

**ШАРОФ РАШИДОВ НОМИДАГИ САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ  
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ШАРОФ РАШИДОВ НОМИДАГИ САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**ҚАЮМОВ ХАФИЗ АСЛИДДИН ЎҒЛИ**

**ТАРКИБИДА НИКЕЛЬ, КОБАЛЬТ, ТЕМИР БЎЛГАН  
СУПЕРПАРАМАГНИТ СУЮҚЛИКЛАРНИНГ МАГНИТ  
ХОССАСИНИ ЎРГАНИШ**

**01.04.09 – Магнит ходисалари физикаси**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Самарқанд – 2022**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по физико-математическим наукам**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)  
on physical-mathematical sciences**

**Қаюмов Хафиз Аслиддин ўғли**

Таркибида никель, кобальт, темир бўлган суперпарамагнит суюқликларнинг магнит хоссасини ўрганиш..... 3

**Қаюмов Хафиз Аслиддин угли**

Изучение магнитных свойств суперпарамагнитных жидкостей, содержащих никель, кобальт, железо ..... 21

**Kayumov Khafiz Asliddin ugli**

Study of the magnetic property of superparamagnetic fluids containing nickel, cobalt, iron ..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works. .... 43

**ШАРОФ РАШИДОВ НОМИДАГИ САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ  
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ШАРОФ РАШИДОВ НОМИДАГИ САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**ҚАЮМОВ ХАФИЗ АСЛИДДИН ЎҒЛИ**

**ТАРКИБИДА НИКЕЛЬ, КОБАЛЬТ, ТЕМИР БЎЛГАН  
СУПЕРПАРАМАГНИТ СУЮҚЛИКЛАРНИНГ МАГНИТ  
ХОССАСИНИ ЎРГАНИШ**

**01.04.09 – Магнит ходисалари физикаси**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Самарқанд – 2022**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.4.PhD/FM548 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Шароф Рашидов номидаги Самарқанд давлат университетида бажарилган.  
Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) ва «Ziynet» Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Қувандиков Облоқул Қувандикович</b> физика-математика фанлари доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Муқимов Комил Муқимович</b> физика-математика фанлари доктори, академик <b>Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович</b> физика-математика фанлари доктори, доцент
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Бухоро давлат университети</b>

Диссертация ҳимояси Шароф Рашидов номидаги Самарқанд давлат университети ҳузуридаги PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: [rektor@samdu.uz](mailto:rektor@samdu.uz) Шароф Рашидов номидаги Самарқанд давлат университети Мухандислик физикаси институти, 1-қават, 63-хона).

Диссертация билан Шароф Рашидов номидаги Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40).

Диссертация автореферати 2022 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.  
(2022 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**М.Х.Ашуров**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси,  
ф.-м.ф.д., академик

**Р.М.Ражабов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
ф.-м.ф.н., доцент

**Д.И.Семенов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш ҳузуридаги  
Илмий семинар раиси,  
ф.-м.ф.д., доцент

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Дунёда бугунги кунда таркибида 3d-металлари бўлган нанозарралар асосидаги кукун ва коллоид эритмаларнинг физик-кимёвий хоссасини ва ички тузилишини ўрганиш жуда долзарбдир. Ҳозирги вақтда таркибида Ni, Co ва Fe бўлган нанозарралар асосидаги магнит суюқликларнинг магнит хусусиятларини ўрганиш катта қизиқиш уйғотмоқда. Сўнгги йилларда олиб борилаётган тажриба ва назарий тадқиқотлар бундай турдаги материалларнинг қўлланилиш соҳасини кенгайтди. Хусусан, ҳозирда дунёда магнит суюқликлардан техникада демпфирли системаларнинг тебранишини сўндиришда, вакуумли системаларни герметиклашда, материалларни мойлашда, тиббиётда дориларни инсон организмнинг керакли нуқтасига етказишда, шунингдек зарарли ўсимталарни гипертермия усулида даволашда, томографик ва рентген текширувларда контраст модда сифатида, тоғ-кон саноатида номагнит моддаларни сепарация қилишда фойдаланилмоқда. Шунинг учун ферромагнит нанозарралар таркибли суюқликларнинг магнитланиш хоссасини ташқи магнит майдонда ўрганиш кимё саноати ва тиббиёт физикасининг энг мураккаб муаммоларини ҳал қилишда муҳим аҳамият касб этади. Шунингдек, бир вақтнинг ўзида Ni, Co, Fe металлларини ўз ичига олган нанозарралар асосидаги магнит суюқликларнинг микротузилиши ва уларнинг турли хил магнитланиш табиатининг сабаблари етарли даражада ўрганилмаган.

Юртимизда физик-кимёвий усулда маҳаллий синтез қилинган материаллардан амалиётда қўлланилишида, жумладан, металлургия саноатининг иш унумдорлигини ошириш, онкологик касалликларни даволаш усуллариини такомиллаштириш, фармацевтика саноати технологияларини ривожлантириш учун тадқиқ қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Шунинг учун ферромагнит наноматериаллар ва унинг коллоид эритмаларининг физик хоссасини ўрганиш долзарб вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Ушбу диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 8 октябрдаги ПФ-5847-сон Қарори, 2020 йил 29 декабрдаги Олий Мажлисга Мурожаатномасида<sup>1</sup> физика фанини ривожлантириш учун белгилаб берган асосий вазифалар, “Ўзбекистон Республикаси олий таълим тизимини 2030 йилгача ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида” ги Фармони, 2021 йил 19 мартдаги ПҚ-5032-сон “Физика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги Қарори, 2022 йил 13 январдаги ПҚ-82-сон "Самарқанд давлат университети фаолиятини янада такомиллаштиришга доир қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида"ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга алоқадор бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

---

<sup>1</sup>Мирзиёев Ш.М. Ўзбекистон Республикаси Президентининг Олий Мажлисга Мурожаатномаси // Халқ сўзи, 2020 йил, 30 декабрь, №275-276(7746-7747), 1-бет.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги:** Мазкур тадқиқот Республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси:** Сўнгги йилларда хорижлик олимлар, Р.Э.Росенсвейг (АҚШ), Е.И.Кондорский, Б.М.Берковский, В.С.Чеканов, Ю.И.Диканский (Россия), Л.А.Булавин, П.П.Горбик (Украина), J. Hemalatha (Ҳиндистон), J.Li, X.M.Gong (Хитой), С.Такетоме, С. Тикадзуми (Япония) лар томонидан, умумий формуласи  $A_xB_{1-x}Fe_2O_4$  (бунда, А, ва В – икки валентли металл иони) бўлган нанозарраларнинг олиниш усулларини, ўлчамлари бўйича тақсимотини ва бу зарралар асосидаги магнит суюқликларнинг механик, электр, магнит ва кимёвий хоссаларини ҳам назарий ҳам тажрибавий жиҳатдан ўрганилган.

Шунингдек, бу соҳанинг ривожланишига Ўзбекистонлик олимлардан академиклар С.З. Муминов, А.С. Содиков, К.А.Ахмедов профессорлар Ф.И.Файзуллаев, Н.Қ.Мухаммадиев, Р.И. Исмоилов, Қ.Ф. Халилов ва бошқалар ҳам катта ҳисса қўшганлар.

Охириги йилларда ўтказилган экспериментал ва назарий тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатдики,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) асосидаги магнит суюқликларнинг ички тузилиши ва хоссалари бўйича ягона назария яратилмаган ҳамда уларнинг магнит табиатининг турлича бўлиш сабаблари етарли даражада ўрганилмаган.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация Шароф Рашидов номидаги Самарқанд давлат университети ва “Навоий кон-металлургия комбинати” АЖ ўртасида тузилган, “Илмий-тадқиқотлар ўтказиш, кадрлар тайёрлаш ва талаба ёшларни ўқитиш” бўйича № 11 сонли шартномалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади.**  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосидаги магнит суюқликлар микротузилишининг шаклланиш механизми ва уларнинг магнитланишини никель иони  $Ni^{2+}$  концентрациясига боғлиқлигини ташқи магнит майдонида хона температурасида ўрганиш.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

- кимёвий конденсация усулида олинган  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг ўлчами ва морфологиясини тадқиқ қилиш;

-кукунсимон  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг кристалл тузилиши ва элемент таркибини аниқлаш;

-  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) асосидаги магнит суюқликлар солиштирма магнитланишининг ташқи магнит майдонга боғлиқлигини аниқлаш;

- ўрганилган намуналарнинг тажрибавий  $M=M(H)$  боғланишларидан фойдаланиб, уларнинг асосий магнит характеристикалари (солиштирма тўйиниш магнитланиш –  $M_T$ , қолдиқ магнитланиш –  $M_K$ , коэрцитив куч –  $H_C$ )

ларни аниқлаш ва суюқлик зарраларнинг ўлчамини ярим-эмпирик ҳолда ҳисоблашни амалга ошириш;

- магнит суюқлик таркибидаги  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг тажрибада ўлчанган диаметрини, Ланжевен назарияси доирасида ярим-эмпирик ҳисобланган қийматлар билан қиёсий таҳлил ўтказиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида кимёвий конденсация усулида олинган  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосидаги магнит суюқликлар олинган. Дисперс фаза сифатида эса сувдан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг предмети** ташқи магнит майдон таъсири натижасида  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосидаги магнит суюқликларда суперпарамагнит тартибланишнинг ҳосил бўлиш механизмларига ва унинг магнитланишига қаттиқ фаза таркибидаги  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  ионлар концентрациясининг таъсири.

**Тадқиқот усуллари:** Диссертацияда  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) магнит суюқликлар солиштирма магнитланишини ўлчашнинг тебранишли магнетометр усули, суюқлик нанозарраларининг диаметрини ўлчашнинг ва морфологик таҳлилинини трансмиссион электрон микроскоп усули, кристалл тузилишини рентгенофазавий таҳлил усули, элемент миқдор таркибини рентгеноспектрал анализ (ЭДХ) усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:**

- илк марта кимёвий конденсация усулида бирдоменли тузилишга эга бўлган  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралари асосидаги барқарор суперпарамагнит хоссали магнит суюқликлар муваффақиятли синтез қилинган;

- илк марта  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосидаги магнит суюқликлар солиштирма магнитланишининг ташқи магнит майдонда  $\text{Ni}^{2+}$  ионлари концентрациясига боғлиқлиги ўрганилган. Ушбу намуналар кичик қолдиқ магнитланиш ва кичик коэрцитив кучга эга эканлиги аниқланган;

- ўрганилган намуналар солиштирма магнитланишининг ташқи магнит майдонига тажрибавий боғланишлари  $M=M(H)$  дан фойдаланиб, суюқлик таркибидаги зарраларнинг ўлчами ярим-эмпирик аниқланган ва электрон микроскоп (ТЭМ) да олинган тажриба натижалари билан солиштирилган;

- ўрганилган магнит суюқлик зарраларининг диаметри, уларнинг суперпарамагнит ҳолатга ўтишдаги критик қийматидан кичик ( $d < d_{\text{кр}} = 45$  нм) эканлиги аниқланган ва намуналарда суперпарамагнит табиатнинг шаклланишида, зарраларининг ўлчами асосий роль ўйнаши кўрсатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

аниқланган физик катталиклар асосида феррогидродинамика ва физик-кимёда магнит суюқликларнинг микротузилиши ва магнит характеристикаларининг ҳосил бўлиш механизмларини аниқлаш, шунингдек, турли эритмаларда агрегатларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини аниқлаш ва тушунтириш имконияти кўрсатилган;

хона ҳароратида суперпарамагнит табиатга эга бўлган ўрганилаётган намуналардан тоғ-кон саноатида магнит бўлмаган моддаларни ажратиб олишда ва нефть саноатида оқова сувларни нефть қолдиқларидан тозалашда, шунингдек, тиббиёт соҳасида онкологик ва гипертермик касалликларни даволашда янги истиқболли материал сифатида фойдаланиш мумкинлиги таклиф этилган.

#### **Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.**

Илмий тадқиқотларда кенг фойдаланиладиган ишончли экспериментал текширув усуллари ва жаҳон миқёсида етакчи олимлар томонидан тан олинган, тажриба ўтказиш имконияти юқори бўлган XRD Empyrean panalytical, X-АСТ Silicon Drift Detector рентгеноспектрометрларнинг қўлланилганлиги ва TEM LEO 912 АВ электрон микроскоп ҳамда тебранишли магнитометр қурилмаларидан фойдаланганлиги билан асосланади. Шунингдек диссертация ишида олинган тажриба натижалари ва уларга асосланган хулосалар, ферромагнит нанозарраларнинг ички тузилиши ва магнитланиш хоссасини ўрганишга бағишланган замонавий тадқиқотлар маълумотларига мос келади. Тажриба натижалари мавжуд физик тасаввурлар, бошқа усуллар билан ва илмий адабиётларда келтирилган маълумотларга мослиги ҳамда уларга зид келмаслиги билан тасдиқланган.

#### **Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, магнетизмнинг замонавий назариялари бўйича таҳлил қилинган натижалар 3d металлари таркибли нанозарралар ва улар асосидаги магнит суюқликларнинг магнит табиати ҳақидаги физик тасаввурларни, ҳамда кукунсимон  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  нанозарраларнинг кристалл тузилиши ҳақидаги назарияларни янада ривожлантириш учун хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, олинган натижалар 3d-элементлар асосидаги нанокомпозит материалларнинг физик хусусиятларини тушунтириш ва бошқариладиган хусусиятларга эга магнит материалларни яратиш муаммосини ҳал қилиш учун муҳидир.

#### **Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши.**

Таркибида никель, кобальт, темир бўлган суперпарамагнит суюқликларнинг магнит хоссасини ўрганиш бўйича олинган натижалари БВ-Ф4-014 рақамли “Электромагнит мослашувликни ҳисобга олган ҳолда электрон қурилмалар, микро- ва нано- тизимлар юпқа элементлари магнит майдонида магнитоэластик тебранишлари масалаларини ечишнинг амалий усуллари ва магнитоэластикликнинг математик асосларини ривожлантириш” мавзусидаги фундаментал лойиҳада фойдаланилган (ТАТУ Самарқанд филиалиининг 2022 йил 4 октябрьдаги маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши микро ва нано тизимлар таркибидаги юпқа ток ташувчи элементлар электромагнит мослашувчанлигини ва магнитоэластиклиги масалаларини ечишга ва уларда содир бўладиган электромагнит эффектларни таҳлил қилиш имконини берган;

Диссертацияда кимёвий конденсация усулида  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  ва  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосидаги кукунсимон намуналар синтез қилинган.

Синтез қилинган кукунсимон намуналардан “Навоий кон-металлургия комбинати” АЖ да рудалар таркибидаги номагнит моддаларни сепарация қилишда фойдаланиш имкониятини берган (2022 йил 14 октябрдаги № 24.01-01-11/2013 рақамли далолатномаси).

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг натижалари 2 та республика ва 3 та халқаро миқёсидаги илмий-амалий анжуманларида маърузалар қилиниб тегишли муҳокамалардан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Тадқиқот мавзуси бўйича жами 11 та илмий иш, шу жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий Аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола (2 та Scopus базасидаги ва 4 та республика журналларда), қолган 5 таси халқаро ва Республика миқёсида ўтказилган конференцияларнинг материаллари ҳамда тезислар тўпламида чоп этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 50 расм ва 6 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 113 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг **“Кириш”** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотларнинг республика фан ва техника тараққиётининг асосий устивор йўналишлари билан боғлиқлиги аниқланган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, вазифа ва мақсаднинг шакллантирилганлиги, аниқланган объектлар, тадқиқот усули ва предмети, тадқиқотнинг илмий янгилиги тушунтирилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очилган, ишнинг апробацияси ва натижаларнинг жорий қилиниши ҳақида қисқача маълумотлар ҳамда диссертациянинг тузилиши ва ҳажми келтирилган.

Диссертациянинг **“Магнит суюқликларнинг тузилиши ва магнит хоссалари бўйича илмий тадқиқот ишлар (адабиётлар шарҳи)”** деб аталган биринчи бобида магнит суюқликларнинг магнит хоссалари, олиниш усуллари ва қўлланилиш соҳаларига тегишли тажрибавий ва назарий ўрганишга бағишланган адабиётлар шарҳи келтирилган. Биринчи боб охирида диссертация ишининг мақсади ва вазифалари баён этилган.

Диссертациянинг **“Тажриба тадқиқотларининг техникаси ва усуллари”** деб номланган иккинчи бобида намуналарни олиниш усули, тажриба тадқиқотлари қурилмасининг баёни келтирилган. Батафсил таҳлиллар кўрсатдики, тадқиқот қурилмаларида олиб борилган ўлчашдаги максимал хатолик 2,5 % дан ошмайди.

Диссертациянинг учинчи боби “ $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) асосидаги магнит суюкликларнинг микротузилиши, морфологияси ва магнит хоссаси” деб номланган бўлиб, унда кукунсимон  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг кристалл тузилиши, элемент таркиби, морфологик таҳлили ва бу зарралар асосидаги магнит суюкликларнинг солиштирма магнитланишининг ташқи магнит майдон кучланганлигига боғлиқлигини хона температурасида ўрганиш натижалари келтирилган.

$\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг кристалл тузилишини ўрганиш натижалари 1а-расмда кўрсатилган. XRD спектрнинг барча дифракция чўкқилари намуналарда бир фазали тескари кубик шпинел кристалл тузилиши шакланганлигини кўрсатади. Никель ва кобальтли ферритлар 2- ва 3-расмда кўрсатилган мураккаб кристалл структурага эга бўлиб, унинг элементар ячейкасида 56 та (32 та  $\text{O}^{2-}$  кислород, 8 та  $\text{Fe}^{3+}$  ва 16 та  $\text{M}^{2+}$ ;  $\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}$ ) ион мавжуд. Бунда  $\text{Fe}^{3+}$  металл ионлари 4та  $\text{O}^{2-}$  ионлари билан қуршаб олинишидан ҳосил бўлган тетраэдрик ҳамда қолган  $\text{Fe}^{3+}$  ва  $\text{M}^{2+}$  ионлари 6та  $\text{O}^{2-}$  кислород ионлари билан қуршаб олинган октаэдрик ҳолатларни эгаллайди (2-расм). Бундай кристалл панжарага эга моддалар тескари шпинел тузилишли деб аталади.

Нанозарралар кристаллит ўлчамининг ўртача қиймати XRD спектрнинг энг юқори интенсивлик (311) чўкқисидан Дебай-Шерер тенгламаси ёрдамида ҳисоблаб чиқилган.

$$D = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

бу ерда  $\lambda$  – Рентген нурлари тўлқин узунлиги,  $\beta$  – чўкқининг ярим кенглиги,  $\theta$  – чўкқи ҳосил бўлган бурчак.

Шунингдек  $\text{Ni}^{2+}$  ионларнинг концентрацияси ортиши билан спектрдаги (311) тартибга мос келадиган чўкқининг горизонтал йўналишда ўнгга силжишини кўриш мумкин (1б-расм). Бу эса  $\text{Ni}^{2+}$  ионларнинг концентрацияси ортиши намуна зарраларининг кристаллит ўлчамига таъсир қилганини аңглатади.

Зарраларнинг кристалл панжара доимийси қуйидаги формуладан аниқланди:

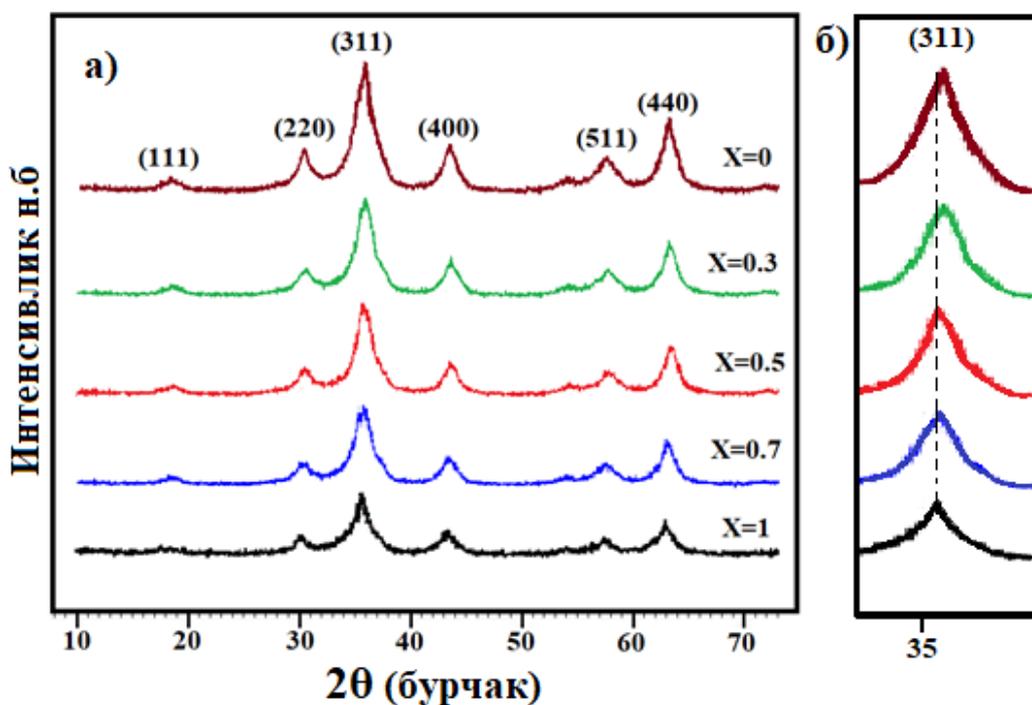
$$d = d_{hkl} \cdot (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} \quad (2)$$

бу эрда  $d_{hkl}$  – параллел текисликлар орасидаги масофа,  $h, k, l$  – Миллер индекслари.

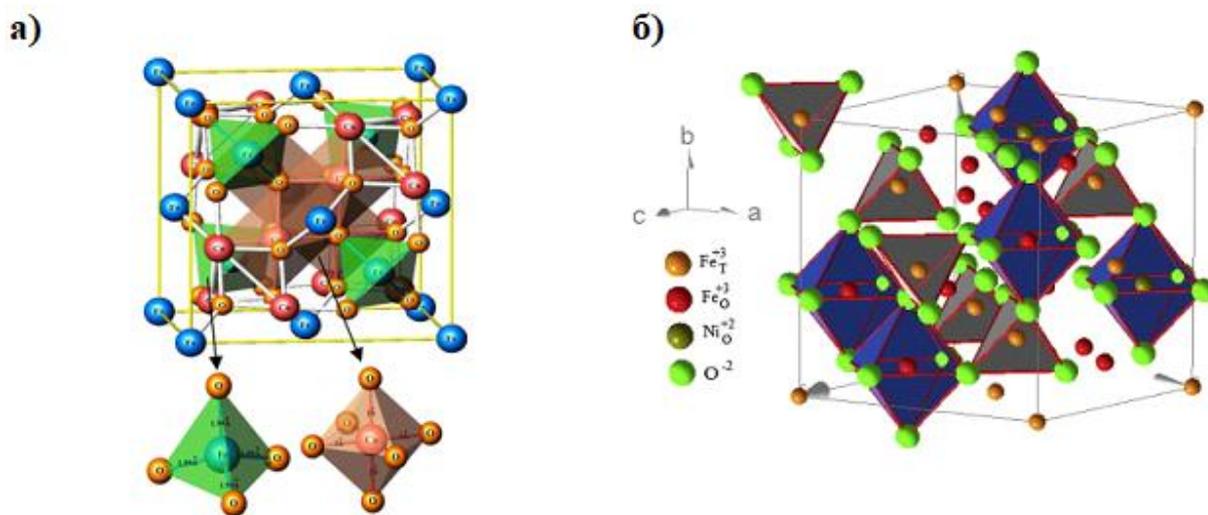
Шунингдек зарраларнинг зичлиги қуйида кўрсатилган формула ёрдамида аниқланди:

$$\rho = 8M / N_A \cdot d^3 \quad (3)$$

бу ерда  $M$  – зарраларнинг молекуляр массаси,  $N_A$  – Авогадро доимийси,  $d$  – кристалл панжара доимийси.



1-расм. Кукунсимон  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг XRD спектри.



2-расм. а) кобальтли феррит ( $CoFe_2O_4$ ) б) никелли феррит ( $NiFe_2O_4$ ) нанозарраларнинг кристалл тузилиши.

1-жадвал.

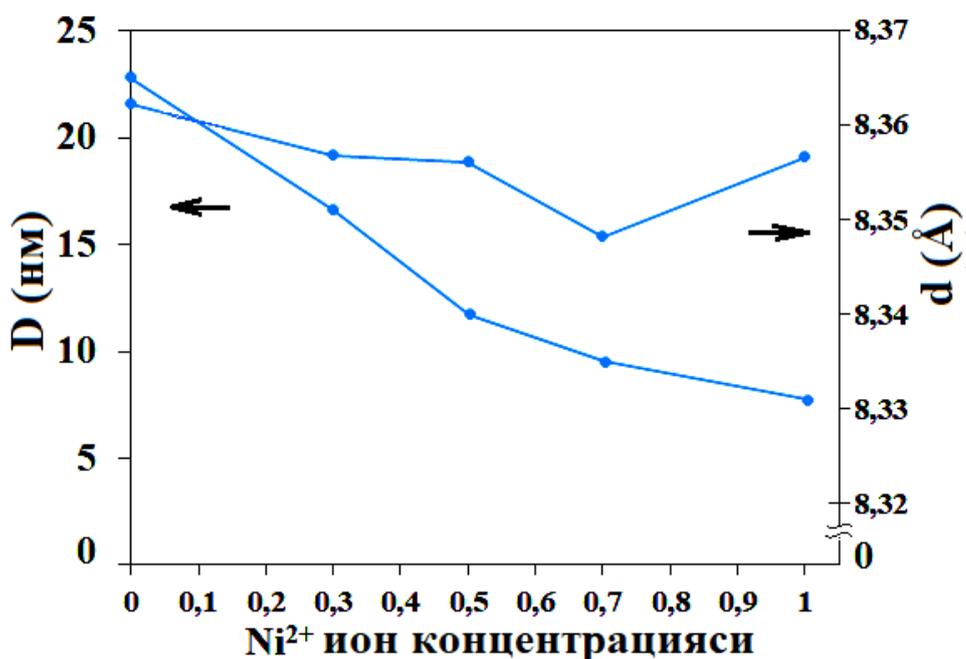
$Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) намуналарнинг рентгенофазавий таҳлил натижалари

Намуна	D (нм)	d (Å)	$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )
$CoFe_2O_4$	21,6	8,365	5,312
$Ni_{0,3}Co_{0,7}Fe_2O_4$	19,2	8,351	5,324
$Ni_{0,5}Co_{0,5}Fe_2O_4$	18,9	8,340	5,347
$Ni_{0,7}Co_{0,3}Fe_2O_4$	15,4	8,335	5,352
$NiFe_2O_4$	19,1	8,331	5,381

Олинган натижалар 1-жадвалда келтирилган. 1-жадвалдан кўришибдики, кристаллит ўлчамининг қиймати 15-22 нм оралиғида бўлади. Кукунсимон  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  намуналарининг панжара доимийси  $Ni^{2+}$  ионларнинг концентрацияси ошиши билан камаяди, аммо зичлиги ошади (3-расм). Бундай ўзгаришларни  $Ni^{2+}$  (0,69 Å) ионининг  $Co^{2+}$  (0,74 Å) ионидан кичик радиусга эга эканлиги билан тушунтириш мумкин.

Кукунсимон  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7$ ) намуналар элемент таркиби энергия бўйича дисперсияланган рентген нурлари спектроскопияси (ЭДХ) усулида текширилди. 4-расмда  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7$ ) намуналарнинг ЭДХ спектри келтирилган.  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7$ ) намуналарнинг ЭДХ таҳлили тажриба

натижалари, назарий  $X = \frac{m_{Ni}(\%)}{m_{Ni}(\%) + m_{Co}(\%)}$  формула билан ҳисобланган



3-расм. Кукунсимон  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) намуналар кристаллит ўлчами ва панжара доимийсининг  $Ni^{2+}$  иони концентрациясига боғлиқлиги

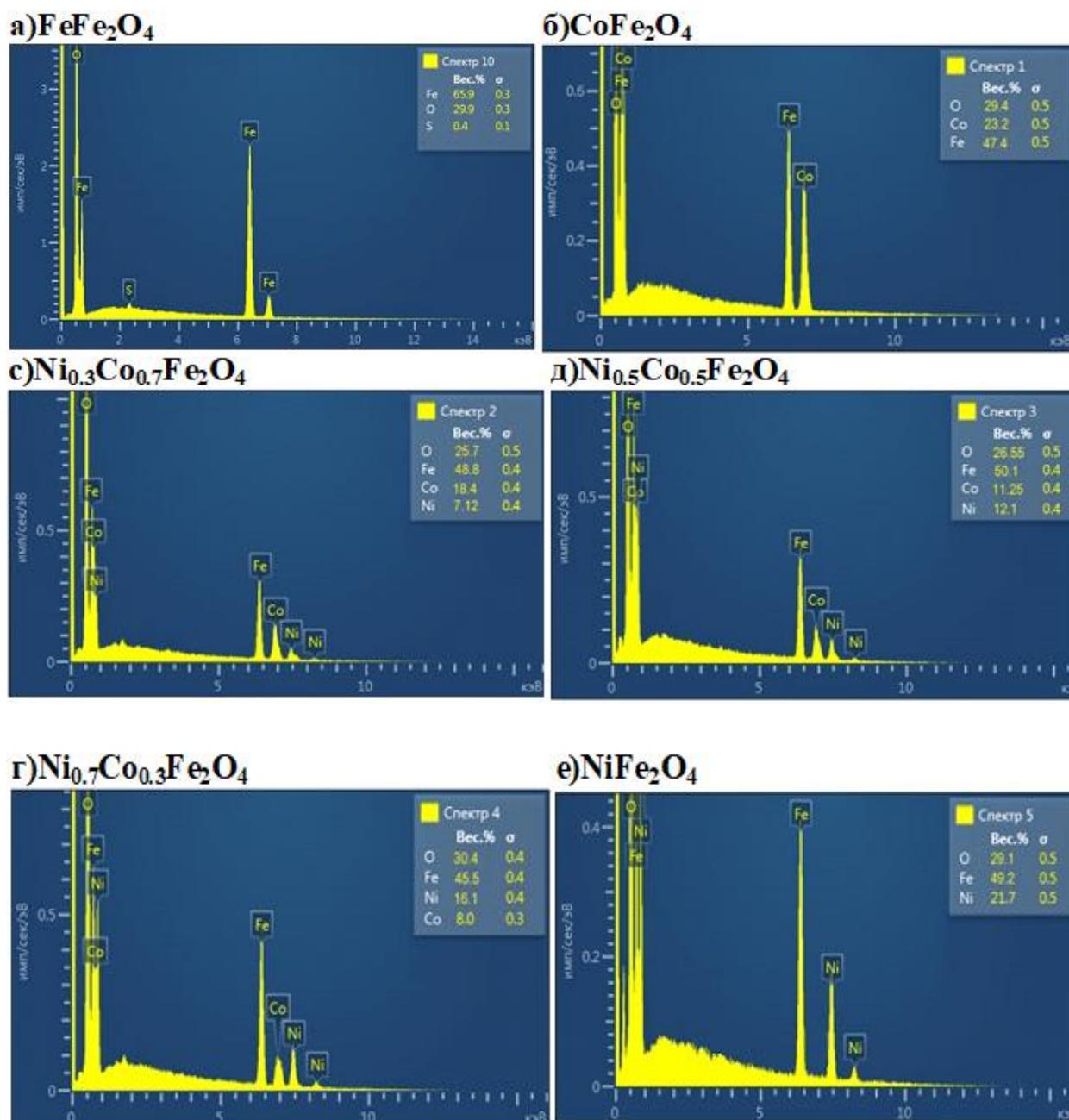
2-жадвал.  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) намуналарнинг ЭДХ таҳлили натижалари

Намуналар	Fe (масс.%)	Ni (масс.%)	Co (масс.%)	O (масс.%)	X (кутилган натижа)	X (тажриба натижаси)
$CoFe_2O_4$	47,4	0	23,2	29,4	0	0
$Ni_{0,3}Co_{0,7}Fe_2O_4$	48,8	7,12	18,4	25,7	0,3	0,28
$Ni_{0,5}Co_{0,5}Fe_2O_4$	50,1	12,1	11,25	26,55	0,5	0,52
$Ni_{0,7}Co_{0,3}Fe_2O_4$	45,5	16,1	8	30,4	0,7	0,67
$NiFe_2O_4$	49,2	21,7	0	29,1	1	1
$FeFe_2O_4$	65,9	0	0	29,9	-	-

натижалар билан таққосланди (2-жадвал). 2-жадвалдан кўриш мумкинки, намуналарни синтез қилиш жараёни муваффақиятли амалга оширилган.

$\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,5; 1$ ) асосли магнит суюқлик зарраларининг ўлчами ва морфологияси трансмиссион электрон микроскоп (ТЭМ) ёрдамида ўрганилди. Олинган натижалар 5-8-расмларда тасвирланган. ТЭМ тасвирларидан шуни кўриш мумкинки, намуналарнинг зарралари шарсимон шаклга эга. Шунингдек,  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  зарраларнинг диаметлари мос равишда 25-38 нм, 7-30 нм, 10-30 нм, 10-25 нм.

Магнит суюқликдаги коллоид зарраларнинг магнит моментлари доим Броун ҳаракатида бўлади. Демак, бундай системанинг магнитланиши учун Ланжевеннинг парамагнетизм назариясини қўллаш мумкин.



4-расм. Кукунсимон  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) намунасининг ЭДХ спектрлари

Бу назарияга асосан системанинг магнитланишини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$I = I_{\infty} L(\xi) \quad (4)$$

бу ерда  $L(\xi) = (\text{cth}\xi - \frac{1}{\xi})$  - Ланжевен функцияси,  $I_{\infty}$  - магнит суюқликнинг тўйиниш магнитланиши.

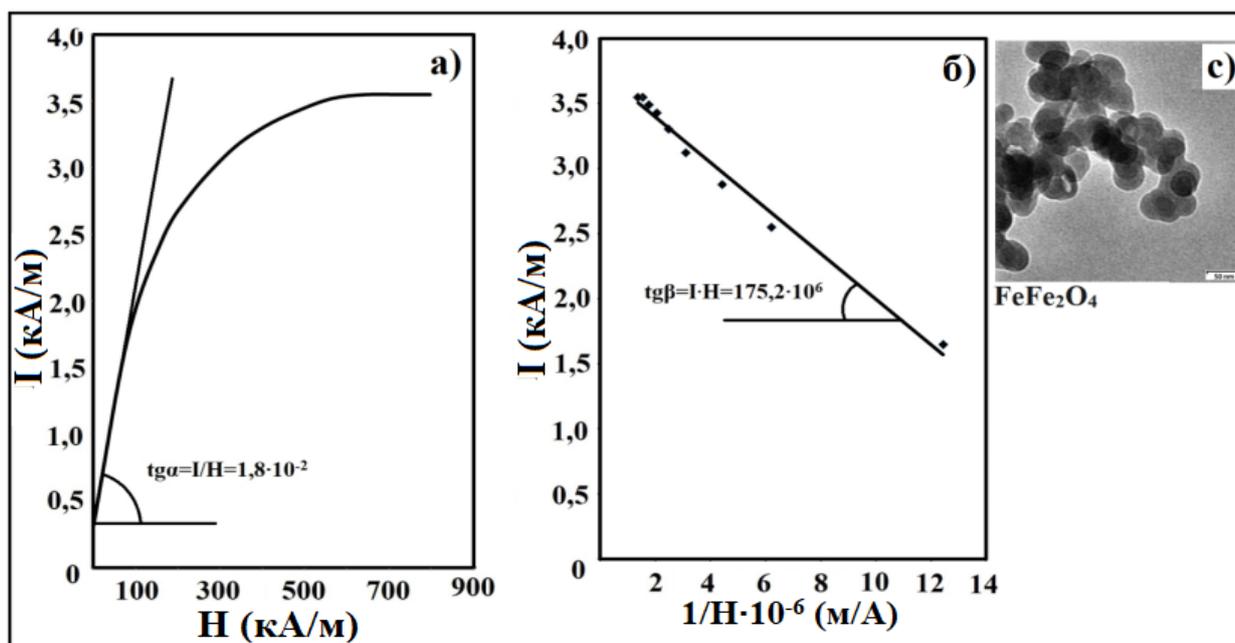
Ланжевен назариясидан фойдаланган ҳолда магнит суюқликларнинг тажрибада олинган магнитланишининг ташқи магнит майдонга -  $I=I(H)$  ва магнитланишни магнит майдоннинг тескари қийматига -  $I=I(1/H)$  боғлиқлиги графигидан, суюқлик зарраларининг диаметри ярим – эмпирик таҳлил қилинди ва микроскопда олинган натижалар билан таққосланди. Бунинг учун графикнинг дастлабки қисмидан қиялик бурчагини аниқлаш орқали суюқликдаги зарралар диаметрини қуйидаги формуладан фойдаланиб аниқланди:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot \text{tg}\alpha \cdot kT \cdot \varphi}{\pi\mu_0 I_{\infty}^2}} \quad (5)$$

$$d_{\infty} = \sqrt[3]{\frac{6kT}{\pi\mu_0 \cdot \text{tg}\beta}} \quad (6)$$

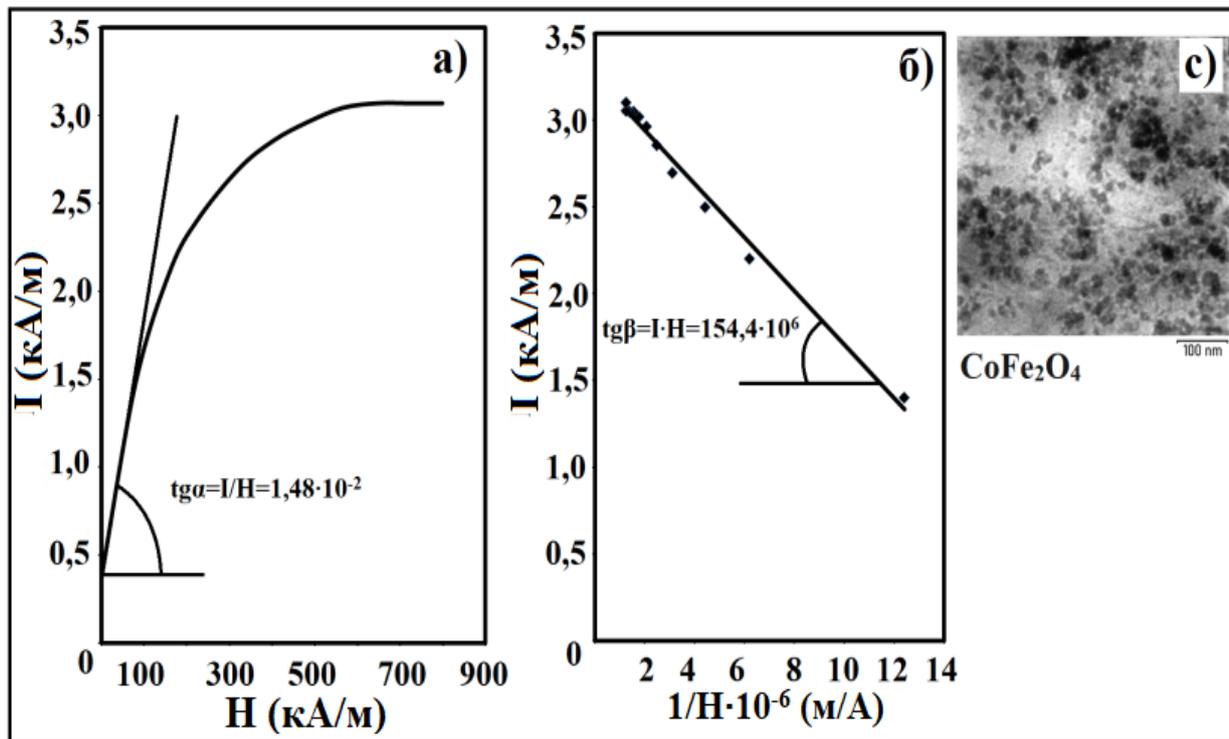
бу эрда,  $d_0, d_{\infty}$  – суюқлик магнитланиши эгри чизиғининг дастлабки ва охириги қисмида аниқланган бурчакга мос зарра диаметри,  $I_{\infty}$  – магнит суюқликнинг тўйиниш магнитланиши,  $\varphi$  – магнит суюқлик зарраларининг ҳажмий концентрацияси,  $\text{tg}\alpha$  ва  $\text{tg}\beta$  – суюқлик  $I=I(H)$  ва  $I=I(1/H)$  графикдан аниқланган бурчак тангенци.

Магнит суюқлик зарралари ўлчами бўйича ТЭМ да олинган ва ярим-эмпирик ҳисобланган натижалар 5-8 расмларда ва 3-жадвалда келтирилган.

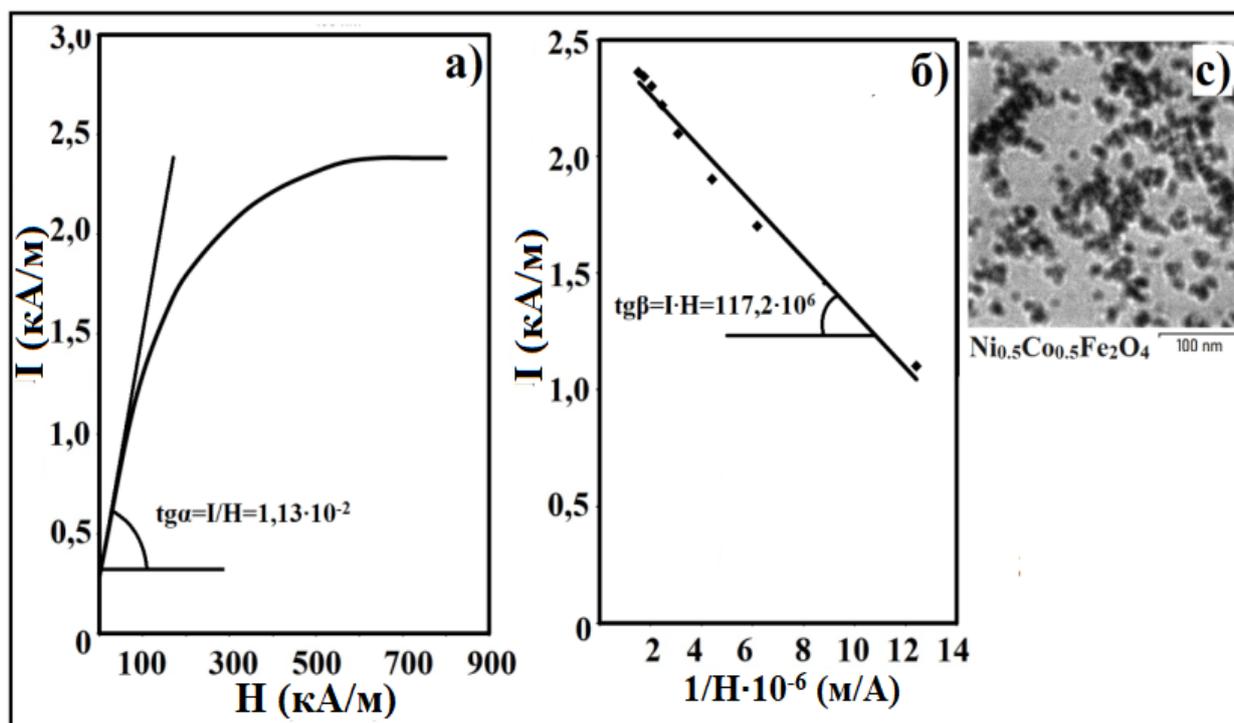


5-расм.  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  магнит суюқлик учун а)  $I=I(H)$ ; б)  $I=I(1/H)$ ; в) ТЭМ да олинган фотосурати.

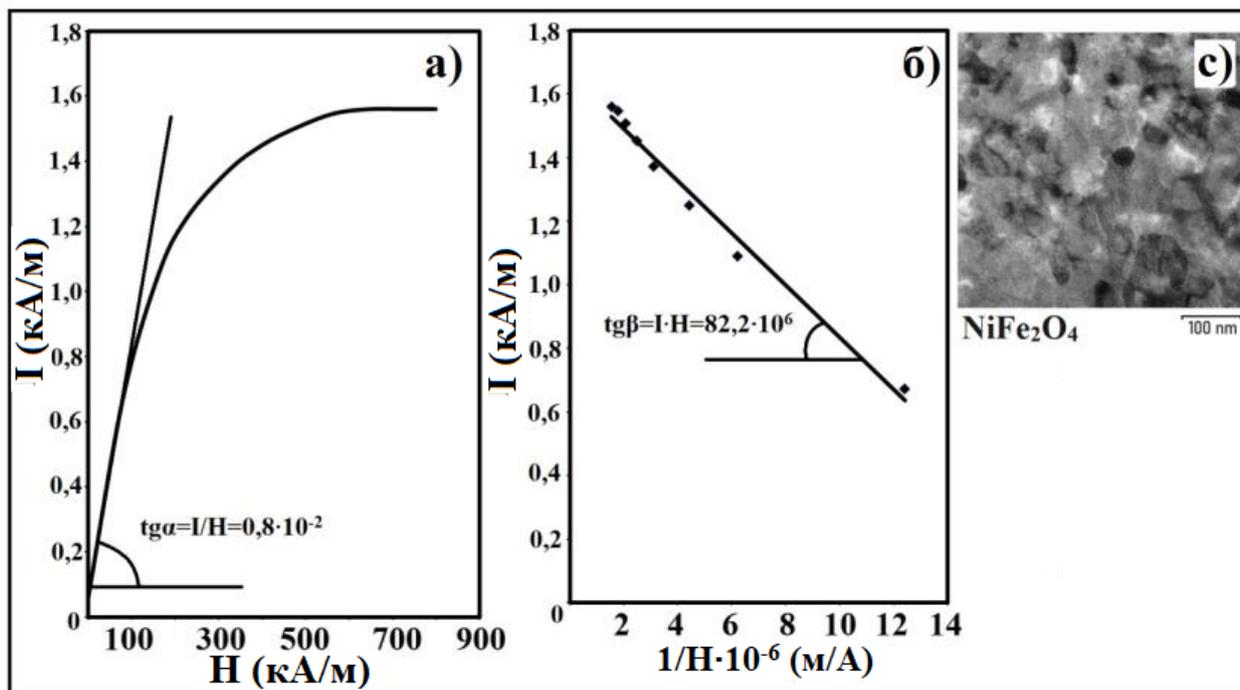
Натижалардан кўриш мумкинки, магнит суюқлик зарраларининг диаметри учун ярим-эмпирик ҳисобланган ва ТЭМ да олинган тажриба натижалари бир-бирига яхши мос келади.



6-расм.  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  магнит суюқлик учун а)  $I=I(H)$ ; б)  $I=I(1/H)$ ; с) ТЭМ да олинган фотосурати



7-расм.  $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  магнит суюқлик учун а)  $I=I(H)$ ; б)  $I=I(1/H)$ ; с) ТЭМ да олинган фотосурати.



8-расм.  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  магнит суюқлик учун а)  $I=I(H)$ ; б)  $I=I(1/H)$ ; с) ТЭМ да олинган фотосурати.

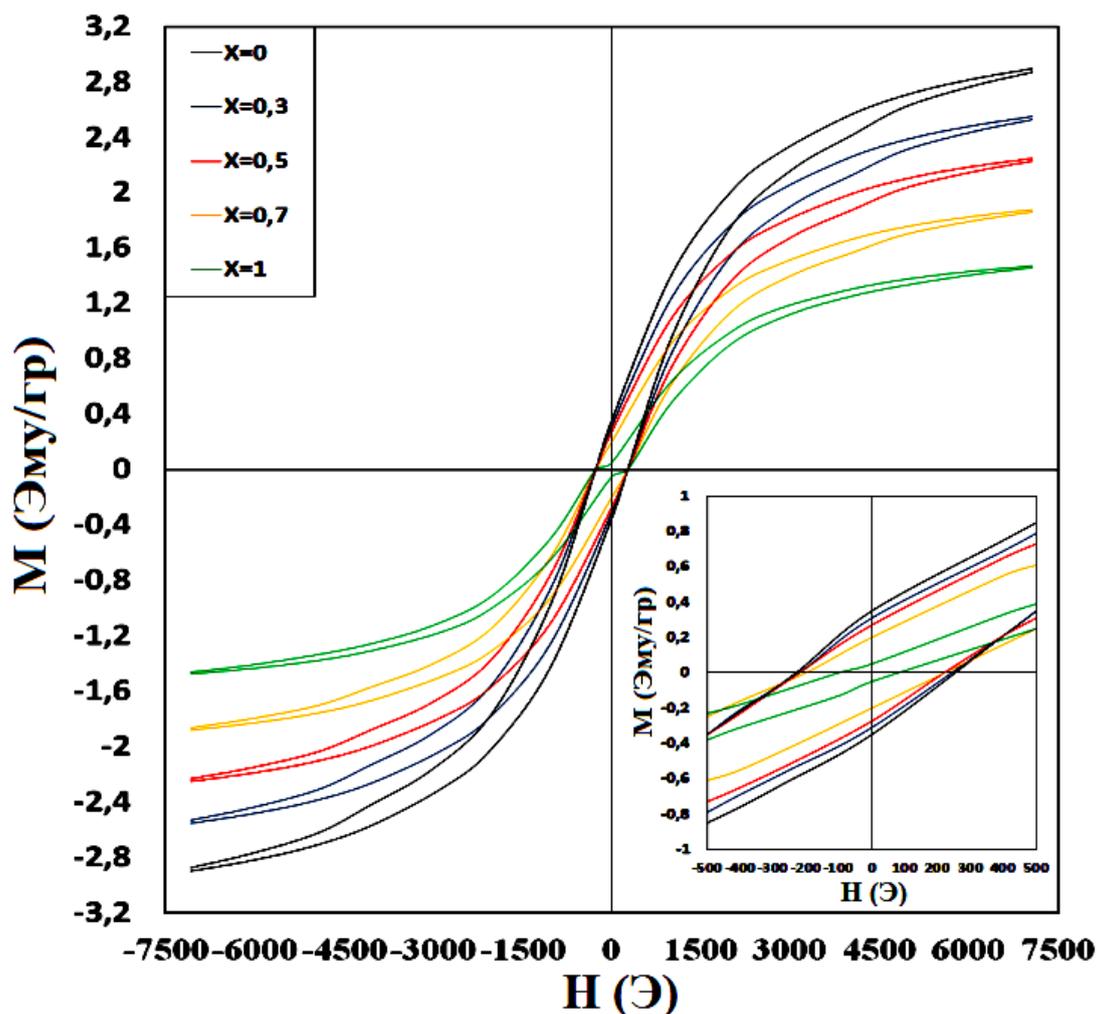
3-жадвал.

$\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,5; 1$ ) магнит суюқлик зарраларининг гистерезис эгри чизигидан фойдаланиб ярим-эмпирик ҳисобланган ва ТЭМ да олинган диаметрлари

Намуна	$tg\alpha$ ( $10^{-2}$ )	$tg\beta$ ( $10^6 \text{ A}^2/\text{M}^2$ )	D (нм) (ярим-эмпирик ҳисобланган)	D (нм) (Тажриба)
$\text{FeFe}_2\text{O}_4$	1,8	175,2	8,57 – 32,85	25 – 38
$\text{CoFe}_2\text{O}_4$	1,48	154,4	8,00 – 34,26	10 – 30
$\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,13	117,2	7,35 – 37,55	10 – 25
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	0,8	82,2	6,55 – 37,09	7 – 30

Магнит суюқликларнинг магнит хоссаси, қаттиқ зарраларнинг ҳолати ва уларнинг магнит тартибланиш даражаси билан белгиланади.  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарраларнинг 1 % ҳажмий концентрацияли магнит суюқликлар солиштирма магнитланишини ташқи магнит майдон кучланганлигига боғлиқлиги хона температурасида тебранишли магнитометр қурилмасида ўлчанди. Ўлчаш натижалари 9-расмда келтирилган. 9-расмдаги графикдан кўринадики, намуналарнинг магнитланиши магнит майдонининг ошиши билан ортади ва тўйиниш қиймати эришади. Графикдан тўйиниш магнитланиш, қолдиқ магнитланиш ва коэрцитив кучнинг қийматларини аниқланди. Бу қийматлар 4-жадвалда келтирилган. Тадқиқот натижаларга кўра суюқликларнинг тўйиниш магнитланиши, қаттиқ фазасидаги никель ионларнинг концентрацияси ортиши билан 2,9 эму/гр дан 1,5 эму/гр гача камади (4-жадвал). Магнитланишининг бундай ўзгариши зарралар кристалл панжарасида, магнит моменти  $m=3\mu_B$  бўлган  $\text{Co}^{2+}$  ионларнинг ўрнини,

магнит моменти  $m=2\mu_B$  бўлган  $Ni^{2+}$  ионлари эгаллаб бориши билан тушинтириш мумкин.



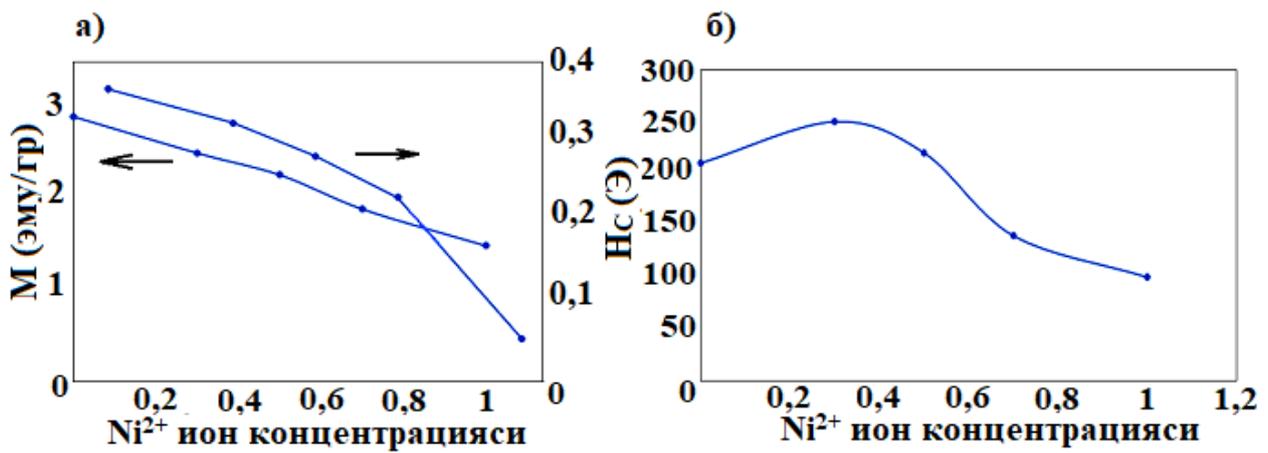
9-расм.  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x = 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) магнит суюқлигининг солиштирма магнитланиш гистерезиси

4-жадвал.

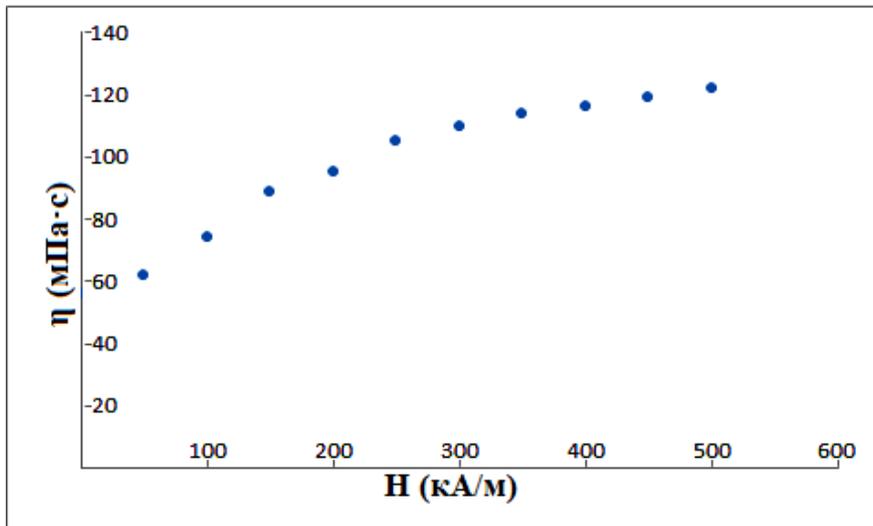
$Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x = 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) магнит суюқликларнинг магнит характеристикалари

Намуна	$M_T$ (эму/гр)	$M_C$ (эму/гр)	$H_C$ (Э)
$CoFe_2O_4$ магнит суюқлиги	2,9	0,35	210
$Ni_{0,3}Co_{0,7}Fe_2O_4$ магнит суюқлиги	2,5	0,31	250
$Ni_{0,5}Co_{0,5}Fe_2O_4$ магнит суюқлиги	2,26	0,27	220
$Ni_{0,7}Co_{0,3}Fe_2O_4$ магнит суюқлиги	1,89	0,22	140
$NiFe_2O_4$ магнит суюқлиги	1,5	0,05	100

Магнит майдон нолга тенг ( $H=0$ ) бўлганда иссиқлик энергияси туфайли, магнит суюқлик зарралари магнит моментининг тебранишлари юзага келади ва натижада уларнинг йўналиши вақтнинг исталган қийматида турли томонга йўналган бўлади. Шу сабабли магнит суюқликлар қолдиқ магнитланишининг қиймати тўйиниш магнитланишидан анча кичик бўлади (10-расм).



10-расм.  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) магнит суюқликларнинг а) солиштирма тўйиниш магнитланиши, қолдиқ магнитланиши ва б) коэрцитив кучнинг  $Ni^{2+}$  ионлари концентрациясига боғлиқлиги



11-расм.  $NiFe_2O_4$  магнит суюқликнинг ёпишқоқлик коэффициентини ташқи магнит майдонга боғлиқлиги

Бундай хоссага эга моддалар суперпарамагнетиклар деб аталади ва зарраларнинг ўлчами куйидаги ифода билан аниқланадиган критик қийматдан кичик бўлганда суперпарамагнет ҳолатга ўтади:

$$d_k = \left( \frac{144kT}{\pi\mu_0 M^2} \right) \quad (7)$$

бу ерда  $k$ -Болцман доимийси,  $M$  – модданинг тўйиниш магнитланиши,  $\mu_0$ -магнет доимийси.

$Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  намуналарда учта магнит ўзаро таъсир мавжуд бўлиб: А ҳолатидаги ионлар орасидаги магнит ўзаро таъсир ( $J_{AA}$ ), В ҳолатидаги катионлар орасидаги магнит ўзаро таъсир ( $J_{BB}$ ) ва турли кристалли ҳолатдаги магнит катионлар орасидаги ( $J_{AB}$ ) магнит алмашинув ўзаро таъсирларга бўлинади. Коэрцитив кучнинг қиймати  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  зарраларининг ўлчамига, шаклига, шунингдек, улар орасидаги магнит ўзаро таъсирининг кучига боғлиқ. Тескари шпинел тузилишга эга  $CoFe_2O_4$  нанозарраларга

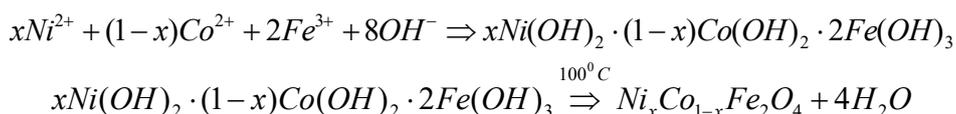
никель  $Ni^{2+}$  катионлари қўшимча киритилиши ҳисобига, В кристаллографик ҳолатидаги кобальт миқдори камаяди ва кобальтли феррит атомлари ўртасидаги алмашинув ўзаро таъсирининг камайишига олиб келади. Бу эса коэрцитив кучнинг қийматини ҳам камайишига сабаб бўлади (10-расм).

$NiFe_2O_4$  нанозарралар асосидаги магнит суюқликларнинг ёпишқоқлик коэффицентини ташқи магнит майдонга боғлиқлиги ўрганилди. Олинган натижалари 11-расмда келтирилган. 11 – расмдан кўриш мумкинки, магнит майдон кучланганлиги ортиши билан суюқлик ёпишқоқлик коэффицентини дастлаб чизиқли ортиб боради, сўнгра эгриланади ва ўзгармасдан қолади (ёпишқоқлик “тўйинади”). Бундай боғланишни қуйидагича тушинтириш мумкин. Заррачалар магнит моментларининг йўналишлари ташқи майдон йўналишида қатъий тартибланиши ҳисобига қўшимча айлантурувчи механик момент пайдо бўлади ва заррачаларнинг магнит моментларини айланиши содир бўлади. Бу механик момент, ишқаланиш кучининг механик моментга қарама-қарши йўналган бўлади ва оқимдаги зарраларнинг эркин айланишига тўсқинлик қилади. Бу эса суюқлик қатламлари орасида қўшимча ишқаланиш ҳосил бўлишига олиб келади. Шунинг ҳисобига магнит суюқликнинг ёпишқоқлик коэффицентини ортиши кузатилади.

## ХУЛОСА

Таркибида никель, кобальт, темир бўлган нанозарраларнинг Рентгенофазавий, Рентгеноспектрал, морфологик тадқиқ қилиш ва бу нанозарралар асосидаги суперпарамагнит суюқликларнинг магнит хоссасини ўрганиш натижалари асосида қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Биринчи марта кимёвий конденсация усулида  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) нанозарралар асосида суперпарамагнит суюқликлар синтез қилинди. Буни рентгеноспектрал (ЭДХ) таҳлили



реакция натижасида суюқликнинг кутилган зарралари муваффақиятли синтез қилинганини тасдиқлади.

2. Синтез қилинган суперпарамагнит суюқликларнинг хона температурасида солиштирма магнитланишининг ташқи магнит майдонига боғлиқлиги (-800;+800) Э оралиғида экспериментал ўрганилди.  $M=M(H)$  гистерезисидан фойдаланиб, намуналарнинг асосий магнит характеристикалари: тўйинган магнитланиш ( $M_T$ ), қолдиқ магнитланиш ( $M_K$ ) ва коэрцитив кучнинг ( $H_C$ ) қийматлари аниқланди;

3. Ўрганилаётган суперпарамагнит суюқликларнинг  $M=M(H)$  экспериментал боғлиқликларини Ланжевеннинг парамагнетизм назарияси доирасида тушунтириш мумкинлиги кўрсатилди. Магнитланиш гистерезисидан фойдаланиб ҳисобланган суперпарамагнит зарраларнинг ўлчами (8,57-32,85; 8,00-34,26; 7,35-37,55, 6,55-37,09), электрон микроскопта

олинган (25-38 нм, 7-30 нм, 10-30 нм, 10-25 нм) тажриба натижалари билан яхши мос келиши аниқланди.

4. Дебай-Шеррер формуласи ёрдамида рентгенофазавий таҳлил спектридан аниқланган нанозарраларнинг кристаллит ўлчами ва электрон микроскопда аниқланган чизиқли ўлчами (диаметри), бу зарраларни ферромагнит ҳолатдан суперпармагнит ҳолатга ўтишидаги ўлчамининг критик қиймати ( $d_{кр}=45$  нм) дан кичик эканлиги кўрсатилди. Бинобарин, бу намуналар суперпарамагнитик табиатга эга моддалардир.

5. Кукунсимон  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) намуналарда  $Ni^{2+}$  иони концентрацияси ортиши билан зарраларнинг кристаллит ўлчами ва панжара доимийсининг камайиши намуна атомлари орасида амалга ошадиган алмашинув таъсир энергиясининг камайишига олиб келади. Бу эса ўрганилаётган намуналарнинг тўйинган магнитланиш ( $M_T$ ), қолдик магнитланиш ( $M_K$ ), ва коэрцитив кучининг ( $H_C$ ) камайишига сабаб бўлди.

6.  $NiFe_2O_4$  магнит суюқликда ташқи магнит майдон кучланганлиги ортиши билан суюқлик ёпишқоқлик коэффициенти дастлаб чизиқли ортиши кузатилди, сўнгра майдон кучланганлигининг 500 кА/м қийматида туйинишга эришиши аниқланди. Намуналарда ёпишқоқлик коэффициентининг ортиши суюқлик заррачаларнинг магнит моментларининг йўналишлари ташқи майдон йўналишида қатъий тартибланиши туфайли пайдо бўлувчи кўшимча айлантурувчи механик момент суюқлик қатламлари орасида кўшимча ишқаланиш ҳосил қилиши туфайли юз бериши кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

---

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
ШАРОФА РАШИДОВА**

**КАЮМОВ ХАФИЗ АСЛИДДИН УГЛИ**

**ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ  
ЖИДКОСТЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ НИКЕЛЬ, КОБАЛЬТ, ЖЕЛЕЗО**

**01.04.09 - Физика магнитных явлений**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание доктора философии (PhD) по физико-математическим  
наукам**

**Самарканд – 2022**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2020.4.PhD/FM548.**

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** **Кувандиков Облакул Кувандикович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Мукимов Камил Мукимович**  
доктор физико-математических наук, академик

**Мавланов Гиёсиддин Хайдарович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** **Бухарский государственный университет**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_ часов на заседании Ученого совета PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 при Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: [rektor@samdu.uz](mailto:rektor@samdu.uz) Самаркандский государственный университет Физический факультет, 1-этаж, 63-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова (зарегистрирована под №\_\_). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.  
(протокол рассылки №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.)

**М.Х. Ашуров**  
Председатель научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., академик

**Р.М. Ражабов**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
к.ф.-м.н., доцент

**Д.И. Семенов**  
Председатель научного семинара при научном  
совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., доцент

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире сегодня очень актуально изучение физико-химических свойств и внутренней структуры порошков и коллоидных растворов на основе наночастиц, содержащих 3d-металлы. В настоящее время большой интерес вызывает изучение магнитных свойств магнитных жидкостей на основе наночастиц, содержащих металлы Ni, Co и Fe. В последние годы экспериментальные и теоретические исследования расширили область применения таких материалов. В частности, в настоящее время в мире магнитные жидкости применяются в технике при гашении колебаний демпфирующих систем, при герметизации вакуумных систем, в качестве смазочных материалов, в медицине при доставке лекарств в нужную точку человеческого организма, а также при лечении злокачественных опухолей с помощью гипертермии, в качестве контрастного вещества при томографических и рентгенологических исследованиях, при отделении немагнитных веществ в горнодобывающей промышленности. Изучение намагничивающих свойств жидкостей, содержащих ферромагнитные наночастицы, во внешнем магнитном поле имеет большое значение при решении сложнейших задач химической промышленности и медицинской физики. Также недостаточно изучена микроструктура магнитных жидкостей на основе наночастиц, содержащих одновременно металлы Ni, Co, Fe, и причины их разной природы намагничивания.

В нашей стране большое внимание уделяется практическому использованию локально синтезированных материалов физико-химическими методами, например, для повышения производительности металлургической промышленности, совершенствования методов лечения онкологических заболеваний, разработки технологий фармацевтической промышленности. Поэтому изучение физических свойств ферромагнитных наноматериалов и их коллоидных растворов остается одной из актуальных задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени основано на Указе Президента Республики Узбекистан от 8 октября 2019 г. №ПФ-5847 “Об утверждении концепции развития системы высшего образования республики Узбекистан до 2030 года”, основных задачах, поставленных перед развитием физики в его Послании Олий Мажлису<sup>2</sup> от 29 декабря 2020 года, Указе от 19 марта 2021 года №П-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики», Указе от 13 января 2022 года №ПҚ-82 «О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Самаркандского государственного университета» и других нормативных актах, относящихся к этой деятельности.

**Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Диссертация выполнена в

---

<sup>2</sup>Послание Президента Республики Узбекистан Шавката Мирзиёева Олий Мажлису // Народное слово 2020 г., 30 декабрь, №275-276 (7746-7747) С.1

соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Степень изученности проблемы.** В последние годы зарубежными учеными Р. Э. Розенвейг (США), Е. И. Кондорский, Б. М. Берковский, В. С. Чеканов, Ю. И. Диканский (Россия), Л. А. Булавин, П. П. Горбик (Украина), Дж. Хемалата (Индия), Дж. Ли, Х. М. Гонг (Китай), С. Такетоме, С. Тикадзуми (Япония) как теоретически, так и экспериментально исследованы методы получения наночастиц с общей формулой  $A_xV_{1-x}Fe_2O_4$  (где А и В - двухвалентные ионы металлов) и магнитных жидкостей на их основе, распределение частиц по размерам, их механические, электрические, магнитные и химические свойства.

А также большой вклад в развитие этого направления внесли академики С.З. Муминов, А.С. Содиков, К.А. Ахмедов, профессора Ф.И. Файзуллаев, Н.К. Мухамадиев, Р.И. Исмаилов, К.Ф. Халилов и другие.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований, проведенных за последние годы, показал, что в настоящее время отсутствует единая теория внутреннего строения и свойств магнитных жидкостей на основе  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) и причины их различной магнитной природы изучены недостаточно.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертационная работа.** Диссертация выполнена в рамках договора №11 «О проведении научных исследований, подготовки кадров и обучении студентов и молодежи», заключенных между кафедрой общей физики Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова и ОАО «Навоийский горно-металлургический комбинат».

**Цель исследования.** Изучение механизмов формирования микроструктуры магнитных жидкостей на основе наночастиц  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) и зависимости их намагниченности от концентрации ионов  $Ni^{2+}$  во внешнем магнитном поле при комнатной температуре.

**Задачи исследования:**

- исследование размера и морфологии наночастиц  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ), полученных методом химической конденсации;
- выявление кристаллической структуры и элементного состава порошкообразных наночастиц  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ );
- установление зависимости удельной намагниченности магнитных жидкостей на основе  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) от величины напряженности внешнего магнитного поля;
- определение на основе экспериментальных зависимостей  $M=M(H)$  основных магнитных характеристик исследуемых образцов (удельной намагниченность насыщения –  $M_H$ , остаточная намагниченность –  $M_0$ , коэрцитивные силы -  $H_C$ ) и проведение полуэмпирических расчетов размеров частиц жидкости;

- проведение сравнительного анализа экспериментально измеренного диаметра наночастиц  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) в магнитной жидкости с полуэмпирическими расчетами в рамках теории Ланжевена.

**Объектом исследования** являются магнитные жидкости на основе наночастиц  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ), синтезированные методом химической конденсации. В качестве дисперсной фазы использовалась вода.

**Предметом исследования** являются механизмы формирования суперпарамагнитных упорядочений в магнитных жидкостях на основе наночастиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) при воздействии внешнего магнитного поля и влияние на намагниченность концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  в твердой фазе.

**Методы исследования.** В диссертации использованы магнитометрический метод измерения удельного намагничивания магнитных жидкостей  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ), метод просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) для измерения размеров наночастиц и морфологического анализа, метод рентгенофазового анализа кристаллической структуры, метод количественного анализа элементного состава (ЭДХ).

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

- методом химической конденсации впервые успешно синтезированы магнитные жидкости со стабильными суперпарамагнитными свойствами на основе наночастиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) с однодоменной структурой;

- впервые изучена зависимость удельной намагниченности магнитной жидкости на основе наночастиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) от концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  во внешнем магнитном поле. Было обнаружено, что эти образцы обладают малой остаточной намагниченностью и малой коэрцитивной силой

- по экспериментальным зависимостям удельной намагниченности от внешнего магнитного поля  $M=M(H)$  исследованных образцов полуэмпирически установлены размеры частиц в жидкости и сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными методом электронного микроскопа (ПЭМ);

- установлено, что диаметр частиц исследуемой магнитной жидкости меньше их критического значения для перехода в суперпарамагнитное состояние ( $d < d_{\text{кр}} = 45$  нм), и показано, что размер частиц играет ключевую роль в формировании суперпарамагнитной природы исследованных образцов.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

на основе определяемых физических величин показана возможность установления механизмов формирования микроструктуры и магнитных характеристик магнитных жидкостей в феррогидродинамике и физической химии, а также идентификации и понимания процессов образования агрегатов в различных растворах;

исследованные образцы, обладающие суперпарамагнитной природой при комнатной температуре, могут быть предложены в качестве нового перспективного материала при отделении немагнитных веществ в горнодобывающей промышленности и при очистке сточных вод от нефтяных остатков в нефтяной промышленности, а также в качестве нового перспективного материала в лечении онкологических и гипертермических заболеваний в медицинской сфере.

**Достоверность результатов** основана на использовании надежных экспериментальных методов, широко применяемых в научных исследованиях, и использовании современных рентгеновских спектрометров XRD Empyrean analytical, X-ACT Silicon Drift Detector, электронного микроскопа TEM LEO 912 AB, а так же вибрационного магнитометра, признанными ведущими мировыми учеными. Полученные экспериментальные результаты и сделанные на их основе выводы согласуются с данными современных исследований, посвященных изучению внутренней структуры и намагничивающих свойств ферромагнитных наночастиц. Подтверждено, что полученные результаты удовлетворительно согласуются с представленными в научной литературе данными, полученными другими экспериментальными методами, и не противоречат им.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследований заключается в том, что результаты, проанализированные в соответствии с современными теориями магнетизма, служат дальнейшему развитию физических представлений о магнитной природе наночастиц, содержащих 3d-металлы, магнитных жидкостей на их основе, и кристаллической структуре порошкообразных  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  наночастиц.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что полученные результаты важны для объяснения физических свойств нанокompозитных материалов с 3d-элементами и решения проблемы создания магнитных материалов с контролируемыми свойствами.

**Внедрение результатов исследования.** Результаты исследования магнитных свойств суперпарамагнитных жидкостей, содержащих никель, кобальт, железо были использованы в фундаментальном проекте БВ-Ф4-014 «Развитие математических основ магнитоупругости и прикладных методов решения задачи о магнитоупругих колебаниях тонкостенных элементов электронных устройств, микро- и нано - систем в магнитном поле с учетом электромагнитной совместимости» (Справка Самаркандского филиала ГАТУ от 4 октября 2022 года). Применение научных результатов позволило решить проблемы электромагнитной совместимости и магнитоупругости тонких резистивных элементов в микро- и наносистемах и проанализировать возникающие в них электромагнитные эффекты;

В диссертации методом химической конденсации синтезированы порошковые образцы на основе наночастиц  $FeFe_2O_4$  и  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ).

Синтезированные порошкообразные образцы представляют возможность использования при отделении немагнитных веществ в рудах на АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» (Акт внедрения № 24.01-01-11/2013 от 14.10.2022).

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертации были представлены и обсуждены на 3 международных и 2 республиканских научных конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Всего по теме исследования 11 научных работ, в том числе 6 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов диссертаций ВАК РУз (в том числе 2 в Scopus и 4 в республиканских журналах), остальные 5 опубликованы в сборниках материалов и тезисов докладов международных и республиканских конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 113 страниц машинописного текста, включая 50 рисунка и 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

**В первой главе** диссертации «**Научно-исследовательские работы по структуре и магнитным свойствам магнитных жидкостей (обзор литературы)**» приводится обзор литературы, посвященной экспериментальному и теоретическому изучению магнитных свойств магнитных жидкостей, методов получения и областей применения. В конце первой главы сформулированы цели и задачи для выполнения диссертационной работы.

**Во второй главе** «**Методика и техники экспериментальных исследований**» приведено описание экспериментальной установки и методики исследования, приводятся методы приготовления образцов. Детальный анализ показал, что максимальная погрешность измерений на исследовательских приборах не превышает 2,5%.

**В третьей главе** диссертации «**Микроструктура, морфология и магнитные свойства магнитных жидкостей на основе  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ )**» представлены результаты исследования кристаллической структуры, элементного состава, морфологического анализа порошковых

наночастиц  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) и зависимости удельной намагниченности магнитных жидкостей на основе этих частиц от напряженности внешнего магнитного поля при комнатной температуре.

Результаты исследования кристаллической структуры наночастиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) представлены на рис.1а. Все дифракционные пики XRD-спектра показывают, что в образцах формируется однофазная инвертированная кубическая кристаллическая структура шпинели. Ферриты никеля и кобальта имеют сложную кристаллическую структуру, показанную на рисунках 2 и 3, с 56 ионами (т.е. 32  $\text{O}^{2-}$ , 8  $\text{Fe}^{3+}$  и 16  $\text{M}^{2+}$ ;  $\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}$ ) в элементарной ячейке. В этом случае ионы металла  $\text{Fe}^{3+}$  занимают тетраэдрическое состояние, образованное окружением из 4 ионов  $\text{O}^{2-}$ , а остальные ионы  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{M}^{2+}$  занимают октаэдрическое состояние, окруженное 6 ионами кислорода  $\text{O}^{2-}$  (рис.2). Вещества с такой кристаллической решеткой называют структурами обращенной шпинели.

Среднее значение размера кристаллитов наночастиц было рассчитано с использованием уравнения Дебая-Шерера по пику наивысшей интенсивности (311) спектра XRD:

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны рентгеновского излучения,  $\beta$  - полуширина пика, а  $\theta$  - угол, под которым формируется пик.

Также видно, что с увеличением концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  пик, который соответствует порядку (311), в спектре смещается вправо по горизонтали (рис.1б). Это означает, что увеличение концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  оказывает влияние на размер кристаллитов наночастиц образца.

Постоянная кристаллической решетки частиц определялась по следующей формуле:

$$d = d_{hkl} \cdot (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} \quad (2)$$

где  $d_{hkl}$  - расстояние между параллельными плоскостями,  $h, k, l$  - индексы Миллера.

Плотность частиц определялась по следующей формуле:

$$\rho = 8M / N_A \cdot d^3 \quad (3)$$

где  $M$  - молекулярная масса частиц,  $N_A$  - постоянная Авогадро,  $d$  - постоянная кристаллической решетки.

Полученные результаты приведены в таблице 1. Как видно из табл. 1, размер кристаллитов находится в диапазоне 15–22 нм. Постоянная решетки порошкообразных образцов  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  уменьшается с увеличением концентрации  $\text{Ni}^{2+}$ , но увеличивается плотность образцов (рис.3). Такие изменения можно объяснить тем, что ион  $\text{Ni}^{2+}$  (0,69 Å) имеет меньший радиус, чем ион  $\text{Co}^{2+}$  (0,74 Å). Элементный состав порошковых образцов

$\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7$ ) был исследован методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). На рис. 4 показан EDX-спектр образца  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7$ ).

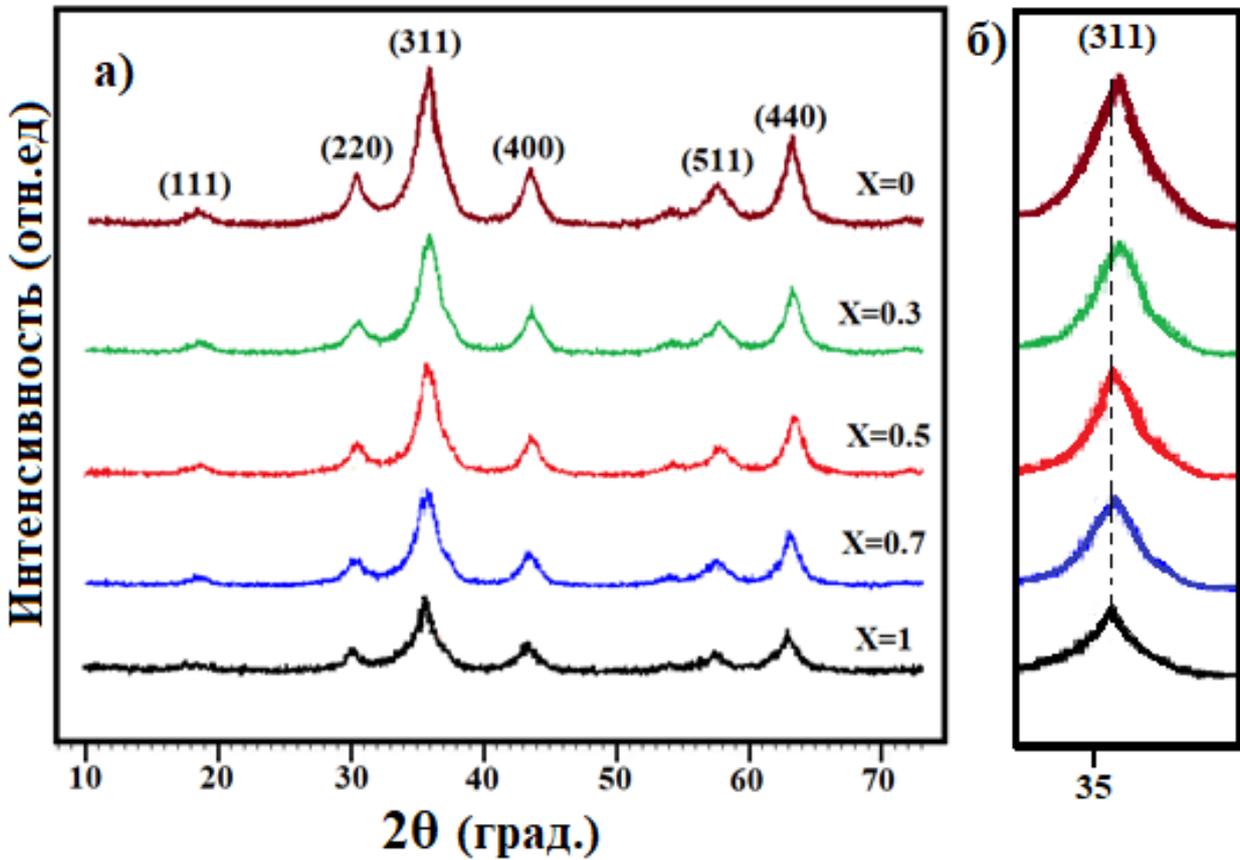


Рис.1. Спектр XRD порошковых наночастиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ )

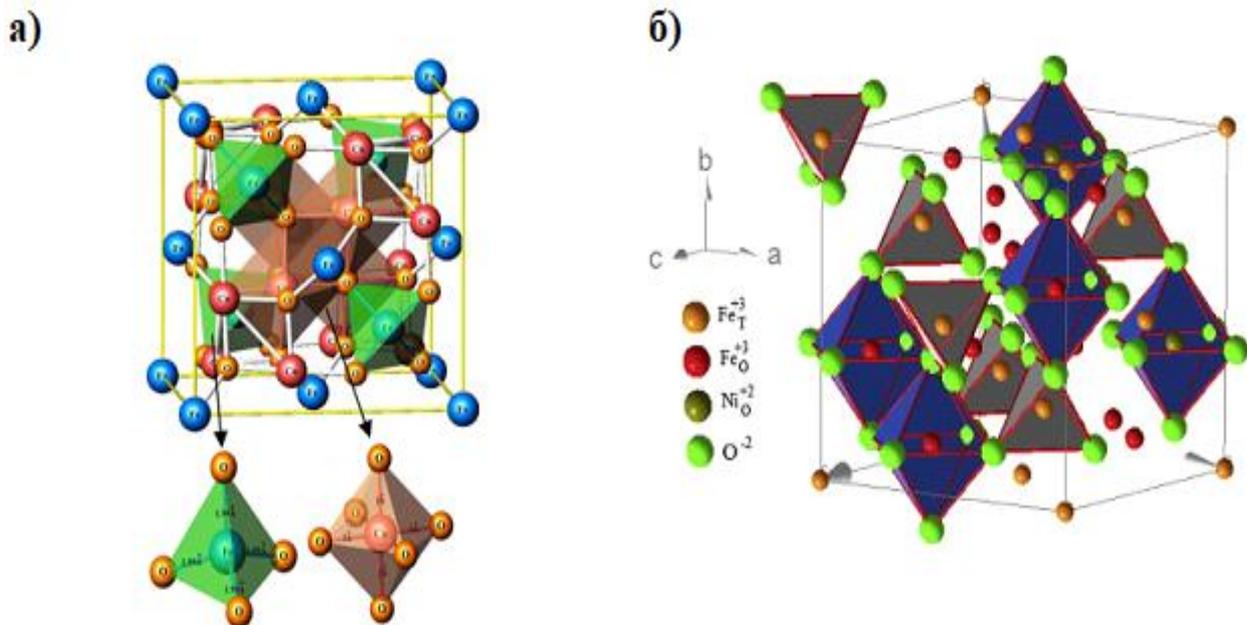
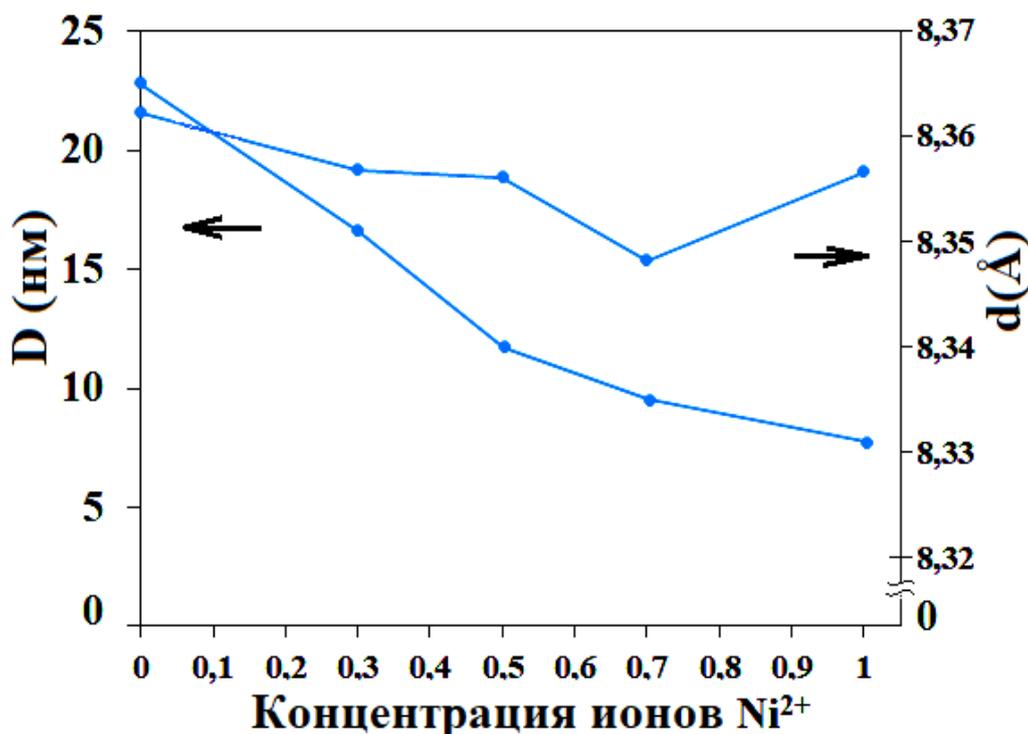


Рис.2. Кристаллическая структура наночастиц: а) феррит кобальта ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) б) феррита никеля ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ )

Таблица 1.

**Результаты рентгенофазового анализа образцов  
Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1).**

Образец	D (нм)	d (Å)	ρ (г/см <sup>3</sup> )
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	21,6	8,365	5,312
Ni <sub>0,3</sub> Co <sub>0,7</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	19,2	8,351	5,324
Ni <sub>0,5</sub> Co <sub>0,5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	18,9	8,340	5,347
Ni <sub>0,7</sub> Co <sub>0,3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	15,4	8,335	5,352
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	19,1	8,331	5,381

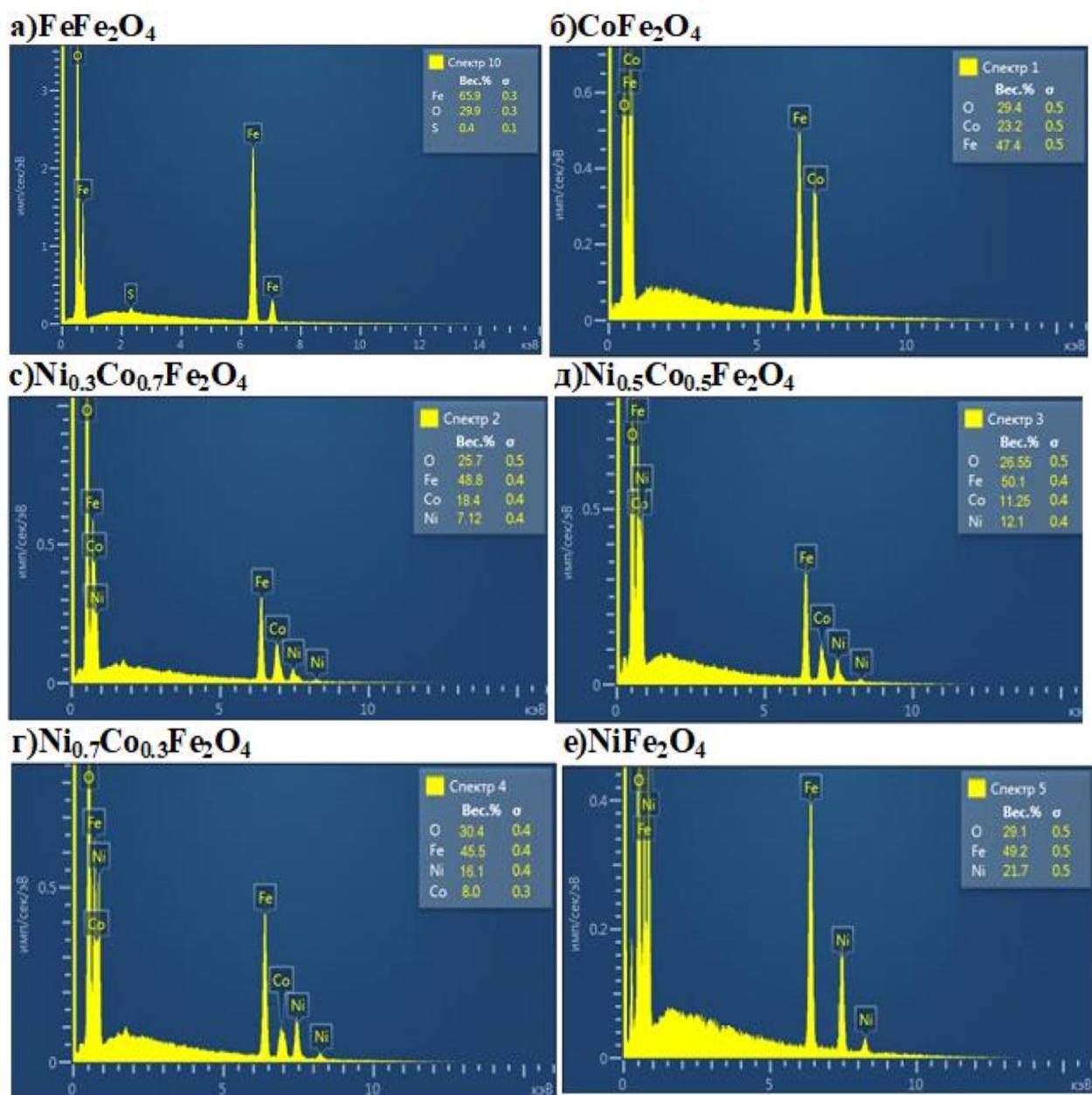


**Рис.3. Зависимость размера кристаллитов и постоянной решетки от концентрации ионов Ni<sup>2+</sup> в порошкообразных образцах Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1)**

Результаты EDX-анализа образцов FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (x = 0; 0,3; 0,5; 0,7) были сопоставлены с экспериментальными результатами, рассчитанными по теоретической формуле  $X = \frac{m_{Ni}(\%)}{m_{Ni}(\%) + m_{Co}(\%)}$  (таблица 2).

Как видно из таблицы 2, синтез образцов был успешно реализован.

Размер и морфология частиц магнитной жидкости на основе FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (x= 0; 0,5; 1) были исследованы с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Полученные результаты показаны на рис.5-8. Из ПЭМ-изображений видно, что частицы образцов имеют сферическую форму. Диаметры частиц FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (x= 0; 0,5; 1) составляют 25-38 нм, 7-30 нм, 10-30 нм, 10-25 нм, соответственно. Магнитные моменты коллоидных частиц в магнитной жидкости всегда находятся в броуновском движении. Поэтому для намагничивания такой системы можно применить теорию парамагнетизма Ланжевена.



**Рис.4. EDX-спектры порошковых образцов  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ )**

**Таблица 2.  
 Результаты EDX-анализа образцов  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ).**

Образцы	Fe (масс. %)	Ni (масс. %)	Co (масс. %)	O (масс. %)	X (ожидаемый результат)	X (результат эксперимента)
$\text{CoFe}_2\text{O}_4$	47,4	0	23,2	29,4	0	0
$\text{Ni}_{0,3}\text{Co}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	48,8	7,12	18,4	25,7	0,3	0,28
$\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	50,1	12,1	11,25	26,55	0,5	0,52
$\text{Ni}_{0,7}\text{Co}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	45,5	16,1	8	30,4	0,7	0,67
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	49,2	21,7	0	29,1	1	1
$\text{FeFe}_2\text{O}_4$	65,9	0	0	29,9	-	-

Основываясь на этой теории, намагниченность системы можно записать следующим образом:

$$I = I_{\infty} L(\xi) \quad (4)$$

где -  $L(\xi) = (\text{cth}\xi - \frac{1}{\xi})$  функция Ланжевена,  $I_{\infty}$  - намагниченность насыщения магнитной жидкости.

Используя теорию Ланжевена, из графика зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля  $I=I(H)$ , и намагниченности от обратной величины внешнего магнитного поля  $I=I(1/H)$ , полученных экспериментально для магнитных жидкостей, диаметр частиц жидкости был проанализирован полуэмпирически и сравнен с результатами, полученными с помощью микроскопа. Для этого диаметр частиц в жидкости был определен по следующей формуле путем определения угла наклона из первой части графика (Рис.5.а):

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot \text{tg}\alpha \cdot kT \cdot \varphi}{\pi\mu_0 I_{\infty}^2}} \quad (5)$$

$$d_{\infty} = \sqrt[3]{\frac{6kT}{\pi\mu_0 \cdot \text{tg}\beta}} \quad (6)$$

где  $d_0$ ,  $d_{\infty}$  - диаметры частицы, соответствующие углам, определенным в начале и конце кривой намагничивания жидкости,  $I_{\infty}$ -намагниченность насыщения магнитной жидкости,  $\varphi$ -объемная концентрация частиц магнитной жидкости,  $\text{tg}\alpha$  и  $\text{tg}\beta$  - угловые касательные, определенные из графиков  $I=I(H)$  и  $I=I(1/H)$  жидкости.

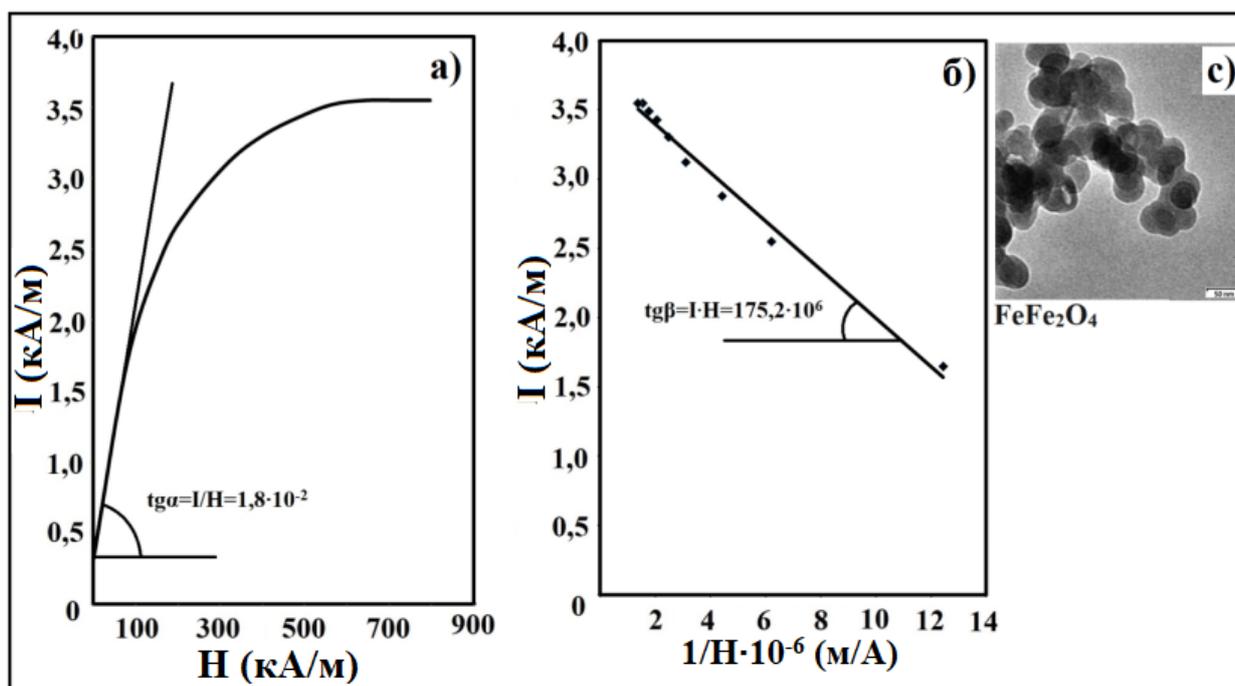


Рис.5. а) график зависимости  $I=I(H)$ ; б) график зависимости  $I=I(1/H)$ ; в) фотография ПЭМ для магнитной жидкости  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ .

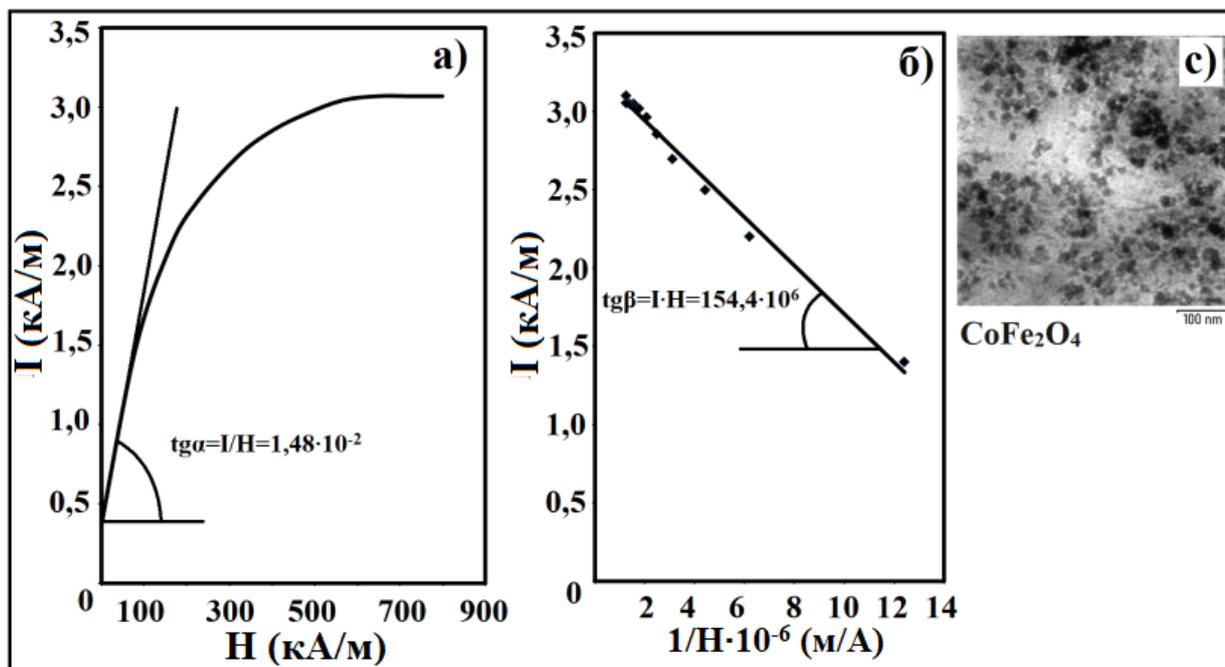


Рис.6. а) график зависимости  $I=I(H)$ ; б) график зависимости  $I=I(1/H)$ ; в) фотография ПЭМ для магнитной жидкости  $CoFe_2O_4$ .

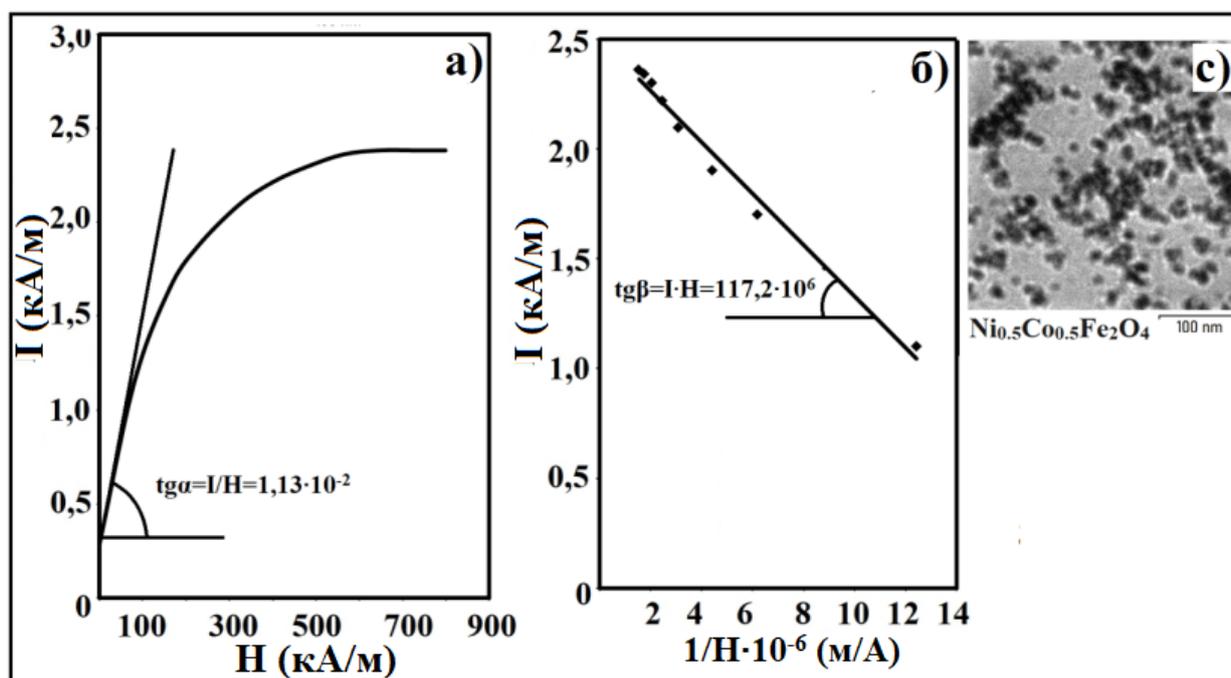


Рис.7. а) график зависимости  $I=I(H)$ ; б) график зависимости  $I=I(1/H)$ ; в) фотография ПЭМ для магнитной жидкости  $Ni_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$

Полуэмпирические результаты, полученные при помощи ПЭМ для измерения частиц магнитной жидкости, представлены на рис.5-8 и в таблице 3. Из результатов видно, что полуэмпирические расчеты диаметра частиц магнитной жидкости и экспериментальные результаты, полученные на ПЭМ, находятся в хорошем согласии друг с другом. Магнитные свойства магнитных жидкостей определяются состоянием твердых частиц и степенью

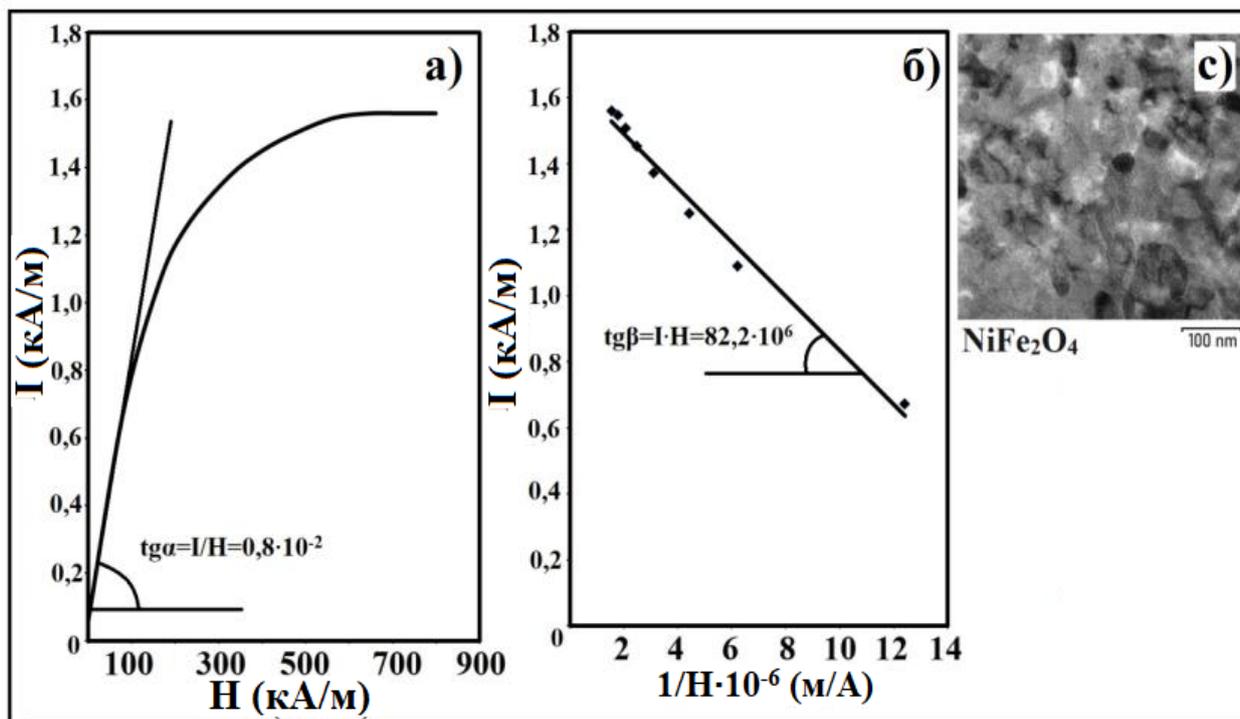


Рис.8. а) график зависимости  $I=I(H)$ ; б) график зависимости  $I=I(1/H)$ ; в) фотография ПЭМ для магнитной жидкости  $NiFe_2O_4$

Таблица 3.

Диаметры  $FeFe_2O_4$ ,  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,5; 1$ ), рассчитанные полуэмпирическим путем с использованием кривой гистерезиса и полученные на ПЭМ.

Образец	$tga$ ( $\cdot 10^{-2}$ )	$tgb$ ( $\cdot 10^6 A^2/M^2$ )	D (нм) (полуэмпирический расчет)	D (нм) (эксперимент)
$FeFe_2O_4$	1,8	175,2	8,57 – 32,85	25 – 38
$CoFe_2O_4$	1,48	154,4	8,00 – 34,26	10 – 30
$Ni_{0,5}Co_{0,5}Fe_2O_4$	1,13	117,2	7,35 – 37,55	10 – 25
$NiFe_2O_4$	0,8	82,2	6,55 – 37,09	7 – 30

их магнитного упорядочения. Зависимость удельной намагниченности магнитных жидкостей с объемной концентрацией 1% наночастиц  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) от напряженности внешнего магнитного поля измерялась с помощью вибрационного магнитометра при комнатной температуре. Результаты измерений приведены на рис.9. Как видно из графика рис.9, намагниченность образцов увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля и достигает значения насыщения. Из графика рис.9 можно определить значения намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Эти значения приведены в таблице 4. Согласно результатам исследований, намагниченность насыщения жидкостей уменьшается с 2,9 эму/гр до 1,5 эму/гр по мере увеличения концентрации ионов никеля в твердой фазе (табл.4). Такое изменение намагниченности можно объяснить тем, что в кристаллической

решетке частиц ионы  $\text{Co}^{2+}$  с магнитным моментом  $m = 3m_B$  заменяются ионами  $\text{Ni}^{2+}$  с магнитным моментом  $m = 2m_B$ .

Когда магнитное поле равно нулю ( $H = 0$ ), из-за тепловой энергии происходят колебания магнитного момента частиц магнитной жидкости, и в результате их направление различно в любой момент времени. Следовательно, величина остаточной намагниченности магнитных жидкостей была намного меньше, чем намагниченность насыщения (рис.10). Вещества с такими свойствами называются суперпарамагнетиками, а явление суперпарамагнетизма возникает, когда размер частиц меньше критического значения, определяемого выражением:

$$d_K = \left( \frac{144kT}{\pi\mu_0 M^2} \right) \quad (7)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана,  $M$  - намагниченность насыщения вещества.

В образцах  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  существует три вида магнитного взаимодействия: магнитное взаимодействие  $J_{AA}$  между ионами в состоянии  $A$ , магнитное взаимодействие  $J_{BB}$  между катионами в позиции  $B$  и магнитное обменное взаимодействие  $J_{AB}$  между магнитными катионами в различных кристаллических состояниях.

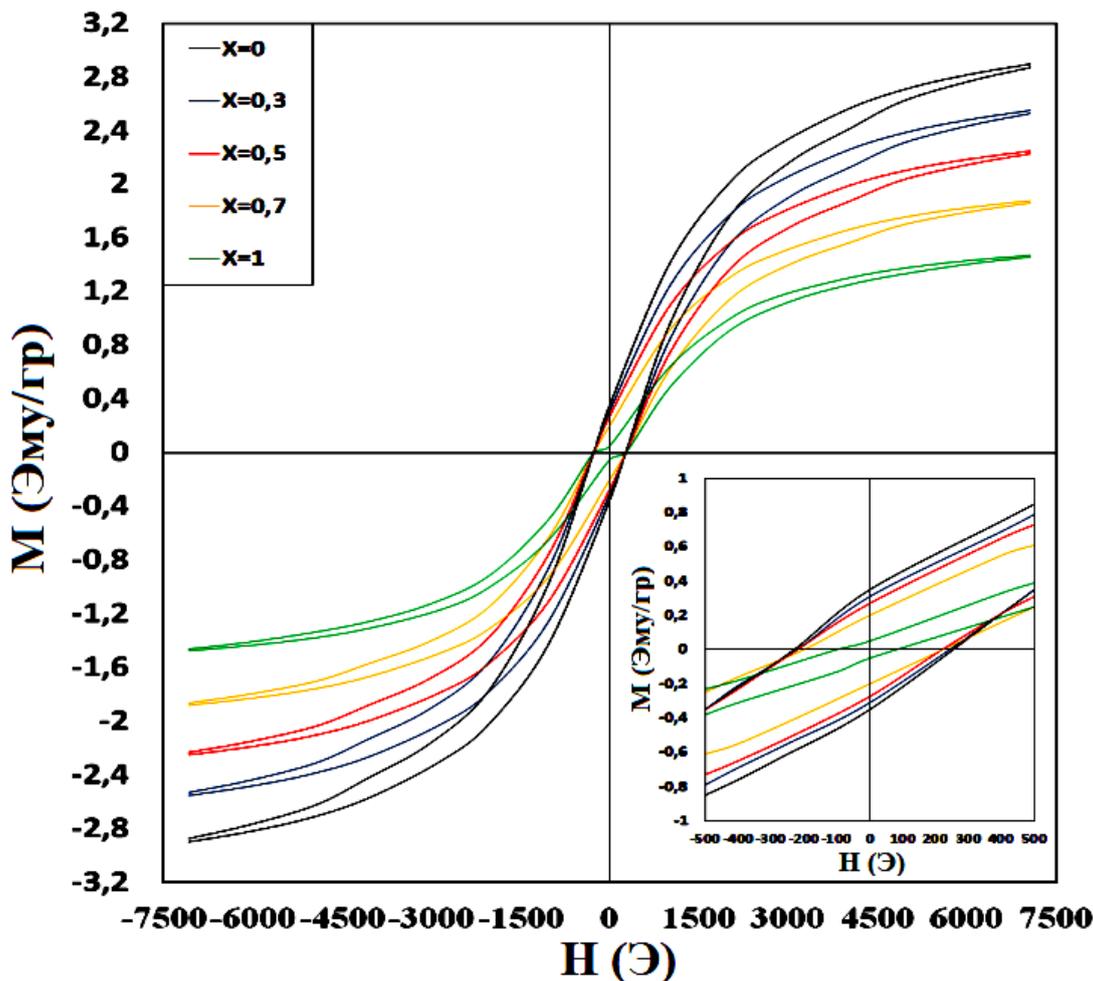


Рис.9. Гистерезис удельной намагниченности магнитной жидкости  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x= 0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ).

Таблица 4.

Результаты магнитных характеристик магнитных жидкостей  
 $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ).

Образец	$M_H$ (эму/гр)	$M_0$ (эму/гр)	$H_c$ (Э)
магнитная жидкость $\text{CoFe}_2\text{O}_4$	2,9	0,35	210
магнитная жидкость $\text{Ni}_{0,3}\text{Co}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	2,5	0,31	250
магнитная жидкость $\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	2,26	0,27	220
магнитная жидкость $\text{Ni}_{0,7}\text{Co}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,89	0,22	140
магнитная жидкость $\text{NiFe}_2\text{O}_4$	1,5	0,05	100

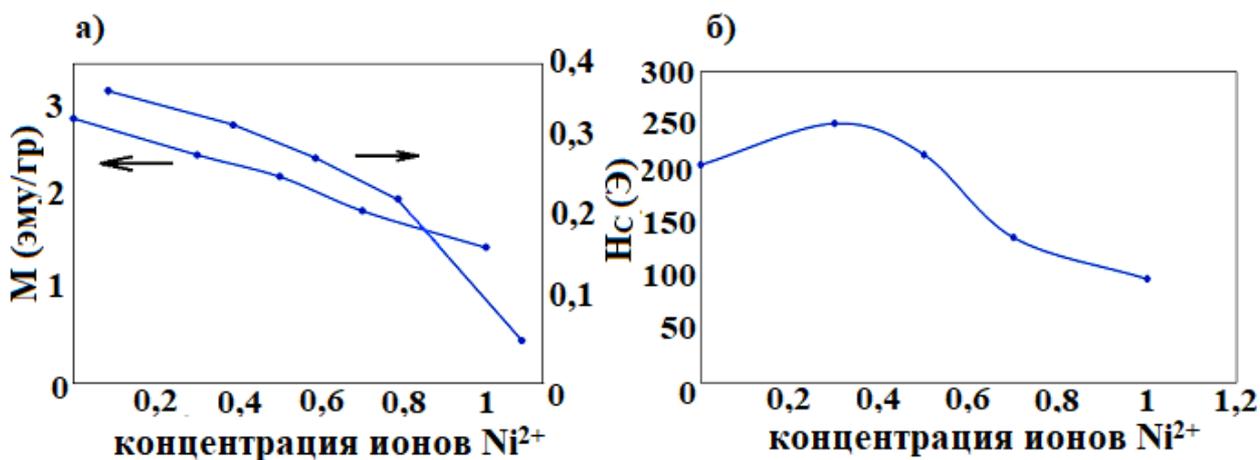


Рис.10. а) удельной намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и б) коэрцитивная сила магнитных жидкостей  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) в зависимости от концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$

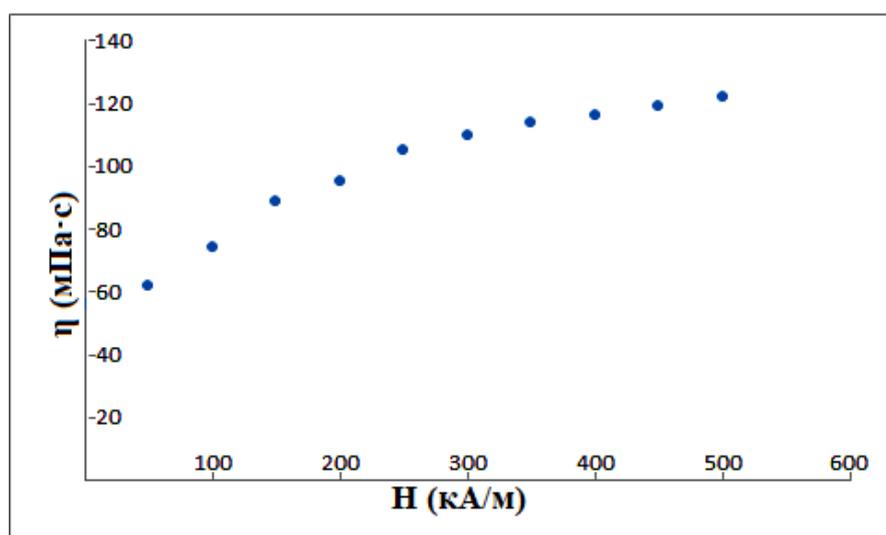


Рис.11. Зависимость коэффициента вязкости магнитной жидкости  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  от внешнего магнитного поля

Величина коэрцитивной силы зависит от размера и формы частиц  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , а также от силы магнитного взаимодействия между ними. Из-за добавления катионов никеля  $\text{Ni}^{2+}$  к наночастицам  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  с обратной структурой шпинели количество кобальта в кристаллографическом состоянии  $A$  или  $B$  уменьшается, и обменное взаимодействие между атомами

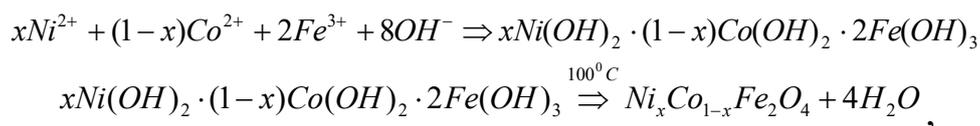
феррита кобальта уменьшается. Это также приводит к уменьшению значения коэрцитивной силы (рис. 10).

Исследована зависимость коэффициента вязкости магнитных жидкостей на основе наночастиц  $NiFe_2O_4$  от внешнего магнитного поля. Полученные результаты представлены на рис. 11. Как видно из рис.11, с увеличением напряженности магнитного поля коэффициент вязкости жидкости сначала увеличивается линейно, затем нелинейно и при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля остается неизменным (вязкость «насыщается»). Поясним эту связь следующим образом. При введении магнитной жидкости в магнитное поле, благодаря строгому расположению направлений магнитных моментов частиц по направлению поля, появляется дополнительный вращающий механический момент и происходит вращение магнитных моментов частиц. Этот механический момент противоположен механическому моменту силы трения и препятствует свободному движению частиц в потоке. Это приводит к образованию дополнительного трения между слоями жидкости. За счет этого увеличивается коэффициент вязкости магнитной жидкости.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам рентгенофазового, рентгеноспектрального, морфологического исследования наночастиц, содержащих никель, кобальт, железо и изучения магнитных свойств суперпарамагнитных жидкостей на основе этих частиц были сделаны следующие выводы:

1. Впервые методом химической конденсации синтезированы суперпарамагнитные жидкости на основе наночастиц  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ). Это подтверждается ЭДХ анализом в результате реакций



благодаря которым ожидаемые наночастицы в жидкости были успешно синтезированы.

2. При комнатной температуре изучены зависимости удельной намагниченности синтезированных суперпарамагнитных жидкостей от внешнего магнитного поля в интервале напряженности магнитного поля (-800;+800) Э. Из петли гистерезиса  $M=M(H)$  образцов определены их основные магнитные характеристики: намагниченность насыщения ( $M_H$ ), остаточная намагниченность ( $M_0$ ), и значения коэрцитивных сил ( $H_C$ ).

3. Показано, что экспериментальные зависимости  $M=M(H)$  исследованных суперпарамагнитных жидкостей могут быть объяснены в рамках теории парамагнетизма Ланжевена. Размеры суперпарамагнитных частиц (8,57-32,85; 8,00-34,26; 7,35-37,55, 6,55-37,09), вычисленные из гистерезиса намагничивания, хорошо согласуются со значениями (25-38 нм; 7-30 нм; 10-30 нм; 10-25 нм), полученными методом электронного микроскопа.

4. Размер кристаллитов наночастиц, определенный с использованием спектра рентгенофазового анализа по формуле Дебая-Шеррера, и линейный размер (диаметр), полученный по ПЭМ, показал, что он меньше критического значения размера ( $d_{кр}=45$  нм) частиц для перехода частиц от ферромагнитного состояния в суперпарамагнитное. Следовательно, эти образцы являются веществами суперпарамагнитной природы.

5. Установлено, что в порошкообразных образцах  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) с увеличением концентрации ионов  $Ni^{2+}$  уменьшение размера кристаллита и постоянной решетки приводит к уменьшению энергии обменных взаимодействий между атомами образцов. Это является причиной уменьшения намагниченности насыщения ( $M_H$ ), остаточной намагниченности ( $M_0$ ) и коэрцитивной силы ( $H_C$ ) исследованных образцов.

6. В магнитной жидкости  $NiFe_2O_4$  было обнаружено, что с увеличением напряженности внешнего магнитного поля коэффициент вязкости жидкости первоначально увеличивается линейно и достигает насыщения при значении поля 500 кА/м. Показано, что увеличение коэффициента вязкости в образцах происходит за счет того, что направления магнитных моментов частиц жидкости строго расположены в направлении внешнего поля, а дополнительный вращающий механический момент создает дополнительное трение между слоями жидкости.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 SAMARKAND  
STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV**

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF  
RASHIDOV**

**KAYUMOV KHAFIZ ASLIDDIN UGLI**

**STUDY OF THE MAGNETIC PROPERTY OF SUPERPARAMAGNETIC  
FLUIDS CONTAINING NICKEL, COBALT, IRON**

**01.04.09 – Physics of magnetic phenomena**

**ABSTRACT**

**of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on the physical and mathematical sciences**

**Samarkand – 2022**

**The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.4.PhD/FM548.**

Dissertation has been prepared at the Samarkand State University named after Sharof Rashidov. The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) and the “Ziyonet” information and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific supervisor:** **Kuvandikov Oblakul Kuvandikovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Official opponents:** **Mukimov Kamil Mukimovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academic

**Mavlonov Giyosiddin Khaydarovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Leading organization:** **Bukhara State University**

Dissertation defense will be held on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 at \_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 at Samarkand State University named after Sharof Rashidov. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: [rektor@samdu.uz](mailto:rektor@samdu.uz). cabinet 63, ground floor, the department of Physics, Samarkand State University).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University named after Sharof Rashidov (is registered №\_\_\_\_) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40).

Abstract of dissertation sent out on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 year.  
(Mailing report № \_\_\_\_\_ on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 year)

**M.Kh.Ashurov**  
Chairman of scientific council  
on award of scientific degrees,  
DSc in physics and mathematics, academician

**R.M.Radjabov**  
Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
CSc in physics and mathematics, docent

**D.I.Semenov**  
Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degrees,  
DSc in physics and mathematics, docent

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the research.** Study of the formation mechanisms of the microstructure of the magnetic fluids based on  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanoparticles and the dependence of their magnetization on the concentration of  $\text{Ni}^{2+}$  ions in the external magnetic field at room temperature.

**The objects of the research** are magnetic fluids based on nanoparticles  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0; 0.3; 0.5; 0.7; 1$ ) synthesized by chemical condensation. Water was used as the dispersed phase.

### Research objectives:

- study of the size and morphology of nanoparticles  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) obtained by chemical condensation;
- detection of the crystal structure and elemental composition of powdered  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) nanoparticles;
- establishing the dependence of the specific magnetization of magnetic fluids based on  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.3; 0.5; 0.7; 1$ ) on the strength of the external magnetic field;
- determination on the basis of experimental dependences  $M=M(H)$  of the main magnetic characteristics of the studied samples (saturation magnetization –  $M_S$ , remanent magnetization –  $M_R$ , coercivity -  $H_C$ ) and carrying out semi-empirical calculations of particle sizes of the liquids;
- carrying out a comparative analysis of the experimentally measured diameter of nanoparticles  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) in the magnetic fluid with semi-empirical calculations within the Langevin theory.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

- for the first time, magnetic fluid with stable superparamagnetic properties based on  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) nanoparticles with single-domain structure has been successfully synthesized by chemical condensation method.
- for the first time, the dependence of the specific magnetization of the magnetic fluids based on  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0,3; 0,5; 0,7; 1$ ) nanoparticles ( $x=0; 0.3; 0.5; 0.7; 1$ ) on the concentration of  $\text{Ni}^{2+}$  ions in the external magnetic field have been studied; It was found that these samples have a low remanent magnetization and low coercivity.
- according to the experimental dependences of the specific magnetization on the external magnetic  $M=M(H)$  of the samples under study, the particle sizes in the liquid have been semi-empirically determined and compared with the experimental results obtained by the electronic microscope (TEM) method;
- It was found that the diameter of the particles of the investigated magnetic fluid is less than their critical value for the transition to the superparamagnetic state ( $d < d_{cr} = 45$  nm), and it was shown that the particle size plays a key role in the formation of the superparamagnetic nature of the studied samples.

**Implementation of research results.** The results of studying the magnetic properties of superparamagnetic liquids containing nickel, cobalt, and iron were used in the fundamental project BV-F4-014 "Development of the mathematical foundations of magnetoelasticity and applied methods for solving the problem of

magnetoelastic oscillations of thin-walled elements of electronic devices, micro- and nano-systems in a magnetic field taking into account electromagnetic compatibility” (Reference of the Samarkand branch of TATU dated October 4, 2022). The application of scientific results made it possible to solve the problems of electromagnetic compatibility and magnetoelasticity of thin resistive elements in micro- and nanosystems and to analyze the electromagnetic effects arising in them;

In the dissertation, powder samples based on  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.3; 0.5; 0.7; 1$ ) nanoparticles were synthesized by chemical condensation.

The synthesized powdered samples represent the possibility of using in the separation of non-magnetic substances in ores at “Navoi mining and metallurgical company” JSC (Act of implementation № 24.01-01-11/2013 dated 10.14.2022).

**Approbation of the research results.** Results of the research work have been discussed at 3 international and 2 republican scientific and practical conferences.

**Publication of research results.** In total of 11 scientific works on the topic of research, including 6 articles in scientific publications recommended to publish the main scientific results of dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan (including 2 in the Scopus database and 4 in republican journals), the remaining 5 are international and republican published in the proceedings of the held conferences and abstracts.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of introduction, three chapters, conclusion, list of used literature. The volume of the dissertation is 113 pages, including 50 figures and 6 tables.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. O. K. Kuvandikov, S. J. Kuvandikov, and K. A. ugli Kayumov. Magnetic Properties of Magnetic Fluids Based on  $Ni_xCo_{1-x}Fe_2O_4$  // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2020. V. 42, No. 11: P.1499–1507. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.11.1499>. (Scopus базасида, IF 1.2).

2. O K Kuvandikov, Sh J Kuvandikov, M K Salakhitdinova and Kh A Kayumov. Study of the magnetic property of supermagnetic fluid // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.1118.2021. 012025. Pp.1-4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1118/1/012025>. (Scopus базасида, IF 1.1).

3. O.K.Kuvandikov, Sh.J.Kuvandikov, Kh.A.Kayumov. Magnetic property of the superparamagnetic fluid containing  $Ni_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$  nanoparticles // Electronic journal of actual problems of modern science, education and training. October, 2021-10/1. ISSN 2181-9750.Pp.90-94

4. O.K.Kuvandikov, R.M.Eshburiyev, U.E.Nurimov, Kh.A.Kayumov. Investigation of the magnetic fluid viscosity on  $NiFe_2O_4$  base // SamDU axborotnomasi. 5-son, 2018 yil.B.75-77

5. O.Q.Quvondiqov, Sh.J.Quvondiqov, X.A.Qayumov, S.E.Qirg'izov. Magnit suyuqliklar magnitlanishini o'lchash tajriba qurilmasi // NamDU ilmiy axborotnomasi. ISSN-2181-1458. 9 – son, 2020 y. B. 3 – 9.

6. O.Q.Quvondiqov, Sh.J.Quvondiqov, X.A.Qayumov. Kobalt ferrit asosidagi magnitli suyuqlikning magnitlanishi // SamDU axborotnomasi 1-son, 2020 yil.B.106-112.

**II бўлим (II часть; II part)**

7. O.K. Kuvandikov, U.E. Nurimov, Kh.A.Kayumov. “Investigation of the viscosity of magnetic fluids”. Abstracts of the 8th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems” // May 18-22, 2018, Pp.125-126.

8. Кувандиков О.К, Эшбуриев Р.М, Каюмов Х.А, Эшмирзаева М.А, Маматкулов Ш.Б. Получение магнитных жидкостей на основе наноразмерного 3d – металла // Магнитные материалы новые технологии. VIII Байкальской Международной конференции. г. Иркутск, Иркутская область, Российская Федерация 24 – 28 августа 2018 г.С.76-77.

9. X.A.Қаюмов, Ш.Б.Маматкулов. “Магнит суюқликнинг олиниш усуллари” // “Ўзбекистоннинг иқтисодий ривожланишида кимёнинг ўрни” мавзусидаги республика илмий-амалий анжумани. Самарқанд 2018 йил. В.92- 93.

10. Sh.J.Quvondiqov, X.A.Qayumov Kobalt ferrit asosidagi magnitli suyuqlik olish. // “Fizikaning hozirgi zamon ta'limidagi o'rni” mavzusidagi respublika ilmiy – amaliy anjuman. Dekabr – 2019, Samarqand.B. 256-259.

11. O.K. Kuvandikov, Kh.A.Kayumov, N.Kh.Bobilov, O.Z.Abdumurodov. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles // VII Международной конференции «Современные проблемы физики» 9-10 октября 2020 г. Таджикистан. С.63-64

Автореферат Шароф Рашидов номидаги Самарқанд Давлат университетининг  
“СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб,  
ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (12.12.2022 йил).

Босмахона лицензияси:



4268

2022 йил 13 декабрда босишга рухсат этилди:  
Офсет босма қоғози. Қоғоз бичими 60x84<sub>1/16</sub>.  
“Times” гарнитураси. Офсет босма усули.  
Ҳисоб-нашриёт т.: 2,8. Шартли б.т. 2,0.  
Адади 100 нусха. Буюртма № 12/12.

---

СамДЧТИ нашр-матбаа марказида чоп этилди.  
Манзил: Самарқанд ш., Бўстонсарой кўчаси, 93.