. Әдебиетке шолуға және магниттік қасиеттерін зерттеуге сүйене отырып алынған нанобөлшектердің суперпарамагниттік қасиетке ие екенін айта аламыз. Екі әдіспен алынған үлгілерге магниттік гистерезисі алынды және алынған график бойынша бұл магнетиттер суперпарамагниттік қасиет көрсетеді деуге болады. Химиялық конденсация әдісінің артықшылығы монодисперсті бөлшектер синтезделуінде, яғни сұйық фазалық жану әдісімен алынған бөлшектерде көп мөлшерде көмертектің концентрациясы табылды. Бұл экспериментімізде таңдап алынған екі әдіспен де дисперсті суперпарамагниттік магнетит нанобөлшектерін алдық және әдістердің тиімділігіне, қарапайымдылығына көз жеткізілді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Improving agglutination tests by working in microfluidic channels / G. Degré, E. Brunet, A. Dodge, P. Tabeling // *Lab on a chip*. – 2005. – Vol. 5, № 6. – P. 691–694.
- 2 Jolivet, J.- P. *Metal Oxide Chemistry and Synthesis: From Solution to Solid State* / J.- P. Jolivet. – Chichester : Wiley, 2000. – 338 p. – ISBN 0471970565.
- 3 Савельев И. В. *Курс общей физики*. — М.: Наука, 1998. — Т. 3. — 336 с.]
- 4 Nanotechnologies. Terminology and definitions for nano-objects // Nanoparticle, nanofibre and nanoplate. ISO/TS 27687:2008.
- 5 Kromer J., Rios-Carreras I., Fuhrmann G. et al. “*Angew.Chem.Intern.Ed.*”, 2000, vol. 39, p.3481-3486; Fuhrmann G., Kromer J., Bauerle P. “*Synth. Metals*”, 2001, vol. 119, p.125-126.
- 6 Newkome G.R., Yao Z.-Q. et al. “*Journ.Org.Chem.*”, 1985, vol. 50, p.2003.
- 7 Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Hoffmann D.R. “*Nature*”, 1990, vol. 347, p.354
- 8 Iijima S. “*Nature*”, 1991, vol. 354, p.56
- 9 Ивановский А.Л. «*Успехи химии*», 1999, т.68, с.119-135
- 10 Mirkin, C. A., R. L. Lestinger, R. C. Music, J.J. Storhoff. 1996. A DNA-based method for rationally assembling nanoparticles into macroscopic materials. *Nature* 382. 607-609.
- 11 Sharma V.K., Yngard R.A., Lin Y. Green synthesis and their antimicrobial activities // *Adv Colloid Interfac.* – 2009. № 145. – P. 83 – 96, Tavakoli, A., Sohrabi, M., Kargari, A. A review of methods for synthesis of nanostructured metals with emphasis on iron compounds // *Chem. Pap.* – 2007. № 61. – P. 151 – 170
- 12 Iida H., Takayanagi K., Nakanishi T., Osaka T., *Colloid J. Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles with various sizes and magnetic properties by controlled hydrolysis. // Interface Sci.* – 2007. № 314. – P. 274 – 280
- 13 125. Iida H., Takayanagi K., Nakanishi T., Osaka T., *Colloid J. Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles with various sizes and magnetic properties by controlled hydrolysis. // Interface Sci.* – 2007. № 314. – P. 274 – 280]. [Compen – Jasso M.E., Ruiz F., Martinez J.R., Herrera – Gymez A., // *Mater. Lett.* – 2008. № 62. – P. 4248 – 4250.
- 14 Linh P.H., Thach P.V., Tuan N.A., Thuan N.C., Manh D.H., Phuc N.X., Hong L.V. Magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesized by forced hydrolysis // *J. Phys., Conf. Ser.* – 2009. № 187.
- 15 Chin S.F., Pang S.C., Tan C.H. Green synthesis of magnetite nanoparticles (via thermal decomposition method) with controllable size and shape // *J. Mater. Environ. Sci.* – 2011. № 2 (3). – P. 299 – 302.

- 16 А. Қ. Құсайынов. Қазақ тілі терминдерінің салалық ғылыми түсіндірме сөздігі, 2002 жыл. – 456 бет.
- 17 Мазуров М.П., Гришина С.Н., Титов А.Т. Магнетиты из магнетиальных скарнов на контактах долеритов с каменной солью // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 10. С. 1198-1207.
- 18 Стебновская Ю.М. Магнетиты железорудных месторождений . . Киев Наук. думка, 1985. - 103 с.
- 19 Wang X., Qin M., Fang F., Jia B., Wu H., Qu X., Volinsky A. A. Effect of glycine on one – step solution combustion synthesis of magnetite nanoparticles // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. № 719. – P. 288 – 295.]
- 20 Ianoş R., Tăculescu, A., Păcurariu, C. and Lazău, I. Solution Combustion Synthesis and Characterization of Magnetite, Fe₃O₄ // Nanopowders. J. Am. Ceram. Soc. – 2012. № 95: – P. 2236 – 2240.]
- 21 Wright J. D., Sommerdijk N. A. J. M. Sol – Gel Materials: Chemistry and Applications – Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – 125p.]
- 22 Lemine O.M., Omri K., Zhang B., El Mira L., Sajieddine M., Alyamani A., Bououdina M. Sol – gel synthesis of 8 nm magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles and their magnetic properties // Superlattices and Microstructures. – 2012. № 52. – P. 793–799.
- 23 Khalil M.I. Co – precipitation in aqueous solution synthesis of magnetite nanoparticles using iron (III) salts as precursors // Arabian Journal of Chemistry. – 2015. V. 8, I. 2. – P. 279 – 284.
- 24 Abdalla M.A., Jaafar M.H., Al – Othman Z.A., Alfadul S.M., Ali Khan M. New route for preparation and characterization of magnetite nanoparticles // Arabian Journal of Chemistry. – 2011. V. 4. I. 2. – P. 235–237.
- 25 Raymond K. N., Pierre V. C. Next Generation, High Relaxivity Gadolinium MRI Agents // Bioconjugate Chem. 2005. Vol. 16. P. 3–8.
- 26 Shin T.-H., Choi J., Yun S. [et al.]. T1 and T2 Dual-Modal MRI contrast agent for Enhancing Accuracy by engineered nanomaterials // ACS Nano. 2014. Vol. 8, N 4. P. 3393–3401.
- 27 [Journal of Siberian Federal University. Chemistry 4 (2009) 287-293 P.
- 28 Резинкина М. М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной пространственной конфигурации // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. № 8. – С. 8–17.
- 29 Lesbayev A. B., Elouadi B., Borbotko T. V., Manakov S. M., Smagulova G. T., Boiprav O. V, Prikhodko N. G. Influence of Magnetite Nanoparticles on Mechanical and Shielding Properties of Concrete // Eurasian Chemico-Technological Journal – 2017. – Vol. 19. № 3. – P. 223-229.