

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.K.02.05 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

USMONOVA XILOLA ISROPILOVNA

**ZnO NANOMATERIALLARINI SOPONENLAR VA FLAVONOIDLARNI
SIRT FAOL MODDA SIFATIDA QO‘LLAB, SINTEZI VA ULARNING
FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI**

02.00.04 – Fizik kimyo

**KIMYO FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Samarqand – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Usmonova Xilola Isropilovna

ZnO nanomateriallarini soqonlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo‘llab, sintezi va ularning fizik-kimyoviy xossalari..... 3

Усмонова Хилола Исропиловна

Синтез наноматериалов ZnO с использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ и их физико-химические свойства 21

Usmonova Khilola Isropilovna

Synthesis of ZnO nanomaterials using saponins and flavonoids as surfactants and their physicochemical properties 41

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works 44

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.K.02.05 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

USMONOVA XILOLA ISROPILOVNA

**ZnO NANOMATERIALLARINI SOPONENLAR VA FLAVONOIDLARNI
SIRT FAOL MODDA SIFATIDA QO‘LLAB, SINTEZI VA ULARNING
FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI**

02.00.04 – Fizik kimyo

**KIMYO FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Samarqand – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/K769 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.samdu.uz) va «ZiyoNET» axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Muxamadiyev Nurali Qurbonaliyevich**
kimyo fanlari doktori, proffesor

Rasmiy opponentlar: **Eshmamatova Nodira Baxromovna**
kimyo fanlari doktori, dotsent

Murodova Dilafuz Kadirovna
kimyo fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent

Yetakchi tashkilot: **O'zR FA Umumiy va noorganik kimyo instituti**

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.12.2019.K.02.05 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil «3» dekabr soat 10:00 dagi yig'ilishida bo'lib o'tadi (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti, Biokimyo instituti, Kimyo binosi. Tel.: (+99866) 239-12-47, faks: (0366) 239-11-40, e-mail: devonxona@samdu.uz.

Dissertatsiya bilan Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (98 -raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-11-51).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil «22» dekabr kuni tarqatildi.
(2025-yil «22» dekabr dagi № 7 - raqamli reyestr bayonnomasi).



A.M. Nasimov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

J.R. Uzokov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash kotibi, PhD

O.N. Ro'zimiradov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, k.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Dunyoda ZnO nanomateriallari muhim ahamiyatga ega bo'lib, ularning noyob fizik va kimyoviy xossalari, ayniqsa taqiqlangan energiya sohasining kengligi (3,37 eV), yuqori fotobarqarorligi, piezoelektrik va fotokatalitik faolligi, ularni zamonaviy texnologiyalarning turli sohalarida keng qo'llash imkonini beradi. Hozirgi vaqtda ZnO asosida olingan nanomateriallar optoelektronika (UV-detektorlar, diodlar, quyosh batareyalari), biotibbiyot (antibakterial qoplamalar, biosensorlar, dori tashuvchi tizimlar), ekologiya (organik ifloslantiruvchilarni fotokatalitik parchalanishi) hamda energetika (gaz sezgichlar va superkondensatorlar) sohalarida asosiy materiallar sifatida keng qo'llanilmoqda. Shuning uchun ham ZnO nanomateriallari "yashil" texnologiyalar, qayta tiklanuvchi energiya va nanoelektronika rivojida strategik ahamiyatga ega.

Jahondagi ko'plab ilmiy markazlarda ZnO nanomateriallarni olishning va ularning fizik-kimyoviy xossalarini tadqiq etishning metodologik asoslarini ishlab chiqishda hamda ularning fotokatalitik xossalarini yaxshilashda ma'lum yutuqlarga erishmoqda. Bu borada zarrachalarning o'lchami, morfologiyasi va boshqa fizik-kimyoviy xossalarini sintez jarayonlari orqali maqbullashtirish, kristall strukturadagi nuqsonlarni bartaraf etish orqali elektron-tirqish juftligi rekombinatsiyasini kamaytirish, metallar yordamida dopirlash va kompozit strukturalar tizimi kiritish orqali yorug'likni ko'rinadigan sohagacha kengaytirish hamda oqova suvdan organik ifloslovchilarni degradatsiyalash borasida olib borilgan ishlar diqqatga sazovordir. Shu bilan bir qatorda ZnO nanomateriallarni fotokatalizator sifatida sanoat va ekologiyada qo'llanilish imkoniyatlari isbotlanishiga qaramasdan ishlab chiqarish, xavfsizlikni kafolatlash va keng qo'llanilishi uchun standartlashtirish kabi muammolar hanuzgacha yechimini kutmoqda.

Respublikamizda ham ZnO nanozarrachalarining sintezi va xossalarini tadqiq qilishga bag'ishlangan tadqiqotlar amalga oshirilmoqda hamda uning fotokatalitik xossalari o'rganilgan, vodorod olishda, suvni turli xil organik ifloslovchilardan tozalashda qo'llanilishi bo'yicha ijobiy natijalarga erishilgan. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"¹gi Farmonida "mavjud imkoniyatlarni to'liq ishga solgan holda mahalliy sanoat tarmoqlari eksport salohiyatini yanada rivojlantirish"ga yo'naltirilgan muhim vazifalar belgilab berilgan. Shu boisdan ZnO nanomateriallarni sintez yo'llarini ishlab chiqish, mavjudlarini takomillashtirish hamda uning fotokatalitik, sorbsion, antimikrob xossalarini tadqiq etish va sensor qurilmalar tayyorlashda qo'llanilish imkoniyatlariga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar katta nazariy va amaliy ahamiyatga ega.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmonida, 2018-yil 25-oktyabrdagi "O'zbekiston Respublikasida kimyo

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

sanoatini jadal rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-3983-son, 2019-yil 3-apreldagi "Kimyo sanoatini yanada isloh qilish va uning investitsiyaviy jozibadorligini oshirish chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-4265-son, 2021-yil 13-fevraldagi "Kimyo sanoati korxonalarini yanada isloh qilish va moliyaviy sog'lomlashtirish, yuqori qo'shilgan qiymatli kimyoviy mahsulotlar ishlab chiqarishni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-4992-son Qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti natijalari muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlariga bog'liqligi. Mazkur dissertatsiya ishi respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining VII "Kimyo, kimyoviy texnologiyalar va nanotexnologiyalar" ustuvor yo'nalishlariga muvofiq holda bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Dunyodagi ko'pgina mamlakatlarning ilmiy markazlarida nanoo'lchamdagi rux oksidi materiallar sintez qilish va ularning tekstur, katalitik, sorbsion kabi xarakteristikalarini o'rganish hamda olingan materiallarni qo'llanilish imkoniyatlarini baholash bo'yicha talaygina tadqiqotlar o'tkazilgan. Bu borada Wang B., Nagase S., Zhao C., Sanyal B., Mookerjee A., Bovhyra R. Ab., Venhryn Y. I., Al-Sunaidi A. A., Hilal I. H., Jabbar R. H., Jabbar S. J., Shastri R., Cheng X., Li F., Zhao Y.A., Martins R.M.S., Diyarov A. A., Sanakousar M.F., Chandiramouli R., Sriram S., Balamurugan D. Šarić A., Despotović I., Štefanić G., Hadipour N. L., Ahmadi Peyghan A., Soleymanabadi H., Ahmad Siddiqui S., Abdullah M.M., Chandiramouli R., Thayumanavan A., Srinivasaraghavan R., Ovsiannikova L., Cheng X., Zhao M., Freeman C. L., Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M., Perdew J. P., Park Y.S., Pauku Y., Michalkova A. va boshqalarning xizmatlari salmoqli bo'lib, ular tomonidan nanoo'lchamdagi rux oksidi materiallar hamda ularning turli kompozitlarini olishning samarali usullari yaratilgan. Shuningdek, ularning tekstur, sorbsion xarakteristikalari zamonaviy usullarda tadqiq etilgan.

O'zbekistonda mazkur yo'nalish rivojiga Ro'zimurodov O.N., Diyarov A., Oripov A.E., Muminov S.Z., Raxmatkariev G.U., Kabulov B.J., Muxamadiev N.Q., Uzokov J. R., Eshmbetov I.D., Ismoilov R.I. va boshqalar o'zlarining mahalliy xom-ashyolar asosida sorbentlar olish, tabiiy va sintetik seolitlarni modifikatsiyalash, ularning sorbsion hamda tekstur xarakteristikalarini o'rganish, oqova suvlarni turli qo'shimchalardan tozalash kabi muammolarni hal etishga qaratilgan izlanishlari bilan salmoqli hissa qo'shishgan.

Shunga qaramasdan tekstur xarakteristikalarni boshqarib, berilgan xossani nomoyon qiladigan nanoo'lchamdagi ZnO sintez qilish va ularning fotokatalitik, sorbsion, antimikrob xossalarini o'rganish dolzarb muammolardan bo'lib, muhim ahamiyatga ega bo'lgan ilmiy yo'nalishdir.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilayotgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti ilmiy tadqiqot ishlar rejasining "Tabiiy va sintetik materiallarni sintez qilish, tekshirish va qayta ishlashning yangi usullari" mavzusi va OT-F7-83-85 "Xromatografik jarayonlarni

modellash, maqbullash va ushlanish kattaliklari-xossalari o‘zaro bog‘liqliklarni o‘rganish va ularni nanoxromatografiyada qo‘llanilishi” mavzusidagi davlat granti doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi ZnO nanomateriallarini soponenlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo‘llab, sintezi va ularning fizik-kimyoviy xossalarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

saponinlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo‘llab, ZnO nanomateriallarini sintez yo‘lini ishlab chiqish va jarayonni maqbullashtirish;

(ZnO)_n nanoklasterlarining xossalarini DFT usulida o‘rganish;

sintez qilingan ZnO nanomateriallarining fizik-kimyoviy xossalarini aniqlash va baholash.

sintez qilingan ZnO nanomateriallarining spektral xossalarini o‘rganish va fotokatalitik xossalarini baholash.

Tadqiqotning obyekti sifatida rux atsetat, rux nitrat, rux xlorid, tetroetoksisilan, etil spirt, yetmak o‘simligidan olingan saponinlar, flavanoidlar va organik erituvchilar olingan.

Tadqiqotning predmetini Zol-gel texnologiya, kvant-kimyoviy hisoblashlar, saponinlar va flavanoidlarni qo‘llab, ZnO nanomateriallarini olish va ularning tekstur, sorbsion va fatokatalitik faolliklarini o‘rganish tashkil etgan.

Tadqiqotning usullari. Dissertatsiyada zamonaviy fizik-kimyoviy, spektroskopik (UB-, KS-, IQ-), skanerlovchi elektron mikroskopiya, rentgen difraktometriya, porometriya, kinetik va statistik usullardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

saponinlar sirt faol modda va flavonoidlarni barqarorlashtiruvchi sifatida qo‘llab, ZnO nanomateriallarini sintez qilish yo‘li ishlab chiqilgan va jarayon maqbullashtirilgan;

(ZnO)_n nanoklasterlarining tuzilishi va elektron xossalari kvant-kimyoviy usullarda baholangan hamda klasterda molekulalar sonining ortishi taqiqlangan hudud o‘lchamini kamayishiga olib kelishi aniqlangan;

ZnO nanomateriallarining sirt morfologiyasi, sorbsiya izotermasi, fotokatalitik xarakteristikalarini baholangan va Fe³⁺ ionlari bilan doperlash yutiladigan nurni ko‘rinish sohasiga siljishi isbotlangan;

ZnO nanomateriallarining fotokatalitik reaksiyalarda digratatsiya darajisi 91,5 % ni tashkil etishi isbotlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ZnO nanomateriallarini sintez qilishning metodikasi ishlab chiqilgan;

(ZnO)_n nanoklasterlarining xossalarini kvant-kimyoviy usulda o‘rganish metodikasi ishlab chiqilgan;

ZnO nanomateriallarining tekstur va sorbsion xossalarini o‘rganish metodikasi ishlab chiqilgan;

ZnO nanomateriallaridan foydalanib, oqova suvlar tarkibidan organik bo‘yoqlarni tozalash metodikasi ishlab chiqilgan va amaliyotga joriy etilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy va sezgirligi yuqori bo‘lgan SEM, AKM, UB-, KS-, IK-spektroskopiya,

porometriya, fizik-kimyoviy, kinetik, statistik tadqiqot usullarni qo'llab, olingan natijalar asosida maqolalar chop ettirish, turli xalqaro va respublika miqiyosida o'tkazilgan konferensiyalarda muhokamadan o'tkazilganligi bilan ta'minlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, $(\text{ZnO})_n$ nanoklasterlarning tuzilma va elektron xossalari kvant-kimyoviy usullarda tahlil qilinib, ularning energetik barqarorligi, elektron zichlik taqsimoti va optik o'tish xususiyatlari aniqlangan. Saponinlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo'llanilib, ZnO nanomateriallarini barqaror tizimlar holida sintez qilishning nazariy va eksperimental asoslari ishlab chiqilgan. Ushbu ilmiy yondashuvlar nanomateriallar kimyosining fundamental yo'nalishlarini boyitib, ularni fotokataliz, adsorbsiya va ekologik tozalash texnologiyalarida qo'llash imkoniyatlarini nazariy jihatdan asoslaydi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati $(\text{ZnO})_n$ nanoklasterlarning xossalarini kvant-kimyoviy usulda o'rganish metodikasining ishlab chiqilishi, saponin va flavonoid asosidagi ZnO "yashil" sintez yo'lini yaratilganligi va uning iqtisodiy jihatdan samarali va qayta tiklanadigan manbalarga asoslangan texnologiya sifatida taklif etilganligi hamda oqova suv tarkibidagi organik bo'yoqlarni fotokatalitik yo'l bilan parchalashning amaliy usuli ishlab chiqilganligidan iborat.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. ZnO nanomateriallarini soptionlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo'llab, sintezi va ularning fizik-kimyoviy xossalarini aniqlash bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

ZnO ni qo'llab, adsorbsion tozalash texnologiyasi O'zbekiston-Xitoy MChJ "AHMAD ISROIL TEX" qo'shma korxonada amaliyotga joriy etilgan (O'zbekiston-Xitoy MChJ "AHMAD ISROIL TEX" qo'shma korxonasining 2024 yil 28-oktyabrdagi 28/10-01-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ZnO nanozarrachalarining faollashgan ko'mirga nisbatan bo'yoqlarni adsorbsiya qilish samaradorligi yuqori bo'lishi hamda tozalangan suvning sifati ekologik standartlarga muvofiq kelishini tasdiqlash imkonini bergan;

ZnO ni fotokatalizator sifatida qo'llash texnologiyasi O'zbekiston-Xitoy MChJ "AHMAD ISROIL TEX" qo'shma korxonada amaliyotga joriy etilgan (O'zbekiston-Xitoy MChJ "AHMAD ISROIL TEX" qo'shma korxonasining 2024 yil 28-oktyabrdagi 28/10-01-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ZnO nanozarrachalari yordamida sintetik bo'yoqlarni fotokatalitik parchalashda samaradorlik ~90 % ni tashkil etish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 13 ta, jumladan 3 ta xalqaro va 10 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 5 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 2 ta maqola respublikada, 3 ta maqola xorijiy jurnallarda, jumladan 1 ta maqola scopus bazasida nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 119 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

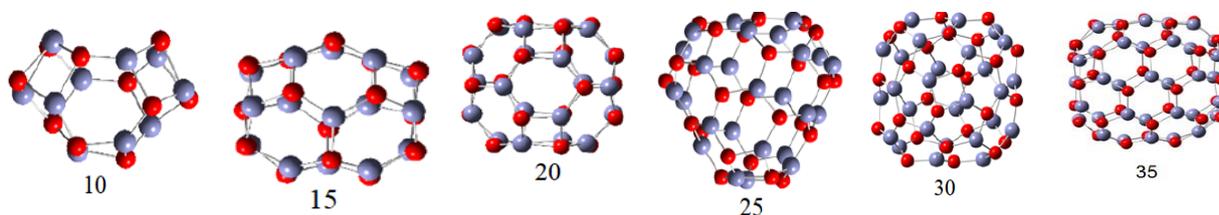
Kirish qismida o‘tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti va predmetlari tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati yoritilgan, natijalarni amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ilmiy ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo‘yicha ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning adabiyotlar sharhida ZnO nanozarrachalarini olish bo‘yicha ilg‘or ilmiy yondashuvlar tahlil qilingan. Mazkur yondashuv tanlovi nanomateriallarning fotokatalitik va adsorbsion xossalarini chuqur o‘rganib, to‘qimachilik sanoati oqava suvlarini ekologik xavfsiz va samarali tozalash texnologiyalarini ishlab chiqish uchun muhim yechim beradi. Saponinlardan foydalanish “yashil” kimyo tamoyillariga mos bo‘lib, ekologik xavfsizlikni ta‘minlasa, dopant ionlari materialning funksional imkoniyatlarini kengaytiradi. Dissertatsiyada qo‘llanilgan XRD, SEM, FTIR, UV–Vis kabi zamonaviy tahlil usullari sintez qilingan nanomateriallarning strukturaviy, morfologik, optik va kimyoviy xususiyatlarini aniqlashga imkon berdi. Shuningdek, fotokatalitik samaradorlikni baholashda organik bo‘yoqlar parchalanish kinetikasini o‘rganish va adsorbsion xususiyatlarni izoterma hamda kinetik modellar asosida tahlil qilish ilmiy natijalarning ishonchliligini ta‘minladi. Shu tariqa, qo‘llanilgan usullar majmuasi tadqiqot vazifalarini to‘liq va samarali yechishga xizmat qiluvchi zamonaviy yondashuv sifatida baholandi.

Dissertatsiyaning **“Tadqiqot ob‘ekti va usullari”** bobida tadqiqot obykti sifatida **saponinlar bilan barqarorlashtirilgan va Fe³⁺ ionlari bilan dopirlangan ZnO nanozarrachalari** tanlangani ilmiy jihatdan asosli hamda amaliy ahamiyatga egaligi qayd etilgan. Mazkur yondashuv tanlovi nanomateriallarning fotokatalitik va adsorbsion xossalarini chuqur o‘rganib, to‘qimachilik sanoati oqava suvlarini ekologik xavfsiz va samarali tozalash texnologiyalarini ishlab chiqish uchun muhim yechim beradi. Saponinlardan foydalanish “yashil” kimyo tamoyillariga mos bo‘lib, ekologik xavfsizlikni ta‘minlasa, dopant ionlari materialning funksional imkoniyatlarini kengaytiradi. Dissertatsiyada qo‘llanilgan XRD, SEM, FTIR, UV–Vis kabi zamonaviy tahlil usullari sintez qilingan nanomateriallarning strukturaviy, morfologik, optik va kimyoviy xususiyatlarini aniqlashga imkon berdi. Shuningdek, fotokatalitik samaradorlikni baholashda organik bo‘yoqlar parchalanish kinetikasini o‘rganish va adsorbsion xususiyatlarni izoterma hamda kinetik modellar asosida tahlil qilish ilmiy natijalarning ishonchliligini ta‘minladi. Shu tariqa, qo‘llanilgan usullar majmuasi tadqiqot vazifalarini to‘liq va samarali yechishga xizmat qiluvchi zamonaviy yondashuv sifatida baholandi.

Dissertatsiyaning “(ZnO)_n klasterlarining strukturaviy va elektron tabiatini DFT usulida o‘rganish” deb nomlangan bobi (ZnO)_n klasterlarining strukturaviy va elektron xossalari zichlik funksional nazariyasi (DFT) usuli asosida chuqur o‘rganishga bag‘ishlangan.

(ZnO)_n klasterlarining strukturaviy va energetik xarakteristikalari. (ZnO)_n (n = 10÷35) tarkibli klasterlarning strukturaviy va elektron xossalari kvant-kimyoviy hisoblashlar yordamida o‘rganildi. Hisoblashlar Gaussian 16 va HyperChem dasturlarida yarim emperik (PM3), emperikmas (Ab initio) va DFT usullarida bajarildi. Klasterlar geometriyasi zichlikning funksional nazariyasini (TD-DFT) B3LYP gibrid funksionali va LANL2DZ bazis to‘plami yordamida optimallashtirildi hamda ularning fizik-kimyoviy parametrlariga baho berildi. Molekulyar orbitallarni tahlil qilishda atom orbitallarining chiziqli kombinatsiyasi (LCAO) usulidan foydalanildi. Turli geometrik strukturali klasterlarning Z-matritsasiga oid bog‘ uzunliklari, bog‘lanish burchaklari va bog‘ energiyalari hisoblab chiqildi (1-jadval).



1-rasm. Optimalashtirilgan (ZnO)_n (n=10÷35) klasterlarining strukturalari.

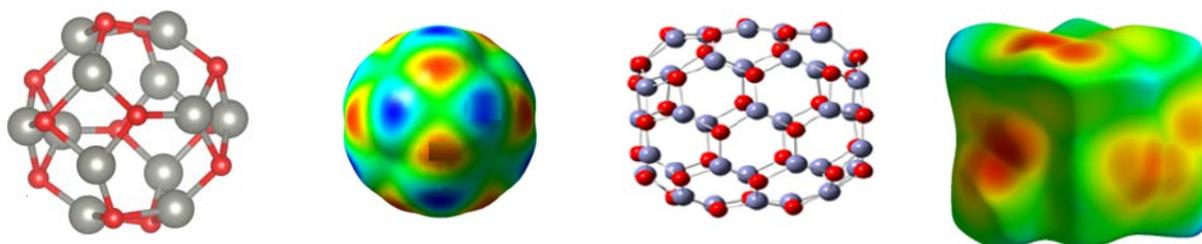
1-jadval.

(ZnO)_n (n=10÷35) klasterlarida turli fizik kattaliklarning B3LYP hisoblashlardan olingan qiymatlari

№	Zn-O bog‘lari uzunligi (Å°)	O-Zn-O bog‘ burchagi (°)	Zn-O-Zn bog‘ burchagi (°)	Zn-O bog‘ energiyasi, kkal/mol
10	1,85±0,04	104,51±0,02	116,32±0,01	123,43
15	1,88±0,01	105,02±0,01	117,56±0,07	135,17
20	1,90±0,01	105,53±0,08	118,15±0,07	166,54
25	1,92±0,05	106,12±0,04	118,46±0,04	168,8
30	1,94±0,02	106,34±0,04	118,91±0,01	169,49
35	1,96±0,05	107,48±0,01	119,24±0,01	177,27

Jadval tahliliga ko‘ra, klasterda atomlar soni ortishi bilan Zn–O bog‘larining o‘rtacha uzunligi biroz ortib boradi. Kvant kimyoviy hisoblash natijalari shuni ko‘rsatadiki, (ZnO)₁₀ klasterining bir qatlamli ichi bo‘sh tetragonal strukturali izomeri eng barqaror bo‘lib, undagi Zn–O bog‘larining o‘rtacha uzunligi 1,85 ± 0,04 Å, o‘rtacha bog‘ energiyasi esa 123,43 kkal/mol ni tashkil etadi. Atomlar soni n = 10 dan n = 35 gacha oshganda Zn–O bog‘ energiyasi 123,43 dan 177,27 kkal/mol gacha ortib, klasterlarning barqarorligi kuchayishini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, (ZnO)_n (n = 10÷35) klasterlarida O–Zn–O bog‘ burchagi sp³ gibridlanish turini saqlagan holda 104,51° dan 107,48° gacha ortishi aniqlangan.

(ZnO)_n sirt tahlili. Klasterlarning sirt energiyasi va sirdagi atomlarning o‘zaro ta’sirlari Xirshfeldning 3D topografiyasi orqali o‘rganildi (2-rasm). Klasterlarning Xirshfeld sirt tahlili Crystal Explorer 17,5 dasturi yordamida o‘rganildi. Xirshfeld sirt tahlili ZnO nanoklasterlarini o‘rganish uchun eng samarali nazariy usullardan biri bo‘lib, u optoelektronika, kataliz va material dizaynidagi ilovalar uchun juda muhim bo‘lgan, ularning sirt reaktivligi, o‘zaro ta’sir turlari va strukturaviy xususiyatlari haqida ma’lumotlarni beradi. $n=10$ va $n=35$ klasterlarining Xirshfeldning 3D sirt tasvirlari 2-rasmدا keltirilgan.



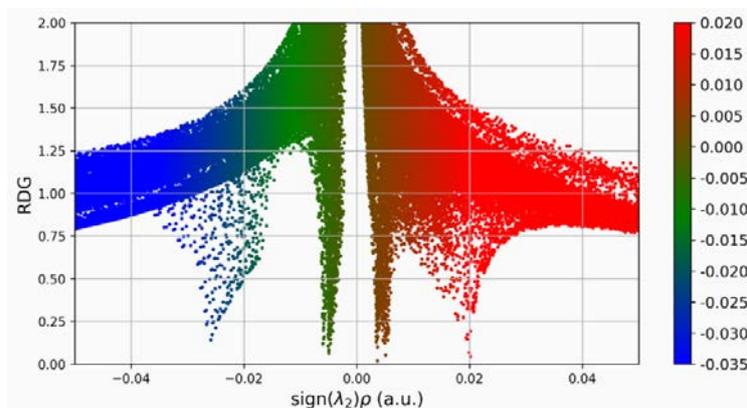
2-rasm. (ZnO)₁₀ (a) va (ZnO)₃₅ (b) klasterlarining Xirshfeld 3D sirt tasvirlari

Rasmdagi rangli xaritalash natijalari shuni ko‘rsatadiki, (ZnO)₁₀ klaster sirtida elektron zichlik kuchli lokalizatsiyalangan bo‘lib, 3D tasvirdagi qizil hududlar yuqori elektron zichligi va past potentsialga ega sohalarni, ko‘k-yashil hududlar esa past elektron zichligi yoki yuqori potentsialli qismlarni ifodalaydi. Qizil hududlar Zn va O atomlari orasida kuchli elektrostatik o‘zaro ta’sir mavjudligini bildiradi. Bunday zichlik kichik klasterlarning sirt reaktivligini oshiradi, chunki ularning sirtida ko‘proq ochiq atomlar mavjud. (ZnO)₃₅ klasterida esa Hirshfeld tahliliga ko‘ra yashil rangli maydonlar ko‘paygan bo‘lib, bu elektron zichligining delokalizatsiyalangan holda ichki qatlamlarga taqsimlanishini ko‘rsatadi. Natijada yirik klasterlarda sirt reaktivligi kamayadi, biroq barqarorligi ortadi.

Xirshfeld 3D sirt topografik xaritasi va unga mos 2D barmoq izlari hisoblashlari CIF formatidagi kirish fayllari asosida bajarilib, supramolekulyar sistemaning barqarorligiga hissa qo‘shuvchi o‘zaro ta’sirlar ulushi aniqlangan. Kristalli muhitda molekula yoki atom egallagan maydon chegarasi Xirshfeld yuzasi sifatida qabul qilinadi. Har bir nuqtada *di* (sirt ichidagi eng yaqin yadrogacha bo‘lgan masofa) va *de* (sirdan tashqaridagi eng yaqin atomlarga bo‘lgan masofa) qiymatlari aniqlanib, ular van-der-Vaals radiuslari asosida normallashtirilgan kontakt masofasi (d_{norm}) orqali umumlashtirilgan. d_{norm} qiymatlaridan foydalanib (ZnO)_n ($n=10\div 35$) klasterlarida Zn–O–Zn va O–Zn–O kabi o‘zaro ta’sirlarning ulushi ikki o‘lchovli barmoq izlari chizmasi yordamida baholandi. 3-rasmدا keltirilgan ma’lumotlarga ko‘ra, RDG tahlili vodorod bog‘lanishlari yoki boshqa kuchli kovalent bo‘lmagan o‘zaro ta’sirlarni aniqlash imkonini berdi. Shuni ta’kidlash lozimki, ZnO klasterlarida bevosita Zn va O atomlari orasida van der Vaals kuchlari kuzatilmaydi, chunki bu bog‘lanishlar asosan kovalent-ionli xarakterga ega.

Shunday qilib, RDG tahlili natijalariga ko‘ra, grafikdagi ko‘k mintaqalar Zn va O atomlari o‘rtasidagi ionli o‘zaro ta’sirlarni ifodalab, ular klasterdagi kovalent bo‘lmagan bog‘lanishlarning 27,8÷50,6% ini tashkil qilishi aniqlandi. Yashil

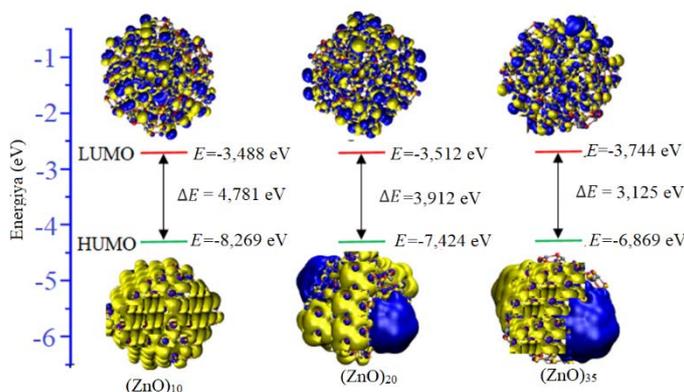
hududlar Zn–O bog‘lanishining barqaror va qutbli kovalent xarakterga ega qismlariga mos kelib, bunday o‘zaro ta’sirlar 15,3÷25,6 % ni tashkil qiladi. Qizil hududlar esa Zn–O aloqalari siqilgan yoki noqulay fazoviy joylashuvlarda paydo bo‘lib, bog‘lanishning to‘yingan qismlarini ko‘rsatadi. Ushbu natijalar Xirshfeldning ikki o‘lchovli barmoq izlari tahliliga mos kelishi bilan tasdiqlandi. RDG bo‘yicha Zn...O o‘zaro ta’sirlarining bog‘lanish energiyasi 5,538 kJ/mol ekanligi hisoblab chiqildi.



3-rasm. (ZnO)_n (n=10÷35) klasterlarda kovalent bo‘lmagan o‘zaro ta’sirlar ulushi

(ZnO)_n klasterlarining elektron tabiati. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, ZnO klasterlari va saponin bilan hosil qilingan supramolekulyar tizimlar uchun elektron lokalizatsiya funksiyasi (ELF) va lokallashgan orbital ko‘rsatkichi (LOL) xaritalari tuzilib, elektron bulutlarning taqsimoti tahlil qilindi. Aniqlanishicha, HOMO–LUMO energiya farqi kamaygan sari klasterlarning elektron qabul qilish qobiliyati ortib, elektrofil indeks yuqorilaydi, bu esa (ZnO)₃₀ va (ZnO)₃₅ kabi yirik klasterlarning yuqori reaksiyon faolligini ko‘rsatadi. Atomlar sonining ortishi bilan molekuladagi zaryad zichligi qayta taqsimlanib, klasterlarning kimyoviy faolligi oshishi kuzatildi. Shuningdek, klasterlarning taqiqlangan hududi ($E_{\text{HOMO}}-E_{\text{LUMO}}$) aniqlandi: masalan, (ZnO)₁₀ klasterida $E_{\text{HOMO}} = -0,30389$ Hatri va $E_{\text{LUMO}} = -0,12819$ Hatri bo‘lib, bu qiymatlar ularning UV–Vis yutilish spektrida elektronlarning HOMO dan LUMO ga o‘tishi orqali namoyon bo‘lishini ko‘rsatadi.

(ZnO)_n (n=10÷35) klasterlari uchun elektron holatlar HOMO va LUMO orbitall energiyalari 4.-rasmda keltirilgan.



4.-rasm. (ZnO)_n lar uchun LUMO va HOMO MO larining qiymatlari

Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, $(\text{ZnO})_n$ ($n=10\div 35$) klasterlarida atomlar soni ortishi bilan HOMO–LUMO energiyalari farqi, ya'ni taqiqlangan hudud kengligi kamayadi: $n=10$ klasterida bu qiymat 4,78 eV bo'lsa, $n=35$ klasterida 3,12 eV ga teng. Bu o'zgarish Zn atomlarining 3d va O atomlarining 2p orbitallari hissasi bilan bog'liq. Shu bilan birga, o'tkazuvchi zonadagi energiya 3,256 eV dan 4,158 eV gacha ortib, bu jarayon Zn atomlarining 4s hamda O atomlarining 2s va 2p orbitallari ishtirokida yuzaga kelishi aniqlangan.

HOMO va LUMO orbitallar xossalaridan foydalanib klasterlarning kimyoviy barqarorligi, elektrofil indeksi va kimyoviy potentsiallarining qiymatlari hisoblandi (2-jadval).

2-jadval

$(\text{ZnO})_n$ klasterlarining kimyoviy potentsiali (μ), barqarorligi (η) va elektrofillik indeksi (ω)

$(\text{ZnO})_n$	μ (eV)	η (eV)	ω (eV)
10	4,5	2,0	5,06
15	4,5	1,8	5,63
20	4,5	1,5	6,75
25	4,5	1,3	7,79
30	4,5	1,1	9,20
35	4,5	1,0	10,13

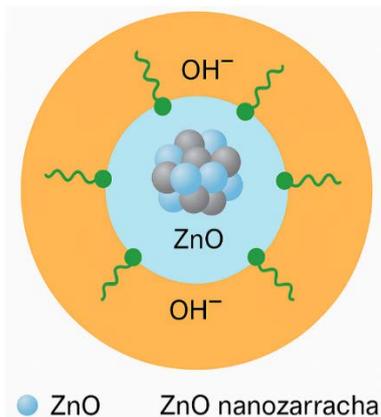
2-jadval ma'lumotlari tahliliga ko'ra, barcha $(\text{ZnO})_n$ klasterlarining kimyoviy potentsiali (μ) bir xil – 4,5 eV bo'lib, bu klasterlar orasida potensial farqi yo'qligini ko'rsatadi. Barqarorlik indeksi (η) klaster o'lchami oshishi bilan kamayadi ($n = 10$ uchun 2,0 eV, $n = 35$ uchun 1,0 eV), bu esa katta klasterlarning barqarorligi pastroq ekanligini bildiradi. Elektrofillik indeksi (ω) esa n ortishi bilan oshib borib, kichik klasterlarga nisbatan yirik klasterlarning elektrofillik qobiliyati yuqori ekanligini ko'rsatadi ($n = 10$ uchun 5,06 eV, $n = 35$ uchun 10,13 eV).

Umuman olganda, tadqiqotda $(\text{ZnO})_n$ klasterlarining geometrik parametrlari, bog' uzunliklari, bog'lanish burchaklari, umumiy energiyasi va barqarorlik ko'rsatkichlari tahlil qilinib, klaster o'lchami ortishi bilan barqarorlikning pasayishi hamda energetik parametrlarning o'zgarish tendensiyalari aniqlangan. Shuningdek, HOMO–LUMO energiya farqlari, elektrofillik va ionlashish potentsiali kabi elektron xususiyatlari hisoblab chiqilib, klaster tarkibidagi ZnO molekullari soni oshishi bilan elektron zichligi va energetik bo'shliqlarning o'zgarishi ko'rsatilgan. Ushbu natijalar ZnO klasterlarining fotokatalitik va optoelektron sohalarda qo'llanilish imkoniyatlarini asoslash uchun muhim ilmiy zamin yaratadi.

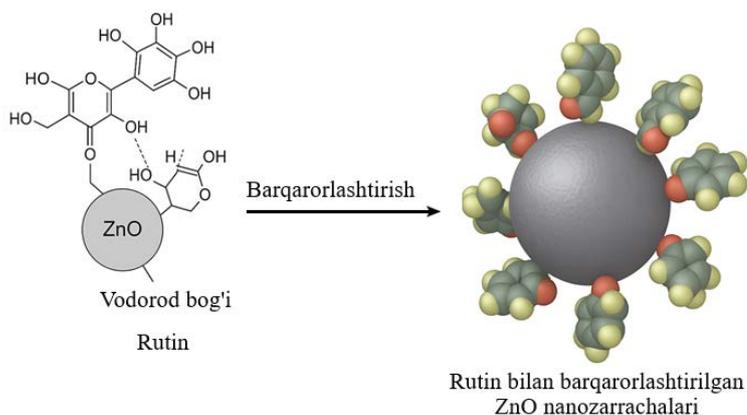
Dissertatsiyaning **“ZnO nanozarrachalarini sintez sharoitlarini maqbullashtirish va fotokatalitik faolligi”** deb nomlangan bobida ZnO nanozarrachalarini saponin va flavonoidlar ishtirokida sintez qilish sharoitlarini maqbullashtirish, ularni Fe^{3+} ionlari bilan dopirlash orqali optik va fotokatalitik xossalarini yaxshilash hamda olingan nanomateriallarning fotokatalitik samaradorligini baholashdan iborat.

ZnO nanozarrachalarini sintezi sharoitlarini maqbullashtirish. Tadqiqotda zol-gel va kimyoviy cho'ktirish usullari qo'llanilib, saponin (5-rasm) va flavonoidlar

(6-rasm) yordamida zarrachalar barqarorlashtirildi. Ushbu tabiiy sirt faol moddalar Zn^{2+} ionlari bilan kompleks hosil qilib, agregatsiyani kamaytiradi va barqaror, mayda o'lchamli zarrachalar shakllanishini ta'minlaydi. pH (9÷11), harorat (60÷90 °C), reaksiya vaqti (2÷5 soat) hamda reagent konsentratsiyasi ($Zn^{2+} = 0,05-0,1 M$; saponin/flavonoid = 0,01÷0,03 M) optimal sharoitlar sifatida aniqlanib, ushbu parametrlar nazoratida sintez qilingan ZnO nanozarrachalari bir jinsli, yuqori dispers va yuqori fotokatalitik faollikka ega bo'lishi ta'minlandi.



5-rasm. SFM saponin ishtirokida hosil bo'lgan ZnO



6-rasm. Rutin bilan barqarorlashtirilgan ZnO

ZnO zarrachalari o'lchamining Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi, pH va temperaturaga bog'liqligining regression tahlili. ZnO nanozarrachalar o'lchamining (d_{ZnO}, nm) Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi ($C_{Zn^{2+}}, M$), pH va harorat ($t, ^\circ C$) ga bog'liqligi bo'yicha olingan (5.1-jadval) natijalar asosida

$$d_{ZnO}, nm = f(C_{Zn^{2+}}, pH, t)$$

ning regression modelini tuzish bo'yicha ishlar amalga oshirildi.

5.1-jadval

ZnO nanozarrachalar o'lchamining Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi (M), pH va harorat ($^\circ C$) ga bog'liqligi bo'yicha olingan natijalar

№	Zn^{2+}, M	pH	$t (^\circ C)$	d_{ZnO}, nm
1	0,0001	9	60	24
2	0,0001	10	70	22
3	0,0001	11	80	21
4	0,0003	9	65	23
5	0,0003	10	75	21
6	0,0003	11	85	20
7	0,0005	9	70	22
8	0,0005	10	80	20
9	0,0005	11	90	19
10	0,0007	9	75	21
11	0,0007	10	85	19
12	0,0007	11	90	18
13	0,0010	9	75	20
14	0,0010	10	85	18
15	0,0010	11	90	17

ZnO nanozarrachalari o'lchamining Zn^{2+} konsentratsiyasi, pH va temperaturaga bog'liqligi bo'yicha regressiya tahlil natijalarida quyidagi regression tenglama olindi:

$$d_{ZnO}, nm = 40,46 - 4326,58 \cdot C_{Zn^{2+}} - 1,71 \cdot pH + 0,01 \cdot t.$$

Regression tahlili natijalariga ko'ra, qurilgan model yuqori darajada adekvat bo'lib, determinatsiya koeffitsienti $R^2 = 0,973$ ni tashkil etdi, ya'ni model ma'lumotlarning 97,3 % qismini tushuntira oladi. Eng muhim omil sifatida Zn^{2+} konsentratsiyasi aniqlanib, uning har 0,0001 M ga oshishi zarracha o'lchamini o'rtacha 0,43 nm ga kamaytirishi qayd etildi ($P < 0,001$). pH ham kuchli ta'sirchi parametr bo'lib, har bir birlikka oshganda zarracha o'lchami taxminan 1,71 nm ga kamayadi ($P < 0,001$). Harorat omilining koeffitsienti esa statistik jihatdan ahamiyatli emasligi ($P = 0,544$) sababli, uning ta'siri boshqa parametrlar bilan solishtirganda sezilarli emasligi aniqlandi. Ozod had qiymati 40,46 bo'lib, nazariy jihatdan Zn^{2+} konsentratsiyasi va pH nol bo'lgan sharoitda zarrachalar o'lchami ~40 nm atrofida bo'lishi bashorat qilinadi. Shu bilan, model zarracha o'lchamining asosan Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi va pH ga bog'liqligini aniq ko'rsatadi.

Regression tahlili natijalari modelning yuqori aniqlikka ega ekanini ko'rsatdi ($R^2 = 0,944$). ANOVA tahliliga ko'ra, Zn^{2+} konsentratsiyasi va pH zarracha o'lchamiga eng kuchli ta'sir ko'rsatgan, haroratning ta'siri esa nisbatan kichik bo'lgan. Zn^{2+} va pH ortishi zarracha o'lchamini kamaytiradi, harorat oshishi esa uni biroz kattalashtiradi. Optimal sharoitlar: $Zn^{2+} = 0,001$ M, pH = 9–10 va $T = 25-60$ °C bo'lib, bu parametrlar kichik (8–20 nm) o'lchamli, barqaror va yuqori fotokatalitik faollikka ega ZnO nanozarrachalarini olish uchun eng maqbul deb topildi.

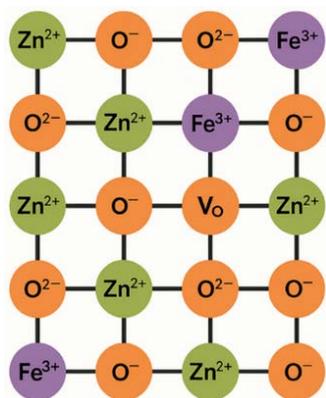
Ushbu bo'limda ZnO nanozarrachalarini Fe^{3+} ionlari bilan dopirlanish jarayoni va uning natijalari yoritilgan. Fe^{3+} ionlari ZnO panjarasiga kiritilganda, kislorod vakansiyalari hosil bo'ladi, tarmoqli oraliq'i torayadi va elektron-teshik juftliklari rekombinatsiyasi sekinlashadi, natijada fotokatalitik faollik ortadi. Dopant sifatida $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 0,5–3 mol % miqdorda qo'shib, Zn^{2+} ionlarining bir qismini almashtiradi. 400–500 °C da kuydirish jarayoni natijasida kristall tuzilma mustahkamlanadi. Dopirlangan namunalar oqdan och jigarranggacha rang o'zgarishini namoyon etdi, bu Fe^{3+} ionlarining kiritilishini tasdiqlaydi (7-rasm). DLS, TEM va SEM tahlillari zarracha o'lchamining 30–40 nm gacha oshganini ko'rsatdi. Sol-gel va kimyoviy cho'ktirish usullari saponin va flavonoidlar ishtirokida zarrachalarning bir jinsliligini, yuqori kristallik darajasini va ekologik xavfsizligini ta'minlaydi. Umuman olganda, Fe^{3+} dopirlanishi ZnO nanozarrachalarining fotokatalitik, optik va elektron xossalari yaxshilab, ularni ekologik tozalash, sensor va energetika tizimlarida qo'llash uchun istiqbolli materialga aylantiradi.

ZnO va Fe^{3+} bilan dopirlangan ZnO nanozarrachalarining fizik-kimyoviy tahlili. Fe^{3+} ionlari bilan dopirlangan ZnO nanozarrachalari oddiy ZnO ga nisbatan kengaytirilgan fizik-kimyoviy xossalarga ega bo'lib, ularning tahlili zarrachalarning strukturaviy, sirt, morfologik va optik parametrlarini baholash imkonini beradi. Ushbu bo'limda dopirlangan nanomateriallarning kristallik darajasi, zarracha

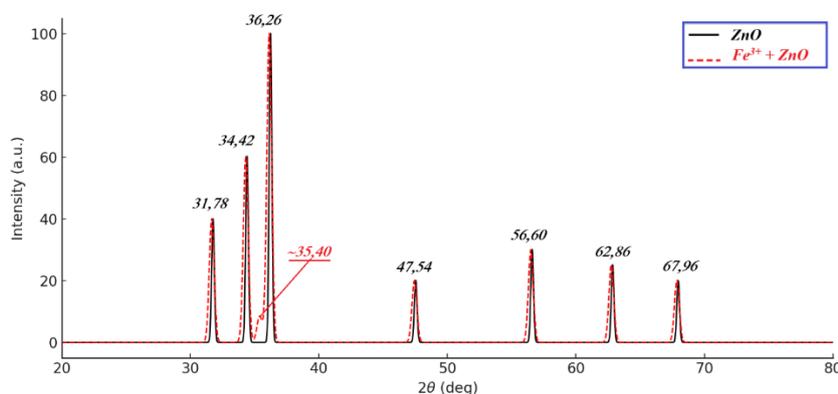
o'lchami, morfologiyasi, sirt maydoni, funktsional guruhlari va optik xossalari keng ko'lamda o'rganiladi.

XRF tahlili natijalariga ko'ra, sintez qilingan ZnO nanozarrachalari yuqori sof tarkibga ega bo'lib, asosiy komponent sifatida faqat rux va kislorod aniqlangan. Spekrda 8,6 keV da asosiy Zn-K α cho'qqisi qayd etilgan, begona aralashmalar topilmagan, bu esa namunalar tozaligini va sintezning samaradorligini tasdiqlaydi. Fe³⁺ bilan dopirlangan ZnO namunalarida esa Zn-K α cho'qqilari bilan bir qatorda Fe-K α cho'qqilari ham kuzatilib, Fe³⁺ ionlarining Zn²⁺ panjarasiga kirgani va bir jinsli taqsimlangani aniqlandi.

XRD tahlili natijalariga ko'ra, toza ZnO nanozarrachalari rux oksidining geksagonal wurtzit fazasiga ega bo'lib, difraktogrammada $2\theta \approx 31,7^\circ, 34,4^\circ, 36,2^\circ, 47,5^\circ, 56,6^\circ, 62,8^\circ$ va $67,9^\circ$ da joylashgan cho'qqilar qayd etilgan (8-rasm).



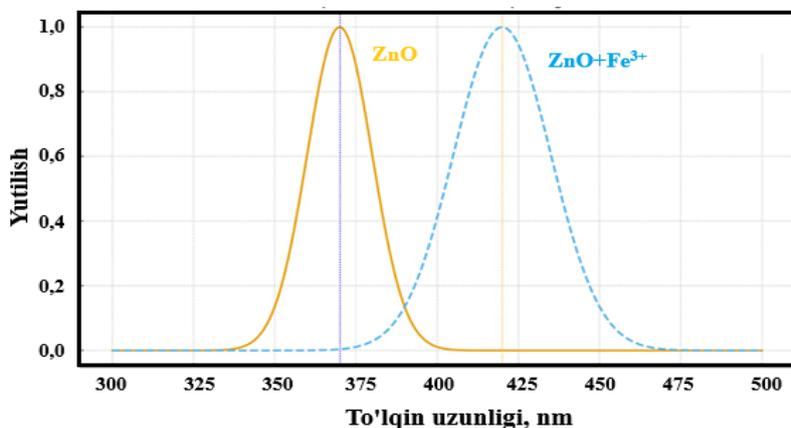
7-rasm. Fe³⁺ ionlari bilan dopirlangan ZnO kristallari



8-rasm. ZnO va Fe³⁺ bilan dopirlangan ZnO nanozarrachalarining difraktogrammalari

ZnO va Fe³⁺ bilan dopirlangan ZnO nanozarrachalarining yutilish spektrlari o'rganildi. UB-Vis tahlil natijalariga ko'ra (9-rasm), toza ZnO nanozarrachalarida yutilish cho'qqisi ≈ 370 nm da kuzatilib, bu keng tarmoqli ($E_g \approx 3,3$ eV) yarim o'tkazgich tuzilmasiga mos keladi. Fe³⁺ bilan dopirlanganda yutilish cho'qqisi 410–430 nm oralig'iga siljib, ko'rinadigan nurlar sohasida faollik oshgan.

Bu holat Fe³⁺ ionlarining Zn²⁺ o'rnini bosishi natijasida hosil bo'lgan kislorod vakansiyalari va qo'shimcha energiya darajalari bilan bog'liq bo'lib, materialning fotokatalitik samaradorligini kuchaytiradi.



9-rasm. ZnO va Fe³⁺ ionlari bilan dopirlangan ZnO UB spektrlari

IR spektrlari ham bu o'zgarishni tasdiqlaydi: Zn–O bog'iga tegishli 694–702 cm^{-1} cho'qqi dopirlangan namunada 670–690 cm^{-1} ga siljib, kengaygan; 560–590 cm^{-1} atrofida yangi Fe–O tebranish cho'qqilari paydo bo'lgan. 854–880 cm^{-1} oralig'idagi panjara tebranishlari saqlanib qolgan, 1420 cm^{-1} da esa karbonat guruhlariga oid cho'qqilar qayd etilgan. Shunday qilib, Fe^{3+} ionlari ZnO panjarasiga kirib, defektlar va kislorod vakansiyalarini oshiradi, bu esa yutilish sohasining ko'rinadigan nurlarga siljishiga va nanomaterialning fotokatalitik xossalarining yaxshilanishiga olib keladi.

BET tahlili natijalari shuni ko'rsatdiki, ZnO va Fe^{3+} dopirlangan ZnO nanozarrachalari IV-tip izoterma va gisterezis halqasiga ega mezog'ovakli tuzilishga ega. Fe^{3+} dopirlangan namunada sirt maydoni ($30 \div 100 \text{ m}^2/\text{g}$) va g'ovak hajmi ($0,15 \div 0,35 \text{ cm}^3/\text{g}$) oshgan, bu defektlar va kislorod vakansiyalarining ko'payganidan dalolat beradi. O'rtacha g'ovak diametri $3 \div 5 \text{ nm}$ gacha kamaygan. 30 °C da adsorbsion sig'im yuqori ($3,2 \div 3,5 \text{ mol}/\text{kg}$) bo'lib, 80 °C da biroz kamaygan. Histerezis halqasining torayishi desorbsiyaning osonlashganini bildiradi. Umuman, Fe^{3+} dopirlangan ZnO yuqori sirt faolligi va samarali adsorbsion xossalari bilan fotokataliz va havo tozalashda istiqbolli materialdir.

AFM tahlili natijalariga ko'ra, ZnO plyonkasi zich joylashgan nanozarrachalardan tashkil topgan bo'lib, sirtning yuqori noteksva rivojlangan nanostruktura qayd etildi. 2D va 3D FimtoScan tasvirlari relyefning baland-past cho'qqilarga ega ekanini, sirt maydoni kengayib, adsorbsion markazlar ko'payganini ko'rsatdi. Cho'qqilar balandligi $\sim 100 \text{ nm}$ gacha yetib, yorug'lik sochilishini kuchaytiradi.

DLS tahliliga ko'ra, sof ZnO nanozarrachalari tor ($20 \div 40 \text{ nm}$) monomodal taqsimotga ega, Fe^{3+} bilan dopirlanganda esa bimodal yoki multimodal ($30 \div 50 \text{ nm}$ va $100 \div 150 \text{ nm}$) taqsimot kuzatildi. Bu Fe^{3+} ionlarining panjaraga kirishi, defektlar va kislorod vakansiyalarining ortishi bilan bog'liq. Optimal dopant miqdorida zarrachalar barqaror dispersiyalanadi, ortiqcha dopant esa agregatsiyani kuchaytiradi. Shunday qilib, dopirlangan ZnO kattaroq zarrachalar, kengroq taqsimot va yuqori sirt faollik bilan ajralib turadi, bu esa uning fotokatalitik va adsorbsion samaradorligini oshiradi.

ZnO nanozarrachalarining fotokatalitik faolligini baholash. Fotokatalitik faollik ZnO nanozarrachalarining nurlanish ostida organik ifloslanuvchi moddalarni (masalan, metiloranj, metil qizili yoki fenol) parchalay olish qobiliyatiga asoslanadi. Tahlil UV–Vis spektrofotometriya yordamida olib borilib, moddalarning yutilish piklari vaqt o'tishi bilan pasayishi orqali reaksiyaning samaradorligi baholanadi.

Ekspirimental jarayon: 10–50 mg/l konsentratsiyadagi metiloranj eritmasiga ZnO katalizatori qo'shib, 365 nm ultrabinafsha nur bilan nurlantirildi. 30, 60, 90 va 120 daqiqalarda olingan spektrlarda 450–460 nm atrofida yutilish pikining pasayishi fotodegradatsiya kechayotganini ko'rsatdi. Konsentratsiya bilan optik zichlik o'rtasidagi bog'liqlik Bouguer–Lambert–Beer qonuniga mos bo'lib, reaksiyaning birinchi tartibli kinetik tenglamasi orqali baholandi:

Konsentratsiyaning vaqtga bog'liqligini baholash uchun birinchi tartibli reaksiya kinetika tenglamasidan foydalanildi:

$$\ln(C_0/C_t) = kt,$$

bunda C_0 - boshlang'ich konsentratsiya, C_t - muayyan vaqtdagi konsentratsiya, k - reaksiya tezlik konstantasi, t - nurlanish vaqti.

Reaksiyaning yakuniy samaradorligi (η) quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$\eta = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \cdot 100\%.$$

Natijalar ZnO nanozarrachalarining metiloranjni 120 daqiqagacha deyarli to'liq parchalay olishini tasdiqladi.

Fotokatalitik samaradorlikka ta'sir etuvchi omillar: pH - optimal 5–7 oralig'ida, bu muhitda ZnO yuzasi gidroksil radikallar hosil bo'lishini kuchaytiradi.

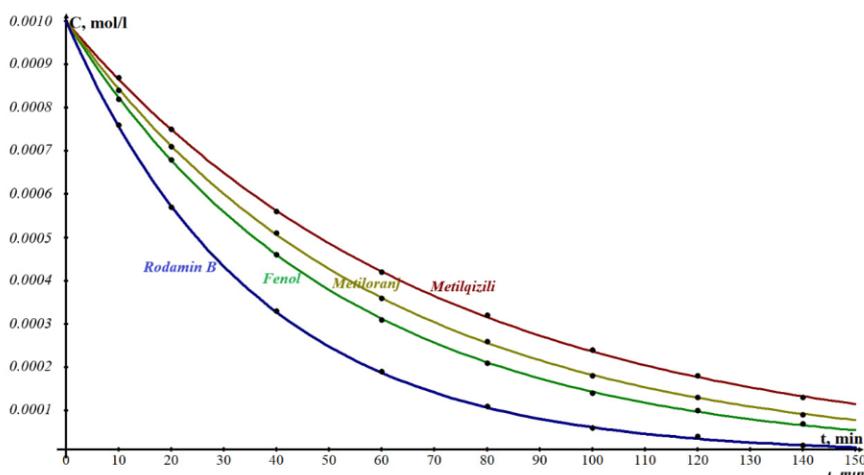
Zarracha o'lchami - 20–30 nm diapazonda maksimal samaradorlik kuzatildi; katta zarrachalarda (50 nm dan ortiq) aglomeratsiya sababli samaradorlik pasaydi.

Nurlanish vaqti - optimal 60–90 daqiqada, keyinchalik rekombinatsiya jarayonlari tufayli tezlik kamayadi.

Stabilizatorlar ta'siri: saponinlar va sitratlar ZnO yuzasini gidrofillashtirib, adsorbsiyani kuchaytirgan; flavonoidlar esa elektron–teshik rekombinatsiyasini sekinlashtirgan. Eng yuqori samaradorlik saponinlar bilan stabilizatsiya qilingan ZnO da qayd etildi.

Shunday qilib, ZnO nanozarrachalarining fotokatalitik samaradorligi ularning o'lchami, sirt tuzilishi, pH va nurlanish vaqti bilan chambarchas bog'liq. 20–30 nm o'lchamdagi zarrachalar yuqori yuza maydoni va past rekombinatsiya tufayli maksimal faollik ko'rsatgan. Ushbu natijalar adabiyotlardagi [Liu et al., 2015; Zhang et al., 2017; Ranjit et al., 2019] ma'lumotlar bilan to'liq mos keladi. ZnO nanozarrachalari ekologik tozalash, sensor va quyosh elementlari tizimlarida samarali fotokatalizator sifatida istiqbolli ekanligi tasdiqlandi.

Ushbu tadqiqotda 20÷50 nm o'lchamdagi ZnO nanozarrachalarining fotokatalitik faolligi metiloranj, fenol, metil qizil va rodamin B kabi organik ifloslantiruvchi moddalar parchalanishida o'rganildi. Fotokatalitik reaksiyalar xona haroratida (25 ± 2 °C) shisha kyuvetada, UV va KS nurlari ta'sirida olib borildi; xarakterli yutilish maksimumlari fenol uchun 270 nm, metil qizil va metil zarg'aldoq uchun 365 nm, rodamin B uchun 554 nm da kuzatildi.



10-rasm. Organik ifloslanuvchilar konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishi

Fotokatalitik faollikni baholashda reagent konsentratsiyasining vaqtga bog‘liqlik grafigi tuzilib, moddaning fotokataliz jarayonida qay darajada tez parchalanishini ko‘rsatadi va fotokatalizator samaradorligini aniqlashda asosiy ko‘rsatkich sifatida xizmat qiladi. Organik ifloslanuvchilarning konsentratsiyasi vaqt bo‘yicha o‘zgarishi 10-rasmda aks ettirilgan.

Olingan natijalar yordamida reaksiya tezligi konstantalari (k) va yarim yemirilish davri ($t_{1/2}$) aniqlandi.

Ma'lumotlarning takrorlanishini ta'minlash maqsadida barcha tajribalar uch marta amalga oshirildi. Olingan ma'lumotlar asosida har bir ifloslantiruvchi uchun fotokatalitik degradatsiya jarayonining kinetik xususiyatlari, shu jumladan reaksiya tezligi konstantasi (k) va ($t_{1/2}$) yarim yemirilish davri aniqlandi. Olingan natijalar 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval

Fotokatalitik degradatsiyaning kinetik xususiyatlari ZnO dan foydalanadigan ifloslantiruvchi moddalar

Ifloslovchi	λ , nm	k , min ⁻¹	$t_{1/2}$, min
Fenol	270	0,0194	35,7
Metil qizili	365	0,0144	48,1
Metiloranj	365	0,0170	40,7
Rodamin V	554	0,0279	24,8

5-jadval ma'lumotlariga ko‘ra, ZnO ishtirokida organik ifloslantiruvchilarning fotokatalitik parchalanish samaradorligi turlicha bo‘lib, eng yuqori tezlik Rodamin B uchun ($k = 0,0279 \text{ min}^{-1}$, $t_{1/2} = 24,8 \text{ min}$) qayd etildi, bu uning ultrabinafsha nurlanishi ta'sirida ZnO yuzasida hosil bo‘lgan faol radikallar bilan yuqori reaktivlikka ega o‘zaro ta'siriga bog‘liq. Fenol ($k = 0,0194 \text{ min}^{-1}$, $t_{1/2} = 35,7 \text{ min}$) va metil zarg‘aldoq ($k = 0,0170 \text{ min}^{-1}$, $t_{1/2} = 40,7 \text{ min}$) ham yaxshi parchalanish ko‘rsatdi, ammo Rodamin B ga nisbatan pastroq samaradorlikda, metil qizil esa eng past tezlikka ega bo‘lib ($k = 0,0144 \text{ min}^{-1}$, $t_{1/2} = 48,1 \text{ min}$), fotokatalitik parchalanishga sust sezgirlik namoyon qildi. Shunday qilib, tadqiqot natijalari ZnO ning fenol, metil qizil, metil zarg‘aldoq va Rodamin B kabi organik ifloslantiruvchi moddalar parchalanishida samarali fotokatalizator ekanini ko‘rsatdi.

Oqova suvlarini to‘qimachilikda ishlatiladigan bo‘yoqlardan ZnO nanozarrachalari ishtirokida tozalash. ZnO ni qo‘llagan holda adsorbtsion va fotokatalitik tozalash texnologiyalari O‘zbekiston–Xitoy MCHJ "AHMAD ISROIL TEX" qo‘shma korxonasiida amaliyotga joriy etildi (2024 y. 28 oktyabrdagi №28/10-01-sonli ma'lumotnoma). Natijada ZnO nanozarrachalari bo‘yoqlarni adsorbtsiya qilishda faollashgan ko‘mirga nisbatan yuqori samaradorlik ko‘rsatdi, tozalangan suv ekologik standartlarga muvofiq kelib, ishlab chiqarishda qayta foydalanishga yaroqli ekanligi tasdiqlandi.

Umuman olganda nanozarrachalarni barqarorlashtirish uchun mos sirt faol moddani tanlash masalasi ko‘rib chiqilib, saponin kabi biologik sirt faol moddaning samaradorligi asoslab berilgan, Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi, muhitning pH qiymati va sintez haroratining zarracha o‘lchamiga ta'siri tajribaviy jihatdan o‘rganilgan, ushbu omillarning o‘zaro bog‘liqligi regression tahlil yordamida modellashtirilib,

maqbul sintez sharoitlari aniqlangan, ZnO nanozarrachalarining fotokatalitik faolligi turli organik ifloslovchilar (metil oranj, rodamin B va boshqalar)ga nisbatan UV nurlanish sharoitida o'rganilib, samaradorlik ko'rsatkichlari aniqlangan. Ushbu bobda olingan natijalar ZnO nanozarrachalarining o'lcham-parametrlarini boshqarish orqali ularning fotokatalitik xossalarini oshirishning ilmiy asoslarini yaratadi.

“ZnO nanomateriallarini soqonlar va flavonoidlarni sirt faol modda sifatida qo'llab ,sintez va ularning fizik-kimyoviy xossalari ” mavzusidagi dissertatsiya yuzasidan quyidagi xulosalarga kelindi.

XULOSALAR

1. Hisoblangan ma'lumotlar shuni ko'rsatdiki, $(\text{ZnO})_n$ klasterlari o'lchami kattalashgan sari ularning Zn–O bog' uzunligi ortib, HOMO–LUMO energiya farqi kamayadi, elektrofillik indeksi esa oshadi, bu esa yirik klasterlarning fotokatalitik jarayonlarda yorug'likni samarali yutish va elektronlarni qabul qilish qobiliyatini kuchaytiradi.

2. Klasterlarning barqarorligi (η) atomlar soni ortishi bilan pasayib borsa-da, ularning yorug'lik energiyasini yutish va qayta ishlash imkoniyati oshib, fotokatalitik faolligi yuqori bo'lishi energiya saqlash, optoelektronika va nanomateriallarni ishlab chiqishda yirik $(\text{ZnO})_n$ klasterlaridan samarali foydalanish imkonini beradi.

3. Saponin va flavonoidlar ishtirokida sintez qilingan ZnO nanozarrachalari kichik ($10\div 30$ nm) o'lchami, sferik va bir xil morfologiyasi, yuqori dispersiyalanuvchanligi bilan ajralib turib, zarrachalarning aglomeratsiyasini kamaytirishi, kristallanish jarayonini nazorat qilishi va fotokatalitik faollikni 30–50 % gacha oshirishi aniqlandi.

4. ZnO nanozarrachalari o'lchamini boshqarishda Zn^{2+} ionlari konsentratsiyasi, muhit pH qiymati va sintez harorati asosiy omillar ekanligi, regressiya tahlili modelning yuqori adekvatligi ($R^2 = 0,954$) ni ko'rsatishi va optimal shartlarda (0,001 M, pH = 8, 25 °C) eng kichik ($\sim 8\div 25$ nm) barqaror nanozarrachalar hosil bo'lishi isbotlandi.

5. Saponinlar bilan barqarorlashtirilgan va Fe^{3+} bilan doplangan ZnO nanozarrachalari ultrabinafsha nurlari ta'sirida Rodamin B va metil qizil kabi organik bo'yoqlarni samarali parchalashi, shu bilan birga oqava suvlarni tozalashda istiqbolli, ekologik xavfsiz va iqtisodiy jihatdan maqbul texnologiya sifatida qo'llanishi mumkinligi isbotlandi.

6. ZnO nanozarrachalari yordamida adsorbtsion va fotokatalitik tozalash texnologiyalari O'zbekiston–Xitoy MCHJ “AHMAD ISROIL TEX” qo'shma korxonasida amaliyotga joriy etilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.K.02.05
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

УСМОНОВА ХИЛОЛА ИСРОПИЛОВНА

**СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ ZnO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
САПОНИНОВ И ФЛАВОНОИДОВ В КАЧЕСТВЕ ПОВЕРХНОСТНО-
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

02.00.04 – Физическая химия

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ХИМИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Самарканд – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2024.2.PhD/K769.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете имени Ш.Рашидова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Ученого совета по адресу www.samdu.uz и информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: Мухамадиев Нурали Курбаналиевич
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты: Эшмаматова Нодира Бахромовна
доктор химических наук, доцент
Муродова Дилафруз Кадировна
PhD, доцент

Ведущая организация: Институт общей и неорганической химии АН РУз

Защита диссертации состоится «03» декабря 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.12.2019.K.02.05 при Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова. По адресу: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, дом 15, Института Биохимии, Химический корпус, 220 кабинет. Тел.: (99866)239-11-40; Факс: (99866) 239-11-40. E-mail: devonxona@samdu.uz.

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова (зарегистрировано за № 98. Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар дом 15, ИРЦ. (Фундаментальная библиотека CaMГУ) Тел.: (99866)239-11-51.

Автореферат диссертации разослан «22» декабря 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 7 от «22» декабря 2025 г).



А.М.Насимов
Председатель научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н.,
профессор

Ж.Р.Узоков
Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней, PhD

О.Н.Рузимуратов
Председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению учёных
степеней д.х.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (автореферат диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире наноматериалы на основе ZnO имеют важное значение, поскольку их уникальные физические и химические свойства, особенно широкая запрещённая зона (3,37 эВ), высокая фотостабильность, пьезоэлектрическая и фотокаталитическая активность, позволяют широко применять их в различных областях современных технологий. В настоящее время наноматериалы, полученные на основе ZnO, широко используются в оптоэлектронике (УФ-детекторы, диоды, солнечные батареи), биомедицине (антибактериальные покрытия, биосенсоры, системы доставки лекарств), экологии (фотокаталитическое разложение органических загрязнителей), а также в энергетике (газовые сенсоры и суперконденсаторы) в качестве основных материалов. Поэтому наноматериалы ZnO имеют стратегическое значение в развитии «зелёных» технологий, возобновляемой энергетики и нанoeлектроники.

Во многих научных центрах мира достигнуты определённые успехи в разработке методологических основ получения наноматериалов ZnO, изучении их физико-химических свойств и улучшении их фотокаталитических характеристик. В этом направлении заслуживают внимания работы по оптимизации размеров частиц, морфологии и других физико-химических свойств посредством процессов синтеза, снижению рекомбинации электрон-дырочных пар путём устранения дефектов в кристаллической структуре, расширению поглощения света до видимой области за счёт допирования металлами и введения композитных структур, а также деградации органических загрязнителей в сточных водах. Наряду с этим, несмотря на доказанные возможности применения наноматериалов ZnO в качестве фотокатализаторов в промышленности и экологии, такие проблемы, как производство, гарантирование безопасности и стандартизация для широкого использования, всё ещё требуют своего решения.

В Узбекистане также проводятся исследования, посвящённые синтезу и изучению свойств наночастиц ZnO. Изучены их фотокаталитические свойства, достигнуты положительные результаты по их применению для получения водорода и очистки воды от различных органических загрязнителей. В Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»¹ определены важные задачи, направленные на «дальнейшее развитие экспортного потенциала местных отраслей промышленности при полном использовании имеющихся возможностей». В связи с этим разработка методов синтеза ZnO-наноматериалов, их совершенствование, а также изучение их фотокаталитических, сорбционных и антимикробных свойств и возможностей применения при создании сенсорных устройств имеют большое теоретическое и практическое значение.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»

Кроме того, в Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60, в Постановлении Президента от 25 октября 2018 года № PQ-3983 «О мерах по ускоренному развитию химической промышленности Республики Узбекистан», от 3 апреля 2019 года № PQ-4265 «О мерах по дальнейшему реформированию химической промышленности и повышению её инвестиционной привлекательности», а также в Постановлении Президента от 13 февраля 2021 года № PQ-4992 «О мерах по дальнейшему реформированию и финансовому оздоровлению предприятий химической промышленности, развитию производства химической продукции с высокой добавленной стоимостью» и других нормативно-правовых актах определены задачи, выполнение которых в определённой степени обеспечивается результатами данного диссертационного исследования.

Связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Настоящая диссертационная работа выполнена в соответствии с VII приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан – «Химия, химические технологии и нанотехнологии».

Степень изученности проблемы. В научных центрах многих стран мира проведены многочисленные исследования, посвящённые синтезу оксидных материалов наноразмерного уровня, изучению их текстурных, каталитических, сорбционных характеристик, а также оценке возможностей применения полученных материалов. В этом направлении значительный вклад внесли такие учёные, как Wang B., Nagase S., Zhao C., Sanyal B., Mookerjee A., Bovhyra R. Ab., Venhryn Y. I., Al-Sunaidi A. A., Hilal I. H., Jabbar R. H., Jabbar S. J., Shastri R., Cheng X., Li F., Zhao Y. A., Martins R. M. S., Diyarov A. A., Sanakousar M. F., Chandiramouli R., Sriram S., Balamurugan D., Šarić A., Despotović I., Štefanić G., Hadipour N. L., Ahmadi Peyghan A., Soleymanabadi H., Ahmad Siddiqui S., Abdullah M. M., Chandiramouli R., Thayumanavan A., Srinivasaraghavan R., Ovsianikova L., Cheng X., Zhao M., Freeman C. L., Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M., Park Y. S., Pauku Y., Michalkova A. и другие. Ими разработаны эффективные методы получения наноразмерного оксида цинка и его различных композитов, а также современными методами исследованы их текстурные и сорбционные характеристики.

В Узбекистане развитие данного направления обеспечено исследованиями Рузимуродова О. Н., Диярова А., Орипова А. Э., Муминова С. З., Рахматкариева Г. У., Кабулова Б. Ж., Мухамадиева Н. К., Узокова Ж. Р., Эшмбетова И. Д., Исмоилова Р. И. и других, которые внесли значительный вклад в разработку сорбентов на основе местного сырья, модификацию природных и синтетических цеолитов, изучение их сорбционных и текстурных характеристик, а также очистку сточных вод от различных примесей.

Тем не менее, задача синтеза наноразмерного ZnO с управляемыми текстурными характеристиками, обеспечивающими проявление заданных свойств, а также исследования его фотокаталитических, сорбционных и

антимикробных свойств остаётся актуальной и представляет собой важное научное направление.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научного учреждения, где выполняется диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова по теме «Новые методы синтеза, исследования и переработки природных и синтетических материалов», а также в рамках государственного гранта OT-F7-83-85 «Моделирование и оптимизация хроматографических процессов, изучение взаимосвязей удерживаемых величин и свойств и их применение в нанохроматографии».

Цель исследования заключается в синтезе наноматериалов ZnO с использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ, а также в определении их физико-химических свойств.

Задачи исследования:

исследовать свойства нанокластеров $(\text{ZnO})_n$ методом DFT;

разработать и оптимизировать метод синтеза наноматериалов ZnO с использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ;

определить и оценить физико-химические свойства синтезированных наноматериалов ZnO;

изучить спектральные характеристики и оценить фотокаталитические свойства синтезированных наноматериалов ZnO.

Объект исследования: ацетат цинка, нитрат цинка, хлорид цинка, тетраэтоксисилан, этиловый спирт, сапонины и флавоноиды выделенные из растения этмак, а также органические растворители.

Предмет исследования – получение наноматериалов ZnO по технологии золь-гель с применением сапонинов и флавоноидов, а также исследование их текстурных, сорбционных и фотокаталитических свойств с использованием квантово-химических расчетов.

Методы исследования: В диссертации использованы современные физико-химические, спектроскопические (УФ-, КС-, ИК-), сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, порометрия, а также кинетические и статистические методы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан и оптимизирован метод синтеза ZnO наноматериалов с использованием сапонинов в качестве поверхностно-активного вещества и флавоноидов в качестве стабилизатора.

структура и электронные свойства $(\text{ZnO})_n$ нанокластеров оценены квантово-химическим методом, при этом установлено, что увеличение числа молекул в кластере приводит к уменьшению ширины запрещённой зоны.

оценены морфология поверхности, изотерма сорбции и фотокаталитические характеристики ZnO наноматериалов, а также доказано, что легирование ионами Fe^{3+} вызывает смещение области поглощаемого излучения в видимую зону спектра.

показано, что степень деградации в фотокаталитических реакциях с участием ZnO наноматериалов составляет 91,5 %.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана методика синтеза наноматериалов ZnO;

разработана методика изучения свойств нанокластеров $(\text{ZnO})_n$ квантово-химическим методом;

разработана методика изучения текстурных и сорбционных свойств наноматериалов ZnO;

разработана методика очистки органических красителей из сточных вод с использованием наноматериалов ZnO и внедрена в практику.

Достоверность результатов исследования обеспечена применением современных высокочувствительных методов (SEM, AFM, УФ-, КС-, ИК-спектроскопия, порометрия, физико-химические, кинетические и статистические методы), публикацией полученных результатов в научных изданиях, а также их обсуждением на международных и республиканских конференциях.

Научная и практическая значимость результатов исследования:

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что структура и электронные свойства нанокластеров $(\text{ZnO})_n$ проанализированы квантово-химическим методом, и определены их энергетическая стабильность, распределение электронной плотности и оптические переходы. С использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ разработаны теоретические и экспериментальные основы синтеза наноматериалов ZnO в виде стабильных систем. Эти научные подходы обогащают фундаментальные направления химии наноматериалов и теоретически обосновывают возможности их применения в фотокатализе, адсорбции и технологиях экологической очистки.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке методики изучения свойств нанокластеров $(\text{ZnO})_n$ квантово-химическим методом, создании «зелёного» способа синтеза ZnO на основе сапонинов и флавоноидов, предложенного как экономически эффективная технология, основанная на возобновляемых ресурсах, а также в разработке практического метода фотокаталитического разложения органических красителей в сточных водах.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по синтезу ZnO наноматериалов с использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ и определению их физико-химических свойств:

технология адсорбционной очистки с применением ZnO была внедрена на практике в Узбекско-Китайском совместном предприятии ООО «АНМАД ISROIL TEX» (Справка Узбекско-Китайского совместного предприятия ООО «АНМАД ISROIL TEX» № 28/10-01 от 28 октября 2024 года). В результате установлено, что эффективность адсорбции красителей с использованием наночастиц ZnO значительно выше по сравнению с активированным углем, а качество очищенной воды соответствует экологическим стандартам.

технология применения ZnO в качестве фотокатализатора также внедрена в производственную практику Узбекско-Китайского совместного предприятия ООО «AHMAD ISROIL TEX» (Справка № 28/10-01 от 28 октября 2024 года). В результате показано, что использование наночастиц ZnO позволяет достичь эффективности фотокаталитического разложения синтетических красителей на уровне около 90 %, что подтверждает высокий потенциал данных материалов для экологически чистых технологий очистки сточных вод.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования доложены и обсуждены на 13 научно-практических конференциях, в том числе на 3 международных и 10 республиканских.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 2 статьи – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание степени доктора философии (PhD), 3 статьи – в зарубежных журналах, включая 1 статью, опубликованную в журнале, входящем в базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 119 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость проведенных исследований, определены цель и задачи исследования, описаны объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты работы, раскрыто научное и практическое значение полученных данных, приведены сведения о внедрении результатов опубликованных в научных работах и структуре диссертации.

В обзоре литературы проанализированы передовые научные подходы к получению наночастиц ZnO. Выбор этих подходов обоснован необходимостью углубленного изучения фотокаталитических и адсорбционных свойств наноматериалов для разработки экологически безопасных и эффективных технологий очистки сточных вод текстильной промышленности. Применение сапонинов соответствует принципам «зеленой» химии, обеспечивая экологическую безопасность, а введение ионов-допантов расширяет функциональные возможности материала. В диссертации использованы современные методы анализа (XRD, SEM, FTIR, UV–Vis и PL), что позволило исследовать структурные, морфологические, оптические и химические свойства синтезированных наноматериалов. Кроме того, для оценки фотокаталитической активности изучена кинетика разложения органических красителей, а адсорбционные характеристики проанализированы с использованием изотермических и кинетических

моделей, что повысило достоверность полученных научных результатов. Комплекс примененных методов оценен как современный подход, обеспечивающий полное и эффективное решение поставленных задач.

В разделе диссертации «**Объект и методы исследования**» отмечено, что в качестве объекта исследования выбраны наночастицы ZnO, стабилизированные сапонидами и допированные ионами Fe³⁺. Такой выбор научно обоснован и имеет практическую значимость. Данный подход позволяет глубоко изучить фотокаталитические и адсорбционные свойства наноматериалов и разработать экологически безопасные и эффективные технологии очистки сточных вод текстильной промышленности. Использование сапонинов соответствует принципам «зелёной» химии, обеспечивая экологическую безопасность, а введение ионов-допантов расширяет функциональные возможности материала. Применённые в диссертации современные методы анализа, такие как XRD, SEM, FTIR, UV–Vis и PL, позволили определить структурные, морфологические, оптические и химические свойства синтезированных наноматериалов. Кроме того, для оценки фотокаталитической эффективности изучена кинетика разложения органических красителей, а адсорбционные характеристики проанализированы с использованием изотермических и кинетических моделей, что обеспечило достоверность полученных научных результатов. Таким образом, комплекс применённых методов оценен как современный подход, обеспечивающий полное и эффективное решение поставленных задач.

Глава диссертации «**Изучение структурной и электронной природы кластеров (ZnO)_n методом DFT**» посвящена углублённому исследованию структурных и электронных свойств кластеров (ZnO)_n с использованием теории функционала плотности (DFT).

Структурные и энергетические характеристики кластеров (ZnO)_n. Квантово-химическими расчётами исследованы структурные и электронные свойства кластеров состава (ZnO)_n (n = 10÷35). Вычисления выполнены в программах Gaussian 09 и HyperChem с использованием полуэмпирического метода (PM3), неаб-иницио (Ab initio) и DFT. Геометрия кластеров оптимизирована в рамках теории функционала плотности (TDDFT) с применением гибридного функционала B3LYP и базисного набора LANL2DZ, после чего проведена оценка их физико-химических параметров. Для анализа молекулярных орбиталей использован метод линейной комбинации атомных орбиталей (LCAO). Рассчитаны длины связей, валентные углы и энергии связей различных геометрических структур кластеров по Z-матрице (табл. 1).

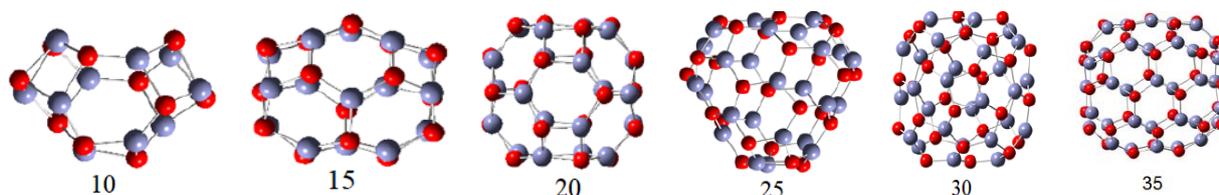


Рисунок 1. Оптимизированные структуры кластеров (ZnO)_n (n = 10÷35)

Анализ таблицы показывает, что с увеличением числа атомов в кластере средняя длина связей Zn–O постепенно возрастает. Результаты квантово-химических расчетов свидетельствуют о том, что наиболее стабильным является однослойный изомер $(\text{ZnO})_{10}$ с пустотелой тетрагональной структурой, в котором средняя длина связи Zn–O составляет $1,85 \pm 0,04 \text{ \AA}$, а средняя энергия связи — $123,43 \text{ ккал/моль}$. При увеличении числа атомов от $n = 10$ до $n = 35$ энергия связи Zn–O возрастает от $123,43$ до $177,27 \text{ ккал/моль}$, что указывает на повышение стабильности кластеров. Кроме того, в кластерах $(\text{ZnO})_n$ ($n = 10 \div 35$) установлено, что валентный угол O–Zn–O увеличивается от $104,51^\circ$ до $107,48^\circ$, сохраняя при этом характер sp^3 -гибридизации.

Таблица 1.

Значения различных физических величин в кластерах $(\text{ZnO})_n$ ($n = 10 \div 35$), полученные по результатам расчётов в рамках метода B3LYP

№	Длина связей Zn–O, Å	Валентный угол O–Zn–O, $^\circ$	Валентный угол Zn–O–Zn, $^\circ$	Энергия связи Zn–O, ккал/моль
10	$1,85 \pm 0,04$	$104,51 \pm 0,02$	$116,32 \pm 0,01$	123,43
15	$1,88 \pm 0,01$	$105,02 \pm 0,01$	$117,56 \pm 0,07$	135,17
20	$1,90 \pm 0,01$	$105,53 \pm 0,08$	$118,15 \pm 0,07$	166,54
25	$1,92 \pm 0,05$	$106,12 \pm 0,04$	$118,46 \pm 0,04$	168,8
30	$1,94 \pm 0,02$	$106,34 \pm 0,04$	$118,91 \pm 0,01$	169,49
35	$1,96 \pm 0,05$	$107,48 \pm 0,01$	$119,24 \pm 0,01$	177,27

Поверхностный анализ кластеров $(\text{ZnO})_n$. Поверхностная энергия и межатомные взаимодействия на поверхности кластеров были изучены с использованием 3D-топографического анализа по Хиршфельду (см. рисунок 2). Анализ Хиршфельд-поверхности проводился с применением программного обеспечения *Crystal Explorer 17.5*. Данный метод является одним из наиболее эффективных теоретических подходов для изучения нанокластеров ZnO и предоставляет информацию о реакционной способности поверхности, типах взаимодействий и структурных особенностях, что имеет важное значение для их применения в оптоэлектронике, катализе и разработке новых материалов [80]. 3D-визуализации по Хиршфельду для кластеров с $n = 10$ и $n = 35$ приведены на рисунке 2.

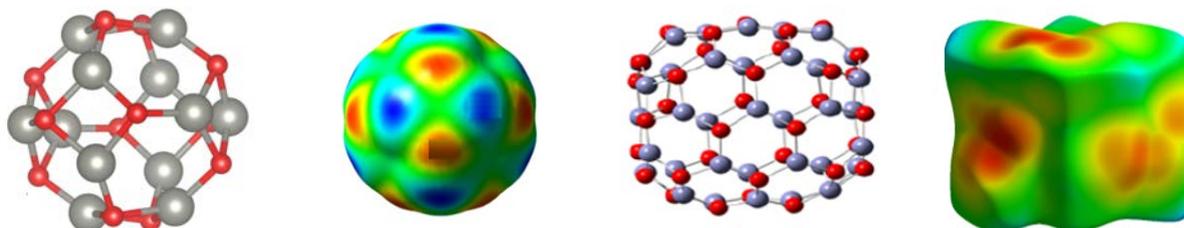


Рисунок 2. 3D-изображения поверхностей Хиршфельда кластеров $(\text{ZnO})_{10}$ (a) и $(\text{ZnO})_{35}$ (b)

Результаты цветового картирования на рисунке демонстрируют, что на поверхности кластера $(\text{ZnO})_{10}$ электронная плотность сильно локализована: красные области на 3D-изображении соответствуют зонам с высокой

электронной плотностью и низким потенциальным уровнем, тогда как синезелёные участки указывают на области с низкой электронной плотностью или высоким потенциалом. Красные зоны свидетельствуют о наличии сильных электростатических взаимодействий между атомами Zn и O. Такая плотность повышает поверхностную реакционную способность малых кластеров, поскольку на их поверхности имеется больше открытых атомов. В случае кластера $(\text{ZnO})_{35}$, по данным анализа Хиршфельда, наблюдается увеличение доли зелёных областей, что указывает на делокализацию электронной плотности и её перераспределение во внутренние слои. В результате у крупных кластеров снижается поверхностная активность, но возрастает стабильность.

Топографическая 3D-карта поверхности Хиршфельда и соответствующие ей 2D-отпечатки пальцев были получены на основе входных файлов в формате CIF, что позволило определить долю межмолекулярных взаимодействий, вносящих вклад в устойчивость супрамолекулярной системы [157]. В кристаллической среде границей области, занятой молекулой или атомом, считается поверхность Хиршфельда. Для каждой точки определяются два расстояния: d_i — расстояние до ближайшего ядра внутри поверхности и d_e — расстояние до ближайшего атома вне поверхности. Эти параметры суммируются в виде нормализованного контактного расстояния (d_{norm}), рассчитываемого на основе радиусов Ван-дер-Ваальса.

На основе значений d_{norm} была проведена количественная оценка доли межатомных взаимодействий Zn–O–Zn и O–Zn–O в кластерах $(\text{ZnO})_n$ ($n=10\div 35$) с использованием двухмерных «отпечатков пальцев». Согласно данным, представленным на рисунке 3, анализ RDG (reduced density gradient) позволил выявить наличие водородных связей и других сильных нековалентных взаимодействий. Следует отметить, что в кластерах ZnO прямые взаимодействия между атомами Zn и O не имеют характера ван-дер-ваальсовых сил, так как данные связи преимущественно обладают ковалентно-ионным характером.

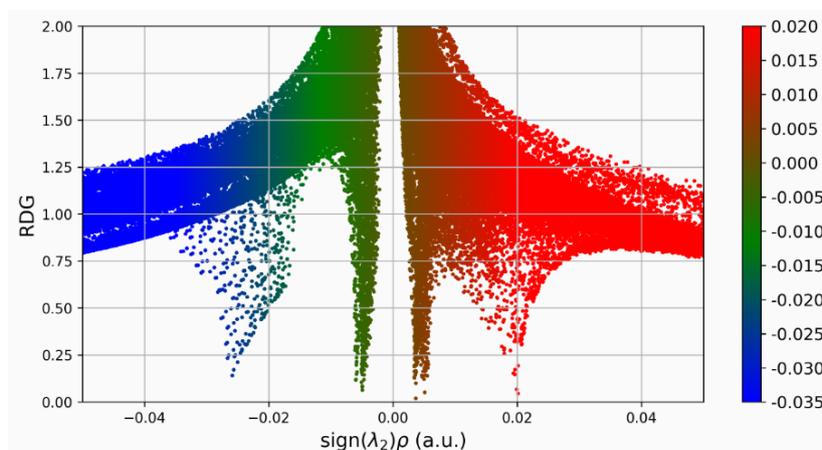


Рис. 3. Доля нековалентных взаимодействий в кластерах $(\text{ZnO})_n$ ($n=10\div 35$)

Таким образом, результаты анализа RDG показывают, что синие области на графиках соответствуют ионным взаимодействиям между атомами Zn и O,

доля которых в системе составляет от **27,8% до 50,6%** всех нековалентных взаимодействий. Зелёные участки относятся к стабильным и полярным ковалентным компонентам связей Zn–O, их вклад составляет **15,3%–25,6%**. Красные области отображают уплотнённые или пространственно неблагоприятные зоны Zn–O взаимодействий, соответствующие насыщенным частям связей. Эти результаты полностью согласуются с анализом двухмерных отпечатков Хиршфельда. По расчётам, энергия связи между атомами Zn...O, полученная по методу RDG, составила **5,538 кДж/моль**.

Электронная природа кластеров (ZnO)_n. Согласно результатам исследования, для кластеров ZnO и супрамолекулярных систем, стабилизированных сапонидами, были построены карты функции локализации электронов (ELF) и индекса локализованных орбиталей (LOL), что позволило проанализировать распределение электронных облаков. Установлено, что по мере уменьшения энергетического зазора HOMO–LUMO увеличивается способность кластеров к принятию электронов и возрастает электрофильный индекс, что указывает на высокую реакционную активность крупных кластеров, таких как (ZnO)₃₀ и (ZnO)₃₅. При увеличении числа атомов перераспределяется зарядовая плотность в молекуле, вследствие чего наблюдается рост химической активности кластеров.

Кроме того, был определён запрещённый энергетический зазор ($E_{\text{HOMO}} - E_{\text{LUMO}}$): например, для кластера (ZnO)₁₀ значения составляют $E_{\text{HOMO}} = -0,30389$ хатри и $E_{\text{LUMO}} = -0,12819$ хатри, что указывает на возможность перехода электронов с орбиталей HOMO на LUMO, подтверждаемую в спектре поглощения UV–Vis.

На рисунке 4 приведены значения энергий орбиталей HOMO и LUMO для кластеров (ZnO)_n при $n = 10 \div 35$.

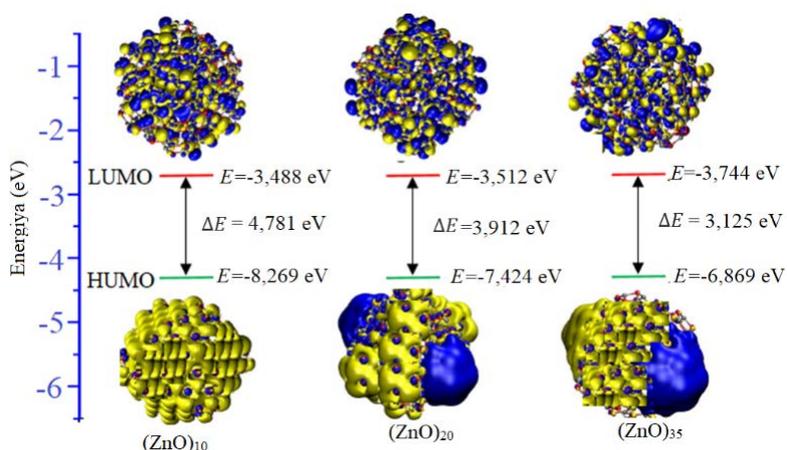


Рис. 4. Значения молекулярных орбиталей LUMO и HOMO для кластеров (ZnO)_n

Результаты анализа показали, что с увеличением числа атомов в кластерах (ZnO)_n ($n = 10 \div 35$) разница энергий HOMO–LUMO, то есть ширина запрещённой зоны, уменьшается: если для кластера с $n = 10$ она составляет 4,78 эВ, то для кластера с $n = 35$ — уже 3,12 эВ. Данное изменение связано с вкладом 3d-орбиталей атомов Zn и 2p-орбиталей атомов O. Наряду с этим

установлено, что энергия в зоне проводимости увеличивается от 3,256 эВ до 4,158 эВ за счёт участия 4s-орбиталей атомов Zn, а также 2s и 2p-орбиталей атомов O.

На основе характеристик орбиталей НОМО и LUMO были рассчитаны значения химической стабильности, электрофильного индекса и химического потенциала кластеров (см. Таблицу 2).

Таблица 2.

Химический потенциал (μ), стабильность (η) и электрофильный индекс (ω) кластеров $(\text{ZnO})_n$

$(\text{ZnO})_n$	μ (eV)	η (eV)	ω (eV)
10	4,5	2,0	5,06
15	4,5	1,8	5,63
20	4,5	1,5	6,75
25	4,5	1,3	7,79
30	4,5	1,1	9,20
35	4,5	1,0	10,13

Согласно анализу данных Таблицы 2, химический потенциал (μ) всех кластеров $(\text{ZnO})_n$ составляет 4,5 эВ, что указывает на отсутствие разницы потенциалов между кластерами. Индекс стабильности (η) уменьшается с увеличением размера кластера (для $n = 10$ — 2,0 эВ, для $n = 35$ — 1,0 эВ), что свидетельствует о снижении стабильности более крупных кластеров. Электрофильный индекс (ω), наоборот, увеличивается с ростом n , указывая на более высокую электрофильную способность крупных кластеров (для $n = 10$ — 5,06 эВ, для $n = 35$ — 10,13 эВ).

В целом, в исследовании были проанализированы геометрические параметры кластеров $(\text{ZnO})_n$, длины связей, углы связи, полная энергия и показатели стабильности, и установлено, что с увеличением размера кластеров стабильность снижается, а энергетические параметры изменяются в определённой тенденции. Также были рассчитаны электронные свойства, такие как разность энергий НОМО–LUMO, электрофильность и потенциал ионизации, и показано, как при увеличении числа молекул ZnO в кластере изменяются плотность электронов и энергетические уровни. Полученные результаты создают важную научную основу для обоснования перспектив применения кластеров ZnO в области фотокатализа и оптоэлектроники.

Глава диссертации под названием «**Оптимизация условий синтеза и фотокаталитической активности наночастиц ZnO**» посвящена разработке оптимальных параметров синтеза наночастиц ZnO в присутствии сапонинов и флавоноидов, их легированию ионами Fe^{3+} для улучшения оптических и фотокаталитических свойств, а также оценке эффективности полученных наноматериалов в фотокаталитических процессах.

Оптимизация условий синтеза наночастиц ZnO. В исследовании применены методы золь-гель и химического осаждения, при этом стабилизация частиц осуществлялась с помощью сапонинов (рис. 5) и флавоноидов (рис. 6). Эти природные поверхностно-активные вещества

образуют комплексы с ионами Zn^{2+} , уменьшая агрегацию и способствуя формированию стабильных и мелкодисперсных частиц. Оптимальными условиями синтеза определены: pH = 9–11, температура = 60–90 °С, время реакции = 2–5 ч, концентрации реагентов Zn^{2+} = 0,05–0,1 М и сапонины/флавоноида = 0,01–0,03 М. При таких параметрах полученные наночастицы ZnO характеризуются высокой дисперсностью, однородностью и повышенной фотокаталитической активностью.

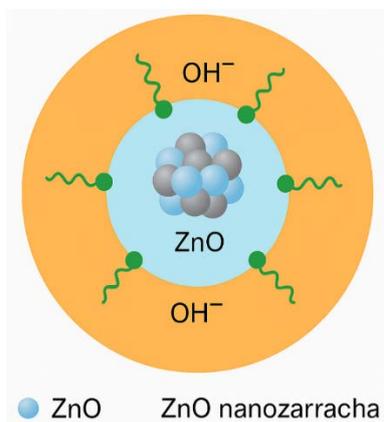


Рис. 5. ZnO, синтезированный в присутствии сапонины

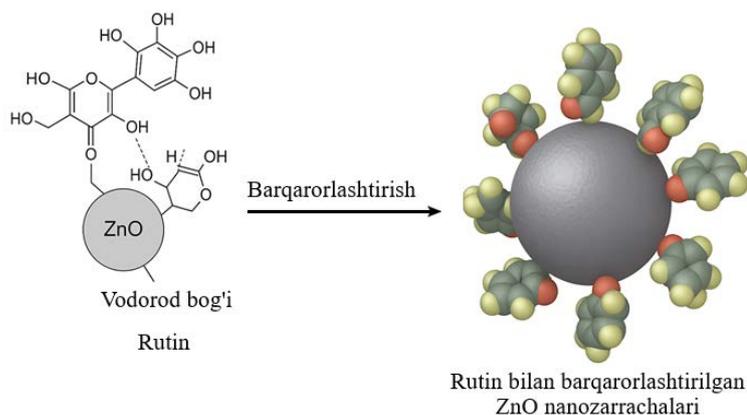


Рис. 6. ZnO, стабилизированный рутином

Регрессионный анализ зависимости размера частиц ZnO от концентрации ионов Zn^{2+} , pH и температуры. На основе полученных экспериментальных данных (таблица 5,1) была построена регрессионная модель зависимости размера наночастиц ZnO (d_{ZnO} , нм) от концентрации ионов цинка ($C_{Zn^{2+}}$, М), pH и температуры (t , °С):

$$d_{ZnO, \text{ нм}} = f(C_{Zn^{2+}}, pH, t).$$

Таблица 5.1.

Зависимость размера наночастиц ZnO от концентрации ионов Zn^{2+} (М), pH и температуры (°С)

№	Zn^{2+} , М	pH	t (°С)	d_{ZnO} , нм
1	0,0001	9	60	24
2	0,0001	10	70	22
3	0,0001	11	80	21
4	0,0003	9	65	23
5	0,0003	10	75	21
6	0,0003	11	85	20
7	0,0005	9	70	22
8	0,0005	10	80	20
9	0,0005	11	90	19
10	0,0007	9	75	21
11	0,0007	10	85	19
12	0,0007	11	90	18
13	0,0010	9	75	20
14	0,0010	10	85	18
15	0,0010	11	90	17

В результате регрессионного анализа зависимости размера наночастиц ZnO от концентрации ионов Zn^{2+} , pH и температуры было получено следующее уравнение регрессии:

$$d_{ZnO, \text{ нм}} = 40,46 - 4326,58 \cdot C_{Zn^{2+}} - 1,71 \cdot \text{pH} + 0,01 \cdot t.$$

Согласно результатам регрессионного анализа, построенная модель обладает высокой степенью адекватности: коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,973$, что означает, что модель объясняет 97,3 % полученных данных. Наиболее значимым фактором является концентрация Zn^{2+} : при её увеличении на 0,0001 М средний размер частиц уменьшается примерно на 0,43 нм ($P < 0,001$). Параметр pH также оказывает сильное влияние — при его увеличении на одну единицу размер частиц снижается примерно на 1.71 нм ($P < 0,001$). Влияние температуры оказалось статистически незначимым ($P = 0,544$), следовательно, её воздействие в сравнении с другими параметрами невелико. Свободный член уравнения равен 40,46, что соответствует теоретическому размеру частиц ~40 нм при нулевых значениях концентрации Zn^{2+} и pH. Таким образом, модель ясно показывает, что размер частиц ZnO в основном зависит от концентрации ионов Zn^{2+} и pH.

Результаты анализа подтверждают высокую точность модели ($R^2 = 0,944$). По данным ANOVA, наибольшее влияние на размер частиц оказывают концентрация Zn^{2+} и pH, в то время как эффект температуры значительно слабее. Увеличение Zn^{2+} и pH приводит к уменьшению размера частиц, а рост температуры — к его незначительному увеличению. Оптимальными условиями синтеза признаны: $Zn^{2+} = 0,001$ М, pH = 9–10 и $T = 25\text{--}60$ °С, при которых формируются мелкие (8–20 нм), стабильные наночастицы ZnO с высокой фотокаталитической активностью.

В последующей части рассматривается процесс легирования наночастиц ZnO ионами Fe^{3+} и его результаты. Введение Fe^{3+} в кристаллическую решётку ZnO вызывает образование кислородных вакансий, сужение запрещённой зоны и замедление рекомбинации электрон–дырочных пар, что повышает фотокаталитическую активность. В качестве допанта использовался $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ в количестве 0,5–3 мол %, частично замещая ионы Zn^{2+} . После прокаливания при 400–500 °С кристаллическая структура укрепляется. Допированные образцы изменяли цвет от белого до светло-коричневого, что подтверждает внедрение ионов Fe^{3+} (рис. 7). Анализ DLS, TEM и SEM показал увеличение среднего размера частиц до 30–40 нм. Применение золь-гель и химического осаждения с участием сапонинов и флавоноидов обеспечило однородность частиц, высокий уровень кристалличности и экологическую безопасность синтеза. В целом, легирование Fe^{3+} улучшает фотокаталитические, оптические и электронные свойства ZnO, делая его перспективным материалом для систем экологической очистки, сенсорных и энергетических технологий.

Физико-химический анализ наночастиц ZnO и наночастиц ZnO, допированных ионами Fe^{3+} . Наночастицы ZnO, легированные ионами Fe^{3+} , по сравнению с чистым ZnO обладают расширенными физико-химическими свойствами, что позволяет детально оценить их структурные, поверхностные,

морфологические и оптические параметры. В данном разделе рассматриваются степень кристалличности, размер частиц, морфология, удельная поверхность, функциональные группы и оптические характеристики легированных наноматериалов.

По результатам рентген флуоресцентного анализа (XRF) синтезированные наночастицы ZnO отличаются высокой чистотой — в составе обнаружены только цинк и кислород. В спектре зафиксирован основной пик Zn–K α при 8,6 кэВ, посторонние примеси отсутствуют, что подтверждает эффективность синтеза и высокую чистоту образцов. В легированных образцах ZnO, кроме пиков Zn–K α , наблюдаются также пики Fe–K α , что указывает на внедрение ионов Fe³⁺ в узлы решётки Zn²⁺ и их равномерное распределение в структуре.

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа (XRD), чистые наночастицы ZnO имеют гексагональную вюрцитную фазу (wurtzite), с характерными дифракционными пиками при $2\theta \approx 31,7^\circ, 34,4^\circ, 36,2^\circ, 47,5^\circ, 56,6^\circ, 62,8^\circ$ и $67,9^\circ$ (рис. 8).

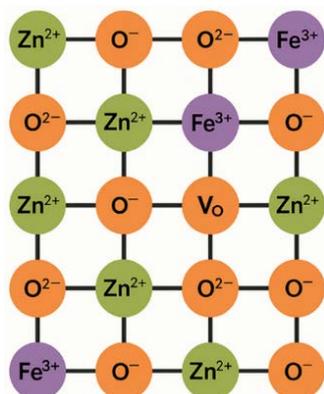


Рис. 7. Кристаллы ZnO, легированные ионами Fe³⁺

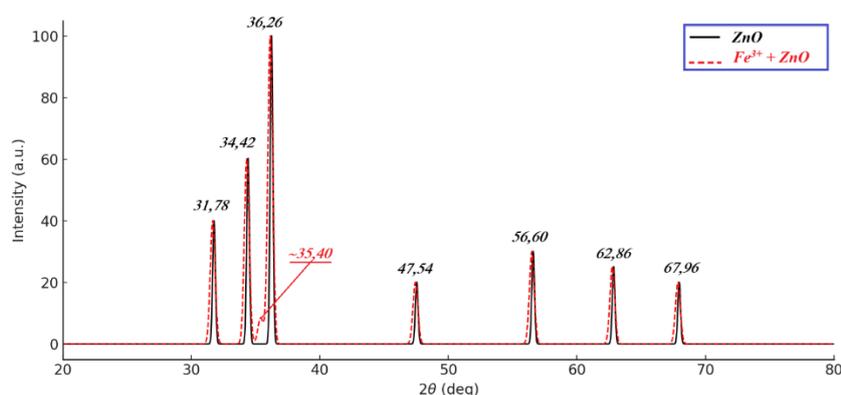


Рис. 8. Дифрактограммы наночастиц ZnO и наночастиц ZnO допированных ионами Fe³⁺

Изучены спектры поглощения наночастиц ZnO и наночастиц ZnO допированных ионами Fe³⁺. Согласно результатам УФ–видимого спектрального анализа (рис. 9), для чистых наночастиц ZnO максимум поглощения наблюдается при ≈ 370 нм, что соответствует широкой запрещённой зоне полупроводника ($E_g \approx 3,3$ эВ). При легировании ионами Fe³⁺ максимум смещается в область 410–430 нм, что свидетельствует об увеличении активности в видимой области спектра.

Это смещение связано с замещением ионов Zn²⁺ ионами Fe³⁺, в результате чего в решётке образуются кислородные вакансии и дополнительные энергетические уровни, повышающие фотокаталитическую активность материала.

ИК-спектроскопия (FTIR) подтверждает эти изменения: полоса колебаний, соответствующая связи Zn–O ($694\text{--}702$ см⁻¹), в легированных образцах смещается в область $670\text{--}690$ см⁻¹ и расширяется; при $560\text{--}590$ см⁻¹

появляются новые пики, соответствующие колебаниям Fe–O. Колебания в области 854–880 см⁻¹, характерные для решётки ZnO, сохраняются, а около 1420 см⁻¹ наблюдаются полосы, относящиеся к карбонатным группам. Таким образом, внедрение Fe³⁺ в кристаллическую решётку ZnO усиливает образование дефектов и кислородных вакансий, что вызывает смещение области поглощения в видимую часть спектра и улучшает фотокаталитические свойства наноматериала.

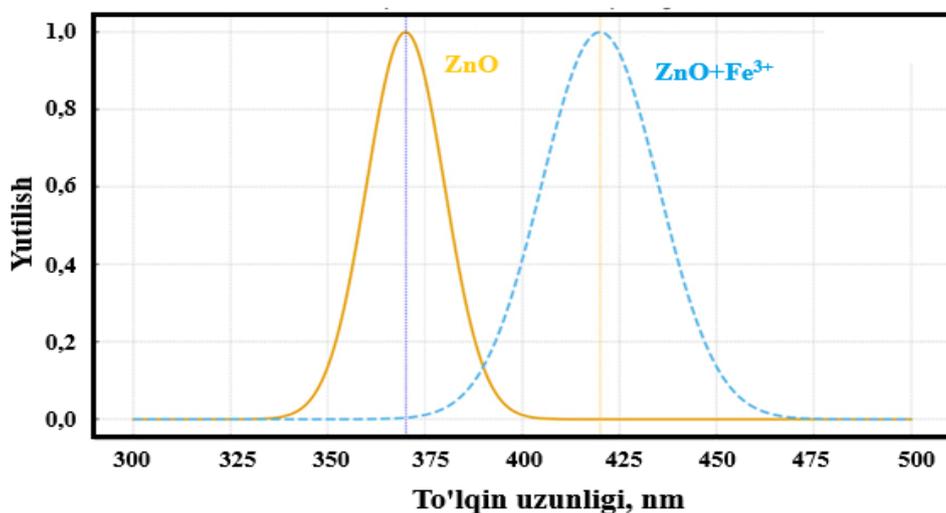


Рис. 9. УФ–видимые спектры наночастиц ZnO легированных ионами Fe³⁺

Результаты ВЕТ-анализа показали, что как ZnO, так и ZnO легированные Fe³⁺, характеризуются изотермой IV типа с петлёй гистерезиса, что указывает на мезопористую структуру. В легированных образцах увеличены удельная поверхность (30–100 м²/г) и общий объём пор (0,15–0,35 см³/г), что связано с ростом числа дефектов и кислородных вакансий. Средний диаметр пор уменьшился до 3–5 нм. При 30 °С наблюдалась высокая адсорбционная ёмкость (3,2–3,5 моль/кг), которая несколько снижалась при 80 °С. Сужение петли гистерезиса указывает на облегчённую десорбцию. В целом, легированные Fe³⁺ наночастицы ZnO обладают повышенной поверхностной активностью и эффективными адсорбционными свойствами, что делает их перспективными для фотокатализа и очистки воздуха.

Результаты AFM-анализа показали, что плёнка ZnO состоит из плотно упакованных наночастиц с выраженной шероховатостью поверхности и развитой наноструктурой. 2D- и 3D-изображения, обработанные в программе FimtoScan, продемонстрировали наличие рельефа с чередованием высоких и низких пиков, что указывает на увеличение площади поверхности и числа адсорбционных центров. Высота пиков достигает ~100 нм, что способствует рассеянию света и повышает фотокаталитическую эффективность.

По данным DLS-анализа, чистые наночастицы ZnO имеют узкое, мономодальное распределение (20–40 нм), тогда как при легировании Fe³⁺ наблюдается бимодальное или мультимодальное распределение (30–50 нм и

100–150 нм). Это связано с внедрением ионов Fe^{3+} в решётку, ростом дефектов и кислородных вакансий. При оптимальной концентрации допанта частицы сохраняют стабильную дисперсию, а при избытке Fe^{3+} усиливается агрегация. Таким образом, легированные ZnO характеризуются более крупными частицами, более широким распределением и высокой поверхностной активностью, что повышает их фотокаталитическую и адсорбционную эффективность.

Оценка фотокаталитической активности наночастиц ZnO. Фотокаталитическая активность наночастиц ZnO определяется их способностью разлагать органические загрязнители (например, метиловый оранжевый, метиловый красный или фенол) под воздействием излучения. Анализ проводился методом УФ–видимой спектрофотометрии, при этом эффективность реакции оценивалась по уменьшению интенсивности пиков поглощения во времени.

Экспериментальная процедура: В раствор метилового оранжевого с концентрацией 10–50 мг/л добавлялся фотокатализатор ZnO, после чего система подвергалась облучению ультрафиолетом с длиной волны 365 нм. Спектры регистрировались через 30, 60, 90 и 120 минут. Постепенное снижение интенсивности пика поглощения при 450–460 нм указывало на протекание процесса фотодеградации органического красителя.

Зависимость между концентрацией и оптической плотностью подчинялась закону Бугера–Ламберта–Бера, что позволило количественно описать процесс фотодеградации.

Для оценки изменения концентрации во времени использовалось кинетическое уравнение реакции первого порядка:

$$\ln(C_0/C_t) = kt,$$

Где C_0 - начальная концентрация, C_t - концентрация в определённый момент времени, k - константа скорости реакции, t - время облучения.

Окончательная эффективность реакции (η) рассчитывалась по следующей формуле:

$$\eta = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \cdot 100\%.$$

Результаты подтвердили, что наночастицы ZnO способны почти полностью разлагать метиловый оранжевый в течение 120 минут.

Факторы, влияющие на фотокаталитическую эффективность: рН: оптимальный диапазон 5–7, при котором поверхность ZnO способствует усиленному образованию гидроксильных радикалов. Размер частиц: максимальная активность наблюдается при размере 20–30 нм; при увеличении размера (свыше 50 нм) эффективность снижается из-за агломерации.

Время облучения: оптимальное — 60–90 минут; при дальнейшем увеличении времени скорость реакции уменьшается вследствие усиления процессов рекомбинации.

Влияние стабилизаторов: сапонины и цитраты повышают гидрофильность поверхности ZnO и усиливают адсорбцию; флавоноиды

замедляют рекомбинацию электрон–дырочных пар. Наивысшая эффективность зафиксирована для ZnO, стабилизированного сапонидами.

Таким образом, фотокаталитическая активность наночастиц ZnO тесно связана с их размером, структурой поверхности, pH и временем облучения. Частицы размером 20–30 нм проявляют максимальную активность благодаря большой удельной поверхности и низкой вероятности рекомбинации. Полученные данные полностью согласуются с литературными источниками [Liu et al., 2015; Zhang et al., 2017; Ranjit et al., 2019]. Установлено, что наночастицы ZnO являются перспективными фотокатализаторами для экологической очистки, сенсорных и солнечных систем.

В данном исследовании была изучена фотокаталитическая активность наночастиц ZnO размером 20–50 нм в процессах разложения органических загрязнителей, таких как метиловый оранжевый, фенол, метиловый красный и родамин В. Фотокаталитические реакции проводились при комнатной температуре (25 ± 2 °С) в кварцевых кюветах под воздействием УФ- и видимого света. Характерные максимумы поглощения наблюдались при 270 нм для фенола, при 365 нм для метилового красного и метилового оранжевого, а также при 554 нм для родамина В.

Для оценки фотокаталитической активности строились графики зависимости концентрации реагента от времени, отражающие скорость разложения органического вещества и служащие основным критерием эффективности фотокатализатора. Изменение концентрации загрязнителей во времени представлено на рис. 10.

На основе полученных данных были рассчитаны константы скорости реакции (k) и периоды полураспада ($t_{1/2}$).

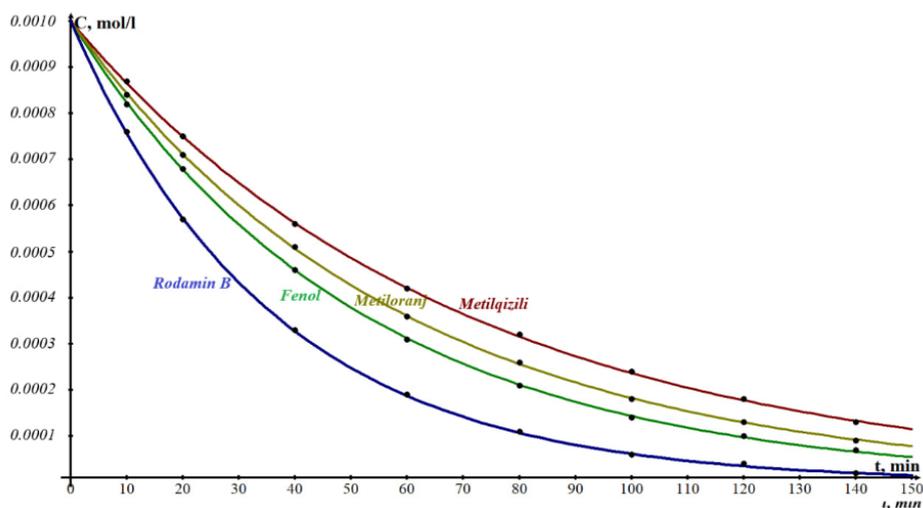


Рис. 10. Изменение концентрации органических загрязнителей во времени

Для обеспечения воспроизводимости данных все эксперименты проводились в трёх повторностях. На основе полученных данных для каждого загрязнителя были определены кинетические параметры фотокаталитической

деградации, включая константу скорости реакции (k) и период полураспада ($t_{1/2}$). Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Кинетические характеристики фотокаталитической деградации органических загрязнителей с использованием ZnO

Загрязнитель	λ , нм	k , мин ⁻¹	$t_{1/2}$, мин
Фенол	270	0,0194	35,7
Метиловый красный	365	0,0144	48,1
Метилоранж	365	0,0170	40,7
Родамин В	554	0,0279	24,8

Согласно данным таблицы 5, фотокаталитическая эффективность разложения органических загрязнителей в присутствии ZnO различается. Наибольшая скорость деградации наблюдалась для родамина В ($k = 0,0279$ мин⁻¹, $t_{1/2} = 24,8$ мин), что связано с высокой реакционной способностью его молекул по отношению к активным радикалам, образующимся на поверхности ZnO под действием ультрафиолетового излучения.

Фенол ($k = 0,0194$ мин⁻¹, $t_{1/2} = 35,7$ мин) и метиловый оранжевый ($k = 0,0170$ мин⁻¹, $t_{1/2} = 40,7$ мин) также показали хорошую степень разложения, однако менее выраженную, чем у родамина В. Метиловый красный характеризовался наименьшей скоростью деградации ($k = 0,0144$ мин⁻¹, $t_{1/2} = 48,1$ мин), что указывает на его низкую фоточувствительность.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что наночастицы ZnO являются эффективным фотокатализатором при разложении таких органических загрязнителей, как фенол, метиловый красный, метиловый оранжевый и родамин В.

Очистка сточных вод от красителей с использованием наночастиц ZnO. Адсорбционно-фотокаталитическая технология очистки сточных вод с применением ZnO была внедрена на совместном узбекско-китайском предприятии ООО “АНМАД ISROIL TEX” (справка № 28/10-01 от 28 октября 2024 г.). В результате установлено, что наночастицы ZnO обладают более высокой эффективностью адсорбции красителей по сравнению с активированным углём. Очищенная вода соответствовала экологическим стандартам и была признана пригодной для повторного использования в производственном цикле.

Таким образом, в работе рассмотрен вопрос выбора оптимального поверхностно-активного вещества для стабилизации наночастиц; экспериментально обоснована эффективность сапонинов как биосурфактанта. Исследовано влияние концентрации ионов Zn^{2+} , pH среды и температуры синтеза на размер частиц; взаимосвязь этих факторов смоделирована методом регрессионного анализа, что позволило определить оптимальные условия синтеза. Фотокаталитическая активность наночастиц ZnO изучена в реакциях разложения различных органических загрязнителей (метиловый оранжевый, родамин В и др.) под воздействием УФ-излучения, определены показатели

эффективности. Полученные результаты формируют научные основы управления фотокаталитическими свойствами ZnO путём целенаправленного контроля параметров частиц.

ВЫВОДЫ

По диссертационной работе на тему: «Синтез наноматериалов ZnO с использованием сапонинов и флавоноидов в качестве поверхностно-активных веществ и их физико-химические свойства».

1. Расчеты показали, что с увеличением размера кластеров $(\text{ZnO})_n$ увеличивается длина связи Zn–O, уменьшается энергетический зазор между НОМО и LUMO, а индекс электрофильности возрастает, что свидетельствует о повышенной способности более крупных кластеров поглощать свет и участвовать в фотокаталитических процессах.

2. Несмотря на снижение устойчивости кластеров (η) при увеличении числа атомов, их способность поглощать и перерабатывать световую энергию возрастает, что делает крупные кластеры перспективными для применения в энергетике, оптоэлектронике и наноматериаловедении.

3. Наночастицы ZnO, синтезированные в присутствии сапонинов и флавоноидов, отличались небольшими размерами (10–30 нм), сферической морфологией, высокой дисперсностью, способностью предотвращать агрегацию, контролировать кристаллизацию и увеличивать фотокаталитическую активность до 30÷50 %.

4. Концентрация ионов Zn^{2+} , pH среды и температура синтеза определены как ключевые параметры, влияющие на размер наночастиц ZnO. Построенная регрессионная модель ($R^2 = 0,954$) подтвердила высокую адекватность и позволила определить оптимальные условия получения устойчивых наночастиц (~8÷25 нм) при $C_{\text{Zn}^{2+}} = 0,001 \text{ M}$, pH = 8 и температуре 25 °C.

5. Установлено, что стабилизированные сапонинами и легированные ионами Fe^{3+} наночастицы ZnO эффективно разлагают органические красители (родамин В, метиловый красный) под действием УФ-излучения и могут рассматриваться как перспективная, экологически безопасная и экономически выгодная технология для очистки сточных вод.

6. Технологии адсорбционной и фотокаталитической очистки сточных вод с использованием ZnO-наночастиц внедрены на производстве в совместном предприятии «АНМАД ISROIL TEX» (Узбекистан–Китай).

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
PhD.03/30.12.2019.K.02.05 AT SAMARKAND STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV**

SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SH. RASHIDOV

USMONOVA KHILOLA ISROPILOVNA

**SYNTHESIS OF ZnO NANOMATERIALS USING SAPONINS AND
FLAVONOIDS AS SURFACTANTS AND THEIR PHYSICOCHEMICAL
PROPERTIES**

02.00.04 – Physical chemistry

**DISSERTATION ABSTRACT
OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) IN CHEMICAL SCIENCES**

Samarkand – 2025

The theme of dissertation for doctor of philosophy (PhD) has been registered in the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2.PhD/K769.

The dissertation research has been carried out at the Samarkand state university named after Sh.Rashidov.

The abstract of the dissertation in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is available online at www.samdu.uz Scientific Council and on website of «ZiyoNet» information-education portal (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: Mukhamadiev Nurali Kurbanalievich
Doctor of Chemical sciences, professor

Official opponents: Eshmamatova Nodira Bahramovna
Doctor of Chemical sciences, Associate professor

Murodova Dilafruz Khadirovna
PhD, Associate professor

Leading organization: Institute of General and Inorganic Chemistry of the
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

The defense of the dissertation will take place on «03» december 2025 at «10⁰⁰» o'clock at the meeting of the Scientific Council awarding scientific degrees PhD.03/30.12.2019.K.02.05 at Samarkand state university (address: 140104, Samarkand city, university Blvd., 15, Institute of Biochemistry, Building of the Chemistry department, room 220.Ph: (99866) 239-11-40, fax; (99866) 239-11-40. e-mail: devonxona@samdu.uz).

The dissertation has been registered at the Information resource centre of Samarkand state university № 98. Address; 140104, Samarkand city, university Blvd., 15, IRC, Ph.: (99866) 239-11-51.

The abstract of the dissertation has been distributed on «01» december 2025 y. Protocol at the register № 7 dated «02» december 2025 y.



A.M. Nasimov
Chairman of the Scientific Council awarding scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

J.R. Uzokov
Scientific Secretary of the Scientific Council awarding scientific degrees, PhD

O.N. Ruzimuradov
Chairman of the Scientific Seminar under Scientific Council awarding scientific degrees, doctor of chemical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract of the PhD dissertation)

The purpose of the research is to synthesize ZnO nanomaterials using saponins and flavonoids as surface-active agents and to determine their physicochemical properties.

The object of the research includes: zinc acetate, zinc nitrate, zinc chloride, tetraethoxysilane, ethanol, saponins and flavonoids extracted from the *Etmak* plant, as well as organic solvents.

The scientific novelty of the research lies in the following:

A method for the synthesis of ZnO nanomaterials using saponins as surface-active agents and flavonoids as stabilizers has been developed and optimized.

The structure and electronic properties of $(\text{ZnO})_n$ nanoclusters were evaluated using quantum-chemical methods, and it was found that an increase in the number of molecules in the cluster leads to a reduction in the band gap width.

The surface morphology, sorption isotherm, and photocatalytic characteristics of ZnO nanomaterials were analyzed, and it was demonstrated that doping with Fe^{3+} ions causes a shift of the absorption region into the visible range of the spectrum.

It was shown that the degree of degradation in photocatalytic reactions involving ZnO nanomaterials reaches 91.5%.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on the synthesis of ZnO nanomaterials using saponins and flavonoids as surface-active agents and on the determination of their physicochemical properties:

The adsorptive purification technology using ZnO has been implemented in practice at the Uzbek-Chinese Joint Venture LLC “AHMAD ISROIL TEX” (Certificate No. 28/10-01 dated October 28, 2024). As a result, it was established that the efficiency of dye adsorption using ZnO nanoparticles is significantly higher compared to activated carbon, and the quality of the purified water meets environmental standards.

The technology of using ZnO as a photocatalyst has also been introduced into the production practice of the Uzbek-Chinese Joint Venture LLC “AHMAD ISROIL TEX” (Certificate No. 28/10-01 dated October 28, 2024). It has been shown that the use of ZnO nanoparticles enables a photocatalytic degradation efficiency of synthetic dyes of about 90%, confirming the high potential of these materials for environmentally friendly wastewater treatment technologies.

Structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total length of the dissertation is 119 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1. Khilola Usmonova, Javlon Uzokov, Nurali Mukhamadiev, Nigina Fazlieva; Zol-Gel synthesis of ZnO/SiO₂ nanocomposite thin films // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2024. – V. 3244. – №. 1. – P. 050025-1-050025-6. <https://doi.org/10.1063/5.0242412> (Scopus).

2. Usmonova Kh.I., Uzokov J.R., Mukhamadiev N.K. Zol-Gel synthesis of thin films ZnO/SiO₂ nanocomposite //Central Asian Journal of Medical and Natural Science. – 2023. – V. 4. – №. 6. – P. 484-490 (Index Copernicus, 13).

3. Usmonova H., Uzokov J.R., Mukhamadiev N.Q., Mukhamadiev A.N. Study of structural and electronic properties of (ZnO) n (n= 10÷ 30) nanoclusters using quantum chemical methods //Central asian journal of medical and natural science. – 2022. – V. 3. – №. 6. – P. 428-434 (Index Copernicus, 13).

4. Usmonova H.I, Uzoqov J.R., Muxamadiyev A.N., Muxamadiyev N.Q. ZnO/SiO₂ nanokompozit yupqa plyonkalarning Zol-Gel sintezi // SamDU Ilmiy axborotnomasi (kimyo). – 2024. – T. 143. – N 1. – B. 123-128 (02.00.00, № 09)

5. Usmonova H.I, Uzoqov J.R., Muxamadiyev A.N., Muxamadiyev N.Q. ZnO/SiO₂ nanokompozit yupqa plyonkalarning Zol-Gel sintezi // SamDU Ilmiy axborotnomasi (kimyo). – 2024. – T. 143. – N 1. – B. 123-128 (02.00.00, № 09).

6. Усмонова Х.И., Узоков Ж.Р., Мухамадиев Н.К. Изучение фотокалитической активности ZnO относительно некоторых органических загрязнителей // SamDU Ilmiy axborotnomasi (kimyo). – 2024. – T. 143. – N 5. – B.87-91 (02.00.00, № 09).

II bo'lim (II часть; part II)

7. Usmonova Kh.I., Uzokov J.R., Mukhamadiev N.K., Mukhamadiev A.N. Synthesis of thin ZnO films using saponins as surfactants // XXII Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry, October 7–12, 2024, Federal Territory "Sirius", Russia. Book of abstracts in 7 volumes. - M.: Admiral Print, 2024. - V. 6. - 76 с.

8. Усмонова Х.И., Узоков Ж.Р., Мухамадиев Н.К., Мухамадиев А.Н. Синтез тонких пленок ZnO с использованием сапонинов в качестве ПАВ // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 7–12 октября 2024, Федеральная территория «Сириус», Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. - М.: Адмирал Принт, 2024. – Т. 6. - 80 с.

9. Усмонова Х.И., Узоков Ж.Р., Мухамадиев Н.К. Изучение фотокалитической активности ZnO относительно некоторых органических загрязнителей // Сборник материалов XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны» (16 октября 2024). – Душанбе, 2024. – С.175-178.

10. Usmonova H.I., Uzoqov J.R., Muxamadiyev N.Q. Zol-Gel texnologiyasi asosida ZnO sintezi va uning tekstur xarakteristikalarini // “Kimyoning rivojida

fundamental, amaliy tadqiqotlar va ularning istiqbollari” mavzusidagi Respublika ilmiy – amaliy anjumani materiallari (22-23 sentyabr).-Toshkent, 2022. – B.321.

11. Usmonova H.I., Uzokov J.R. (ZnO)_n (n=10÷30) nanoklasterlarini strukturaviy va elektron xossalarini kvant kimyoviy usullarda o‘rganish // International scientific forum "Women in Stem" (February 10 – 14, 2023). – Tashkent, 2023. – P. 88-89.

12. Usmonova H., Ro‘zimurodova M., Bibitova K., Uzoqov J. (ZnO)_n (n=3÷6) nanoklasterlarini strukturaviy va elektron xossalarini kvant kimyoviy usullarda o‘rganish // “Нодир ва ноёб металлар кимёси ва технологияси: бугунги ҳолати, муаммолари ва истиқболлари” мавзусидаги Республика илмий-амалий конференцияси материаллари (28-29 aprel, 2023). – Термиз, 2023. – Б. 219-220.

13. Usmonova H.I., Uzoqov J.R., Muxamadiyev N.Q. Saponinlar ishtirokida ZnO/SiO₂ nanokompozit plyonkasi sintezi // “Товарлар кимёси ҳамда халқ табобати муаммолари ва истиқболлари” мавзусидаги X халқаро илмий-амалий конференция материаллари (14-15 сентябрь, 2023). - Андижон, 2023. – Б.140-142.

14. Usmonova H.I., Uzoqov J.R., Muxamadiyev N.Q. Sirt faol modda sifatida saponinlarni qo‘llab, ZnO/SiO₂ yupqa plyonka olish // “Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari , muammolari va istiqbollari IV xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari. (2023 yil 16-17 ноябрь). – Navoiy, 2023. – B. 343-344.

15. Usmonova H., Raxmatullayeva N., Muxamadiyev N.Q. Sirt faol modda sifatida saponinlarni qo‘llab, ZnO/SiO₂ yupqa plyonka olish // “Fizikaviy va kolloid kimyo fanlarining fundamental va amaliy muammolari hamda ularning innovatsion yechimlari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – Namangan, 2024. – B. 420-422.

16. Usmonova H., Shakarova D., Xodjayorova G. ZnO plyonkalarini sintezi va ularning xarakteristikalarini // “Olima ayollar millat kelajagining tarbiyachisi” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari (2024-yil 13 fevral). – Toshkent, 2024. – B. 312-315.

17. Usmonova H.I., Ruziev I.X., Abduraimova Z., Muxamadiyev N.Q. Синтез и исследование характеристик нанопленки ZnO с использованием атомно-силового микроскопа // “Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari” mavzusidagi V-xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari (18-19 April, 2024). - Navoi, 2024. – B. 303-304.

18. Shakarova D., Raxmatullayeva N., Usmonova H.I., Uzokov J.R., Muxamadiyev N.Q. Saponinlar ishtirokida ZnO/SiO₂ nanokompozit sintezi sirt morfologiyasini o‘rganish // “Kimyo ta’limi, fan va ishlab chiqarish integratsiyalari” mavzusidagi I-xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari (2024-yil 22 may). - Qo‘qon, 2024. – B.281-282.

19. Usmonova X.I., Muxamadiyev N.Q. Muxamadiyev A.N. Metiloranjdan foydalanib rux oksidi nanozarrachalarini fotokatalitik xossalarini o‘rganish // “Товарлар кимйоси ҳамда халқ табобати муаммолари ва истиқболлари” мавзусидаги XI Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari (2024 yil 11-12 sentabr). - Andijon, 2024. – B.72-74.

Avtoreferat Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining
“Ilmiy axborotnoma” jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz
tillaridagi matnlari o‘zaro muvofiqlashtirildi (13.08.2025)

Bosmaxona tasdiqnomasi:



4268

2025-yil 15-noyabrda bosishga ruxsat etildi:
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60x84_{1/16}.
“Times New Roman” garniturasini. Ofset bosma usuli.
Hisob-nashriyot t.: 3,0. Shartli b.t. 2,4.
Adadi 100 nusxa. Buyurtma №17/11.

SamDCHTI tahrir-nashriyot bo‘limida chop etildi.
Manzil: 140117, Samarqand sh., Gagarin ko‘chasi, 43.