

O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc 03/30.12.2019. K.01.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH
ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH

O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

ESHTURSUNOV DAVRON ABDISAMATOVICH

POLIMERLAR SIRTIDA NANOO‘LCHAMDAGI METALL
ZARRACHALARINI HOSIL QILISH VA ULARNING XOSSALARI

02.00.06 – Yuqori molekulyar birikmalar

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

Toshkent-2025

**Kimyo fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati
mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации на соискание ученой степени
доктора философии (PhD) по химическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of Doctor of Philosophy (PhD) on
chemical sciences**

Eshtursunov Davron Abdisamatovich

Polimerlar sirtida nanoo‘lchamdagi metall zarrachalarini hosil qilish va ularning xossalari..... 5

Эштурсунов Даврон Абдисаматович

Формирование наноразмерных металлических частиц на поверхности полимеров и их свойства 21

Eshtursunov Davron Abdisamatovich

Formation of nanoscale metal particles on polymer surfaces and their properties 41

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 44

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc 03/30.12.2019. K.01.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH
ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

ESHTURSUNOV DAVRON ABDISAMATOVICH

**POLIMER SIRTIDA NANOO‘LCHAMDAGI METALL
ZARRACHALARINI HOSIL QILISH VA ULARNING XOSSALARI**

02.00.06 – Yuqori molekulyar birikmalar

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

Toshkent-2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiyasi komissiyasida B2024.1.PhD/K726 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Milliy universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uchta tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.ik.-kimyo.nuu.uz) va "ZiyoNET" Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Bekchanov Davronbek Jumazarovich
kimyo fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Yunusov Haydar Ergashovich
texnika fanlari doktori, professor

Ishankulov Alisher Farmonovich
kimyo fanlari falsafa doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Umumiy va noorganik kimyo instituti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.K.01.03 raqamli Ilmiy kengash asosidagi bir martalik Ilmiy kengashning 2025 yil 21-oktabr soat 15:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 4-uy. Tel.: (+99871)246-07-88; faks: (+99824)246-53-21; 246-02-24, e-mail: ilmiy_kengash@nuu.uz).

Dissertatsiya bilan O'zbekiston Milliy universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (~~161~~ raqami bilan ro'yxatga olingan Manzil: 100174, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 4-uy. Tel.: (+99871) 246-67-71; 277-12-24; faks: (+99871) 246-07-88; 246-02-24. e-mail: rector@nuu.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil « ____ » _____ kuni tarqatildi.
(2025 yil « ____ » oktabrdagi 22-raqamli reestr bayonnomasi).



Z.A. Smanova

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
asosidagi bir martalik ilmiy kengash
raisi k.f.d., professor

N.X. Qutlimurotova

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
asosidagi bir martalik ilmiy kengash
ilmiy kotibi k.f.d., professor

M.G. Muxamediev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
asosidagi bir martalik ilmiy kengash
ilmiy seminar raisi k.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda olib borilayotgan tadqiqotlar shuni ko'rsatmoqdaki, polimerlar asosidagi materiallar kimyosi va fizikasi sohalarida erishilayotgan ilmiy yutuqlar sanoat, ekologiya, energetika hamda biotibbiyot sohalarida yangi avlod funksional materiallarini yaratish imkonini bermoqda. Xususan, polimer materiallar yuzasida metall oksid nanozarrachalarini yo'naltirilgan sintezi asosida nanokompozitlar yaratish sohasida olib borilgan izlanishlarga alohida e'tibor qaratilmoqda. Bu borada, polimer materiallar yuzasida kerakli o'lcham va shakldagi metall oksid zarrachalarini hosil qilish, ularning bir xil tarqalishini boshqarish va polimer fazasi bilan o'zaro ta'sir mexanizmini chuqur o'rganish orqali multifunksional xususiyatga ega nanokompozitlar olish imkoniyati yaratilmoqda. Bunday nanokompozit tizimlar asosida suv muhitini organik ifloslantiruvchilardan fotokatalitik usulda tozalash, tibbiyotda antibakterial vositalar yaratish, biologik barqaror va qayta ishlanadigan ekologik materiallar ishlab chiqishda keng amaliy imkoniyatlar yaratilmoqda. Shu bois, bunday nanokompozitlarning yuqori barqarorligi, energiya samaradorligi va qayta ishlanish imkoniyati ularni sanoat va atrof-muhitni muhofaza qilish sohalarida keng qo'llashda muhim amaliy ahamiyat kasb etadi.

Dunyoda sintetik polimerlarni modifikatsiyalab, tarkibida turli funksional xususiyatlar saqlovchi multifunksional polimer-metall nanokompozitlarni sintez qilish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar izchil kengayib bormoqda. Xususan, vinil monomer asosidagi polimerlarning strukturasi nukleofil almashinish, kovalent bog'lanish yoki kimyoviy modifikatsiya orqali faol markazlarga aylantirish va ularning yuzasiga metall oksid nanozarrachalarini "cho'ktirish" usuli orqali multifunksional (optik, katalitik, biologik faol) kompozit tizimlar yaratilmoqda. Bunday nanokompozitlarni yaratilishi polimer matritsasining kimyoviy va termik barqarorligini oshirishi, metall zarrachalar dispersiyasini yaxshilashi hamda fotokatalitik reaksiyalardagi faollikni kuchaytirishi bilan ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Shu bilan birga, ularning kimyoviy tarkibi va tuzilishini chuqur o'rganish uchun zamonaviy fizik-kimyoviy tahlil usullaridan foydalanish orqali sintez mexanizmini aniqlash va optimal parametrlarni belgilashga alohida e'tibor qaratilmoqda. Bunday yondashuv polimer-nanokompozitlarning molekulyar darajadagi o'zaro ta'sirlarini tushunish, ularning energetik barqarorligini baholash hamda yangi avlod ekologik, biomaslashuvchan va energetik jihatdan samarali materiallarni ishlab chiqishda nazariy asos yaratib beradi. Shu bois, ushbu yo'nalishdagi ilmiy izlanishlar muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

Mamlakatimizda to'qimachilik, farmatsevtika sanoat tarmoqlaridan ajralib chiqayotgan chiqindi suvlardagi organik ifloslantiruvchi moddalarini ekologik xavfsiz texnologiyalar yordamida tozalash bugungi kunda eng muhim ustuvor yo'nalishlardan biri hisoblanadi. O'zbekiston Respublikasini "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonni taraqqiyot strategiyasida"¹ chiqindi resurslarni

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

qayta ishlash, zamonaviy texnologiyalarni joriy etish orqali ekologik xavfsizlikni ta'minlash masalalari ustuvor yo'nalish sifatida belgilangan. Bu yorada, yurtimizda mahalliy xomashyolar asosida yuqori qo'shilgan qiymatga ega bo'lgan, selektivligi yuqori, qayta ishlanadigan, arzon va ekologik xavfsiz funksional materiallar yaratishga qaratilgan ilmiy izlanishlar muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonni taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmonida, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 30-oktyabrdagi "2030-yilgacha bo'lgan davrda O'zbekiston Respublikasining atrof-muhitni muhofaza qilish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-5863-son Farmonida, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 30-yanvardagi PF-16-son "O'zbekiston-2030" strategiyasini "Atrof-muhitni asrash va "yashil iqtisodiyot" yilida amalga oshirishga oid davlat dasturi to'g'risida"gi farmoni hamda ushbu sohada qabul qilingan boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda nazarda tutilgan vazifalarni bajarishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining VII. "Kimyo texnologiyalari va nanotexnologiyalar" ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Jahon ilmiy adabiyotlarida polivinilxlorid (PVX) asosidagi funksional materiallar yaratish bo'yicha izchil tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, S. Marian, M.Herrero, P. Jia, A.Rodionova, M.Wang, S. Allan, H. Khdir, A. Roudman, W.Chaisriratanakul, P.Zuo, R. Wang, J.Verdu, H. Reinecke, J. Koo, Z. Shifrina, A. Ghazzy, M. Bustamante-Torres, T. Druffel, E. Morici, A. Kockmann, Z. Wang, Sh. Lawaniya, J. Zhang, K. Günay, T.Netke kabi tadqiqotchilar PVXning kimyoviy modifikatsiyasi orqali uning fizik-kimyoviy va strukturaviy xossalarini yaxshilash hamda amaliy qo'llanilishini kengaytirish ustida ishlaganlar. Ularda, asosan, PVX ning nukleofil almashinish reaksiyalari, plastifikatsiyalash, sirt modifikatsiyasi va metall va metal oksidi kristallari bilan imobillashuvi orqali turli kompozit sistemalar yaratish bo'yicha samarali yondashuvlar ilgari surilgan.

O'zbekiston Respublikasi olimlari – U.N. Musaev, M.A. Askarov, S.Sh. Rashidova, X.T. Sharipov, M.G. Muxamediev, T.M. Babaev, T.X. Raximov, O.N. Ro'zimurodov, D.J. Bekchanov, D.A. Gafurova, N.T. Kattaev va boshqalar tomonidan ham polimer kimyosi, funksional polimerlar va ularning nanokompozitlari, sorbentlar va ionitlar sintezi sohasida muhim tadqiqotlar olib borilgan. Jumladan, PVXning amin guruh tutgan reagentlar bilan modifikatsiyasi, kation/anion almashinuvchi materiallar sintezi, ularning sorbsion va kompleks hosil qiluvchi xossalarini o'rganishga alohida e'tibor qaratilgan.

Biroq mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, granulalangan sanoat PVX ni nukleofil modifikatorlar bilan funksional guruhlarga ega shaklga keltirish, u asosida nanoo'lchamli metall oksid zarrachalarini biriktirib, yuqori sirt faolligi va fotokatalitik samaradorlikka ega funksional polimer nanokompozit materiallar sintezi hamda ularning tuzilish–xossa bog'liqligini chuqur o'rganish bo'yicha

tizimli ilmiy izlanishlar yetarli darajada olib borilmagan. Shu bois, ushbu dissertatsiya ishida polivinilxlorid asosida funksional polimer asosida nanokompozitlar sintezi, ularning strukturaviy, morfologik hamda fotokimyoviy xossalarini kompleks tahlil qilish orqali mavjud ilmiy bo'shliqni to'ldirishga yechim taklif etish maqsad qilingan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Milliy universitetining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq AL-552101242 "Polivinilxlorid asosida amino va gidroksil guruhlar tutgan yangi ionitlarning olinishi va oqava suvlarini Cr(VI) ionlaridan tozalashda qo'llanilishi" (2022-2025 yy.) amaliy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi sifatida polimerlar sirtida nanoo'lchamdagi metall zarrachalarini hosil qilish va ularning xossalarini tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

magnit xossali multifunksional $Fe_3O_4/PPE-2$ polimer nanokompozit material sintez qilishning maqbul sharoitlarini aniqlash;

funksional $CuO/PPE-2$ polimer nanokompozit material sintez qilish qonuniyatlarini tadqiq qilish;

funksional $Fe_3O_4/PPE-2$ va $CuO/PPE-2$ polimer nanokompozit materiallarning tarkibi, tuzilishi va struktur morfologiyasini identifikatsiyalash;

multifunksional $Fe_3O_4/PPE-2$ va $CuO/PPE-2$ polimer nanokompozit materiallarning zararli organik birikmalarga nisbatan fotokatalitik xossalarini tekshirish;

funksional $CuO/PPE-2$ polimer nanokompozit materialning antibakterial samaradorligini aniqlash;

yangi funksional polimer nanokompozit materiallarning qo'llanilish sohalarini aniqlash.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida mahalliy xomashyo polivinilxlorid, modifikatsiyalovchi reagent sifatida mochevina, funksional nanokompozit materiallar yaratish uchun metall tuzlari (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+}), shuningdek, adsorbsion-fotokatalitik, antimikrob tahlillar uchun tekstil sanoati bo'yoq ifloslantiruvchilari, farmasevtika sanoati preparatlari va patogen mikroorganizmlar tanlab olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida polivinilxlorid (PVX) ni karbamid bilan modifikatsiyasi asosida olingan anion almashinuvchi materila (PPE-2) hamda ular asosida temir va mis oksidlarini cho'ktirish usuli yordamida sintez qilingan $Fe_3O_4/PPE-2$ va $CuO/PPE-2$ funksional nanokompozitlar tanlab olindi. Mazkur funksional nanokompozitlarning strukturaviy-morfologik va fizik-kimyoviy xossalari, fotokatalitik faoliyat mexanizmlari hamda antibakterial samaradorligi ushbu ilmiy tadqiqotning asosiy yo'nalishini tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot davomida zamonaviy nazariy va eksperimental kimyoviy tahlil usullari qo'llanildi. Modifikatsiyalangan polimer va hosil bo'lgan nanokompozit materiallarning tuzilishi, tarkibi hamda morfologik xossalarini aniqlash uchun FTIR, Raman, SEM, AFM, EDX, XRD, XRF, DLS va MASS-spektrometriya usullari ishlatildi. Termik barqarorlik va fazaviy o'zgarishlarni baholashda TG va DSC analizlari, optik va elektron xossalarni

o'rganishda UV-Vis va PL spektroskopiya metodlari qo'llanildi. Fotokatalitik samaradorlik va kinetik parametrlarni aniqlashda fotoreaktor sharoitida Langmuir-Hinshelwood va psevdobirinchi tartibli kinetik modellardan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bora polivinilxlorid asosidagi PPE-2 anion almashinuvchi material sirtida Fe_3O_4 va CuO nanokristallari cho'ktirish usuli asosida gidrotermal sharoitda sintez qilingan;

ilk bora $180\text{ }^\circ\text{C}$ da 8 soat davomida sintez qilingan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ nanokompozit material yordamida tekstil sanoat chiqindi suvlari tarkibida mavjud bo'lgan zaharli organik bo'yog – Rodamin B (20 mg/10 ml eritma) quyosh nuri ta'sirida, $\text{pH}=6.5\text{--}7.5$ sharoitda 180 daqiqada 98,2% fotokatalitik parchalanishga uchradi. Fotokatalitik jarayonning kinetik tahlili natijasida reaksiyaning tezlik doimiysi $0,027\text{ min}^{-1}$ ekanligi aniqlangan;

ilk bora sintez qilingan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ va $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozit materiallar sirtidagi metall oksid nanokristallarning morfologiyasi ularning fotokatalitik va optik xossalarga bevosita ta'sir ko'rsatishi eksperimental ravishda aniqlangan;

ilk bora $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozit material patogen bakteriya shtammlari *E. coli*, *P. aeruginosa* kabi klinik muhim, antibiotiklarga chidamli bakterial shtammlarga nisbatan $36\text{ }^\circ\text{C}$, 24 soat davomida samarali bakteritsid ta'sir ko'rsatgani eksperimental isbotlangan;

polimer tarkibidagi ionogen va kompleks bog'lovchi guruhlar ishtirokida sintez qilingan nanokompozitlar, sof metall oksid nanokristallarga nisbatan yuqori disperslik, strukturaviy barqarorlik, fotokatalitik samaradorlik va antibakterial xossalarga ega ekanligi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

polivinilxlorid asosida modifikatsiyalangan funksional polimer material sirtida Fe_3O_4 va CuO nanozarrachalarini hosil qilish uchun cho'ktirish usuli asosida gidrotermal sharoitda sintez texnologiyasi ishlab chiqildi. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ va $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ sintezi jarayonida muhitning pH qiymati ($\text{pH}=10$), kalsinatsiya harorati ($180\text{ }^\circ\text{C}$ va $150\text{ }^\circ\text{C}$), kalsinatsiya davomiyligi (8 va 10 soat), hamda quritish sharoiti ($80\text{ }^\circ\text{C}$ da 12 soat)ning nanokristallar hosil bo'lishiga ta'siri o'rganilgan, optimal sintez sharoitlari tanlab olingan;

ilk bora ion almashinuvchi polimerlar sirtida yashil kimyo tamoyillari asosida multifunksional xossaga ega nanokompozitlar sintez qilindi, ularning fotokatalitik va antibakterial xossalari o'rganildi. Olingan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ nanokompozitining fotokatalitik faolligi Rodamin B organik bo'yog'iga nisbatan 98,2% fotodegradatsiya samaradorligi va $0,027\text{ min}^{-1}$ kinetik tezlikni ko'rsatdi. Shuningdek, $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ nanokompozitning antibakterial xossalari *E. coli* va *P. aeruginosa* shtammlariga qarshi testdan o'tkazilib, yuqori mikroblarga qarshi faollik aniqlangan;

sintez qilingan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozit material "Gurlan Global Teks" MChJ oqava suvlarini tozalash inshootida sinovdan o'tkazildi. Fotokatalitik jarayon natijalarini baholashda Rodamin B organik bo'yog'ining degradatsiyasi kuzatildi va 98,2% samaradorlik bilan to'liq

parchalanish sodir bo'ldi. Yakuniy mahsulotlarni aniqlash maqsadida olingan namunalarda MASS-spektrometriya usuli yordamida tahlil qilindi hamda jarayon to'liq mineralizatsiya bilan tugab, asosiy yakuniy mahsulotlar sifatida CO₂ va H₂O hosil bo'lgani isbotlandi;

tadqiqot davomida ishlab chiqilgan arzon, samarali va ekologik xavfsiz nanokompozit sorbentlar va fotokatalizatorlar atrof-muhitni muhofaza qilish, ayniqsa chiqindi suvlardan farmasevtik preparatlar va bo'yoq ifloslantiruvchilarni zararsizlantirish uchun istiqbolli amaliy yechim sifatida tavsiya etildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqotda olingan ilmiy natijalar zamonaviy yuqori informatsion fizik-kimyoviy tahlil usullari bilan ishonchli tarzda asoslangan. Funktsional polimer nanokompozitlarning tarkibi, tuzilishi, morfologiyasi va xossalari infraqizil (FTIR), Raman, UV-Vis, PL spektroskopiya, TG, DSC, XRD, EDX, SEM, AFM, MS kabi instrumental metodlar yordamida aniqlangan.

Fotokatalitik va ion almashinish jarayonlari Langmuir–Hinshelwood va psevdobirinchi tartibli kinetik modellar asosida nazariy va eksperimental tahlillar orqali matematik-statistik usullar bilan qayta ishlanib, ishonchli natijalar bilan tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati, geterogen sharoitda granula ko'rinishidagi ion almashinuvchi materiallar sirtida metal oksid nanozarrachalarini hosil qilishning maqbul sharoitlari aniqlash orqali olingan materiallarning xossalari tadqiq qilish yordamida fotokatalitik xossaga ega bo'lgan funktsional polimer materiallarni sintez qilish mumkinligini ko'rsatishdan iboratdir.

Ion almashinuvchi materiallar sirtida cho'ktirish usuli yordamida olingan metal oksid nanozarrachalarining o'rtacha o'lchami 50-100 nm oralig'ida bo'lib shunga mos ravishda ularning mikroanaloglari bilan solishtirilganda kattaroq o'ziga xos sirt yuzasiga ega bo'lishiga sabab bo'lib, bu sintez qilingan nanonamunalarni faolroq qiladi. Fotokatalitik faol material olish uchun funktsional polimerlar sirtida Fe₃O₄ va CuO nanozarrachalarini sintezini ishlab chiqishning arzon usullarini texnologik parametrlari aniqlandi. Yashil kimyo texnologiyasi xususiyatlaridan kelib chiqqan holda, ushbu nanostrukturali yarimo'tkazgichli materiallar va ular asosidagi nanokompozitlar oqava suvlarni organik ifloslantiruvchi moddalardan tozalashda foydalanish uchun istiqbolli hisoblanadi.

Tadqiqot natijalari quyidagi amaliy ahamiyatga ega: PPE-2 anion almashinuvchi material sintez qilingan funktsional polimer materiallar sanoat oqava suvlari tarkibidagi turli xil zaharli organik kimyoviy va biologik ifloslantiruvchi moddalardan ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilishda, ionitlarni utilizatsiya muammolarini bartaraf etishda: yaroqsiz ionitlar asosida arzon va qulay usulda fotokatalizator sintez qilish bilan izohlanadi. Fotokatalizatorni vakum va inert muhit talab qilmasdan funktsional polimer materiallar yordamida nanokompozitlarni olish sanoat miqyosida mahsulot ishlab chiqarishning texnologik sxemasini soddalashtirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Polivinilxlorid (PVX) asosida Fe₃O₄ va CuO zarrachalari bilan modifikatsiyalangan funktsional nanokompozitlarning

sintezi, morfologiyasi va fotokatalitik xossalari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

Fe₃O₄/PPE-2 funksional polimer nanokompozitning tarkibi, strukturasi, fotokatalitik faolligi va regeneratsion xossalarini tavsiflovchi ilmiy ma'lumotlardan xorijdagi 3 ta impakt-faktori yuqori ilmiy jurnallarda foydalanilgan (*Sustainability*, 2025, Vol. 17, No. 9, p. 4084 (Journal Impact Factor, IF 3.3); *Reactive and Functional Polymers*, 2025, Vol. 216, Article 106457 (Journal Impact Factor, IF 5.1); *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2025, Vol. 6, Article 100835 (Journal Impact Factor, IF 5.4)). Natijada, ushbu nanokompozit fotokatalizator sifatida Rodamin B bo'yog'iga nisbatan degradatsiyasida yuqori samaradorlikka ega materiallar sifatida tavsiflangan hamda ekologik xavfsiz va qayta ishlanadigan funksional materiallar yaratishda ilmiy asos bo'lib xizmat qilgan.

funksional polimer nanokompozit "Gurlan Global Teks" MChJ korxonasida amaliyotga joriy etilgan (O'zbekiston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligining 21.04.2025 yildagi №03-03/1-03/3-3815-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ushbu material korxonadan chiqadigan oqava suvlarni zararli moddalardan samarali tozalash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 14 ta, jumladan 6 ta xalqaro va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 22 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola respublika, 4 ta (3 ta Scopus) maqola xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiyasi tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, adabiyotlar ro'yxati, ilovadan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 sahifani tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya ishining dolzarbligi, ilmiy yangiligi va tadqiqot zarurati asoslab berilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi va uni amalga oshirish uchun belgilangan vazifalar aniqlashtirilgan, shuningdek, ilmiy ishning ob'ekti va predmeti aniq ko'rsatilgan. Ushbu tadqiqot ishi O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, ularning ishonchliligi asoslangan, tadqiqot natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi, nashr etilgan ilmiy ishlar, shuningdek, dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

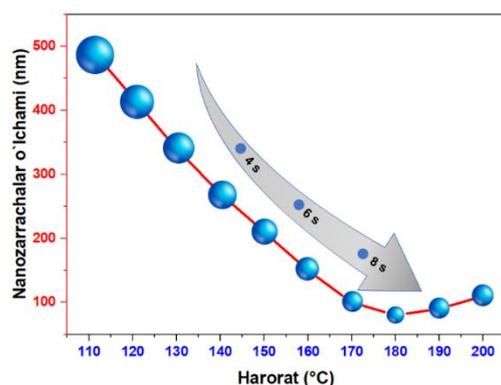
Dissertatsiyaning **"Funksional polimer materiallar asosida nanokompozitlar olish va ularning xossalari"** (adabiyotlar sharxi) deb nomlangan I bobida mavzuga oid adabiyotlar tahlil qilingan. Funksional

Muallif dissertatsiya ishini bajarishda bergan ilmiy maslahatlari uchun kimyo fanlari doktori, professor M.G. Muxamedievga o'zining samimiy minnatdorchiligini bildiradi

polimerlarning gidroksil, karboksil, amino va tiol guruhlari ularning fizik, kimyoviy hamda biologik xossalarini belgilab berishi ko‘rsatildi. Ushbu guruhlar selektivlik, katalitik faollik, elektr va optik xususiyatlarni shakllantirishda muhim ahamiyatga ega ekani ilmiy asoslandi. Polimerlarning nanozarrachalar bilan o‘zaro ta’siri ularning tuzilmasini modifikatsiyalash orqali yangi funksional polimer nanokompozitlar yaratish imkonini berishi qayd etildi. Nanokompozitlarni olishda qo‘llaniladigan zol-gel, yashil sintez, birgalikda cho‘ktirish va gidrotermal usullar tahlil qilinib, ularning afzalliklari va ekologik cheklovlari solishtirib ko‘rsatildi. Metall oksidli nanozarrachalar (TiO_2 , ZnO , Fe_3O_4 , CuO) asosida yaratilgan nanokompozitlarning mexanik, elektr, optik va katalitik xossalari yaxshilanishi aniqlangan. Shuningdek, bunday materiallarning sensor texnologiyalar, biomeditsina, energiya saqlash hamda kataliz sohalarida qo‘llanilish istiqbollari ko‘rsatib berilgan. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, nanokompozitlarning ekologik muammolarni hal qilishdagi samaradorligi, xususan, suvni organik ifloslantiruvchilardan tozalashdagi ustunliklari ilmiy asosda isbotlangan.

Dissertatsiyaning **“Funksional polimer materiallar asosida nanokompozitlar olishning qonuniyatlari”** deb nomlangan ikkinchi bobida, Polivinilxlorid (PVX) asosida sintez qilingan anion almashuvchi polimer material–PPE-2 tarkibiy tuzilishi va fizik-kimyoviy xossalari o‘rganilgan. Ushbu polimer asosida sintez qilingan funksional polimerni temir oksidi (Fe_3O_4) va mis oksidi (CuO) nanozarrachalari bilan boyitilib nanokompozit materiallar sintezi va ularning hosil bo‘lish qonuniyatlari tadqiq qilingan.

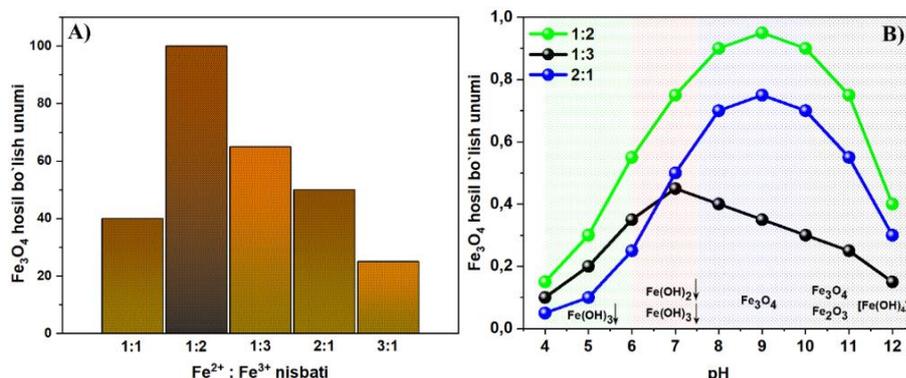
Fe_3O_4 /PPE-2 magnit xossali polimer nanokompoziti birgalikda cho‘ktirish usuli bilan ikki bosqichda sintez qilindi: avval metall ionlarining polimer sirtiga adsorbsiyasi amalga oshirildi, keyin esa ishqoriy muhitda Fe_3O_4 zarrachalari cho‘ktirilib kristallantirildi. Nanokompozit material sirtidagi metal oksid nanozarrachasining o‘lchamiga haroratning ta’sirini bog‘liqligi [1-rasmda](#) ko‘rsatilgan.



1-rasm. Funksional polimer nanokompozit sirtida Fe_3O_4 nanozarrachasining o‘lchamiga haroratning ta’sirini bog‘liqligi

Fe_3O_4 /PPE-2 magnit xossali polimer nanokompozitini sintez qilishda optimal sharoit tanlab olindi: Fe^{2+} va Fe^{3+} tuzlari 1:2 nisbatda, $\text{pH} = 10,0$ va $T = 180^\circ\text{C}$ da 8 soat davomida olib borilgan jarayonda polimer sirtida bir tekis taqsimlangan, 5–25 nm o‘lchamdagi sterjen shakldagi va yuqori magnit faollikka ega Fe_3O_4 nanozarrachalari hosil bo‘lishi ta’minlandi ([2-rasm](#)). Natijada, anionit (PPE-2) va hosil bo‘lgan funksional polimer nanokompozit (Fe_3O_4 /PPE-2) namunalarning IQ va Raman spektroskopiyasi, SEM, EDX hamda XRD tahlillari orqali Fe_3O_4

nanozarrachalarining polimer matritsada bir tekis taqsimlangani, ularning kichik o'lchamli ekani va polimer sirtida Fe_3O_4 kristall fazasining mavjudligi tasdiqlandi.



2–rasm. (A) Funktsional polimer material tarkibidagi magnetit nanozarrachasining sinteziga Fe^{2+} va Fe^{3+} ionlarining nisbatini bog‘liqligi (B) magnetit nanozarrachasining hosil bo‘lishiga pH muhitning ta’siri

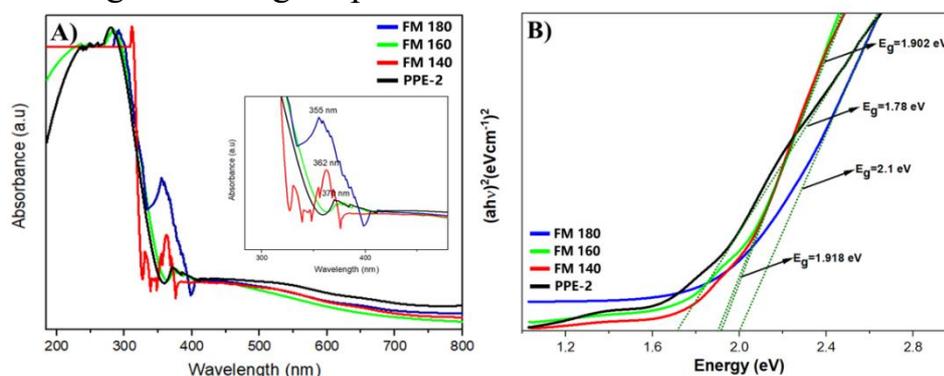
CuO/PPE-2 funksional polimer nanokompozit materialining sintez jarayonlari o‘rganildi. Nanokompozit ikki bosqichda sintez qilindi. Birinchi bosqichda PPE-2 polimer matritsasiga $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ eritmalaridan Cu^{2+} ionlari adsorbsiyalandi. Adsorbsiya jarayonining kinetikasi va izotermalari 293–313 K harorat oralig‘ida, turli vaqt davomida (2–10 soat) hamda turli konsentratsiyalarda (0,0125–0,1 mol/l) o‘rganildi. Natijada, eng yuqori adsorbsiya samaradorligi 313 K da, 0,1 mol/l konsentratsiyada va 10 soat davomida qayd etildi. Adsorbsiya sig‘imi 248 mg/g ni tashkil etib, bu sharoitlar keyingi bosqich sintez jarayonlari uchun optimal deb belgilandi. Ikkinchi bosqichda polimer sirtiga adsorbsiyalangan Cu^{2+} ionlari 1 mol/l NH_4OH eritmasi 60 °C da tomchilab qo‘shilib, pH 8–9 gacha oshirilganda $\text{Cu}(\text{OH})_2$ cho‘kmalari hosil bo‘ldi. Hosil bo‘lgan cho‘kma gidrotermal usulda turli harorat (110 °C, 130 °C va 150 °C) va vaqt (6,8 va 10 soat) sharoitlarida qayta ishlanib, natijada polimer matritsa yuzasida barqaror taqsimlangan CuO nanozarrachalari shakllandi.

Dissertatsiyaning “**Funksional polimer nanokompozitlarning fizik-kimyoviy xossalari**” deb nomlangan uchinchi bobida, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, CuO/PPE-2 funksional polimer nanokompozitlarning kimyoviy tuzilishi, sirt morfologik xossalari va nanokompozitlarning organik bo‘yoqlarga (RhB, MB), antibiotiklarga (tetrasiklin, parasetamol) nisbatan fotokatalitik, patogen bakteriya shtammlariga nisbatan antibakterial xususiyatlari o‘rganildi.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozit materialning IQ va Raman spektrlarini olishdan maqsad $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozitida Fe_3O_4 zarrachalari bilan polimer matritsa o‘rtasidagi bog‘larni va funksional guruhlarini tabiati o‘zaro ta’sirlarni aniqlashda muhim o‘rin tutadi. IQ spektrlari PPE-2 polimerida $-\text{NH}$ guruhining valent tebranishlari 3340–3430 cm^{-1} da, biroz kengaygan maydonda va yuqori intensivlikda kuzatildi. Uning deformatsion tebranishlari 2925 cm^{-1} $-\text{CH}_2$ cho‘zilishiga, 1630–1665 cm^{-1} $-\text{C}=\text{N}$ guruhlariga, 1030–1150 cm^{-1} oralig‘i $-\text{C}-\text{N}$ va $-\text{C}-\text{O}$ tebranishlariga mos keladi. IQ spektrlari asosida $-\text{NH}$, $-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{N}$ va $-\text{C}-\text{N}$ guruhlariga xos tebranishlarning siljishi hamda yangi $\text{Fe}-\text{O}$ tebranishlarining (580–620 cm^{-1}) paydo bo‘lishi Fe^{3+} ionlarining

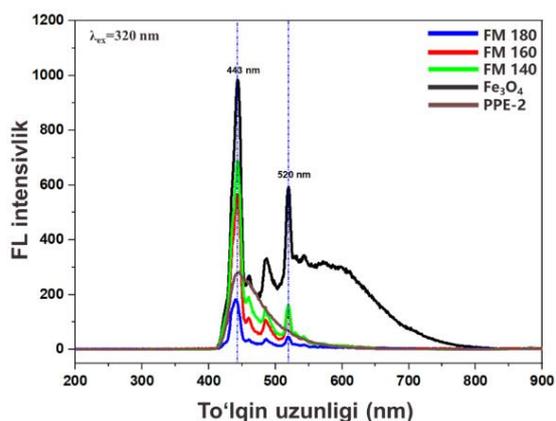
aminoguruhlar bilan koordinatsion bog‘lar hosil qilganini ko‘rsatdi. Raman spektroskopiyasida esa Fe_3O_4 kristallariga xos A_{1g} (776 cm^{-1}) va T_{2g} (560 va 490 cm^{-1}) simmetrik rejimlariga mos tebranishlar qayd etilib, yuqori kristall darajada ekanligini tasdiqladi.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional polimer nanokompozit materialning yorug‘lik yutilish xususiyatlari, optik faolligi va energiya bo‘shlig‘ining (band gap) miqdorini aniqlash maqsadida ultrabinafsha–ko‘rinadigan nurlanish (UV–Vis) spektroskopik tahlili o‘tkazildi. PPE-2 ning UV-Vis spektrida asosiy yutilish to‘lqin uzunliklari 370 nm da qayd etilgan bo‘lib, bu $\pi \rightarrow \pi^*$ elektron o‘tishlariga mos kelishi aniqlangan bo‘lsa, Fe_3O_4 zarrachalari qo‘shilgan nanokompozitlarda bu cho‘qqi $350\text{--}370\text{ nm}$ oralig‘iga siljishi va yutilish intensivligi ortishi kuzatildi. Ayniqsa FM180 namunasi 355 nm da maksimal yutilish cho‘qqisini ko‘rsatdi, bu esa sintez haroratining ortishi bilan nanozarrachalarning optik faolligi kuchayishini tasdiqlaydi. Ko‘rinadigan yorug‘lik sohasida FM160 va FM180 namunalarda $420\text{--}550\text{ nm}$ diapazonda yutilishning ortishi Fe_3O_4 ning magnitit fazasiga xos d–d o‘tishlar bilan bog‘liq bo‘lib, nanokompozitning ko‘rinadigan spektr sohasida ham faol ekanini ko‘rsatdi .



3-rasm. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional materialning UB spektri

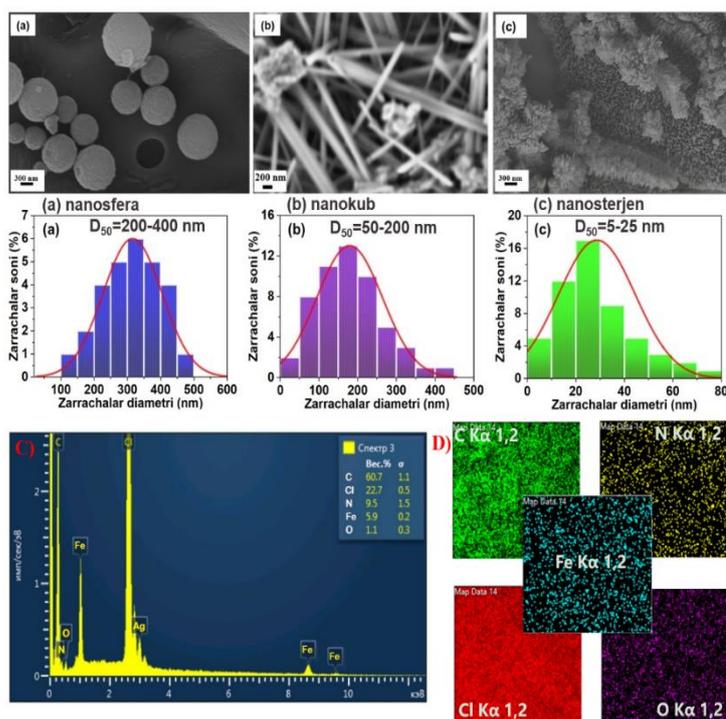
Ta‘qiqlangan zona kengligi (band gap) qiymatlari PPE-2 uchun $1,78\text{ eV}$, FM140 uchun $2,1\text{ eV}$, FM160 uchun $1,918\text{ eV}$ va FM180 uchun $1,902\text{ eV}$ ni tashkil etdi (3-rasm). FM180 namunasi eng kichik band gapga ega bo‘lib, elektron-kovak juftlarining ajralishi osonlashgani va fotokatalitik jarayonlarda yuqori samaradorlikka erishishi qayd etildi. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ funksional materialning optoelektron xususiyatlarini baholash maqsadida fotolyuminessensiya (PL) spektroskopik tahlili o‘tkazildi. PL usuli nanokompozitlarda fotogeneratsiyalangan elektron–kovak juftlarining rekombinatsiya tezligi va yorug‘lik yutilish samaradorligini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi. PPE-2 polimerining PL spektrida $443\text{--}520\text{ nm}$ diapazonda keng nurlanish chiziqlari qayd etildi (4-rasm). Bu nurlanish asosan polimer matritsada hosil bo‘lgan eksitonlarning rekombinatsiyasi bilan bog‘liq bo‘lib, materialning past darajadagi fotoyutilish xususiyatlarini tasdiqlaydi. Fe_3O_4 zarrachalari kiritilgan nanokompozitlarda PL intensivligining pasayishi kuzatildi. FM140 namunasi PPE-2 ga nisbatan biroz pastroq PL intensivligini ko‘rsatgan bo‘lsa, FM160 va ayniqsa FM180 namunalarda bu pasayish yanada kuchli bo‘ldi. FM180 namunada PL chiziqlarining eng past amplitudada qayd etilishi kristall Fe_3O_4 zarrachalari elektron–kovak juftliklarining rekombinatsiyasini samarali ravishda bostirganidan dalolat beradi.



4-rasm. PPE-2, Fe₃O₄ va Fe₃O₄/PPE-2 nanokompozitlarining fotolyuminescent (PL) spektrlari

Shunday qilib, Fe₃O₄/PPE-2 nanokompozitlari, xususan FM180 namunasi, samarali yorug‘lik yutilishi, kichik band gap va past rekombinatsiya tezligi bilan ajralib turib, yuqori fotokatalitik faollikka ega ekani isbotlandi.

Fe₃O₄/PPE-2 funksional polimer nanokompozitining sirt morfologiyasi va element tarkibini o‘rganish maqsadida SEM va EDX tahlillari o‘tkazildi. Tahlil qilinayotgan namunalar 140°C 4 soat (FM140), 160°C 6 soat (FM160) va 180°C 8 soat (FM180)da gidrotermal usul bilan sintezi natijasida zarrachalarning o‘lchami va shakli sezilarli darajada farq qildi.



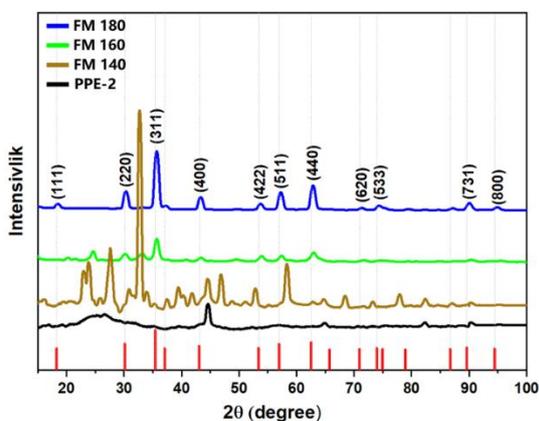
5-rasm. Turli harorat va vaqtlar davomida sintez qilingan Fe₃O₄/PPE-2 funksional polimer nanokompozitning SEM mikrografiyalari: (a) FM140, (b) FM160 va (c) FM180, Fe₃O₄/PPE-2 funksional polimer nanokompozitning EDS analizi va elementlarni tarqalish xaritasi

SEM mikrografiyalarida FM140 namunada 200–400 nm nanosferik, FM160 da 50–200 nm nanokubik, FM180 da esa 5–25 nm nanosterjen Fe₃O₄ zarrachalari qayd etildi (5-rasm a,b,c). Harorat ortishi bilan zarrachalar kichrayib, ularning disperslanishi ortgani va FM180 namunada aglomeratsiyalangan holda barqaror taqsimlangani aniqlandi. Zarrachalar orasidagi interfeys zonalar polimerning

aminoguruhleri bilan Fe_3O_4 zarrachalari o'rtasida elektrostatik va donor-akseptor o'zaro ta'sirlarni tasdiqladi.

EDX tahlili FM180 namunada Fe elementining miqdori 5,9 % bilan mavjudligini ko'rsatdi. Elementlarning tarqalish xaritasi Fe va N elementlarining bir tekis taqsimlanganini aniqladi, bu esa PPE-2 matritsasi bilan Fe_3O_4 zarrachalari o'rtasida kuchli elektrostatik va koordinatsion bog'lanishlarning shakllanganini bildiradi. Ushbu natijalar gidrotermal sintez usulining optimal tanlanganligini va nanozarrachalarning polimer matritsaga samarali integratsiyalanganligini tasdiqlaydi (5-rasm C,D).

Fe_3O_4 /PPE-2 funksional polimer nanokompozitlarining kristallanish darajasi, fazaviy tuzilishi va zarracha o'lchamlarini aniqlash maqsadida rentgen difraksiyon (XRD) tahlili o'tkazildi. XRD usuli nanomateriallarning kristall fazalarini, ularning struktura tartibligini hamda Debye–Scherrer tenglamasi yordamida zarracha o'lchamlarini baholash imkonini berdi (6-rasm).



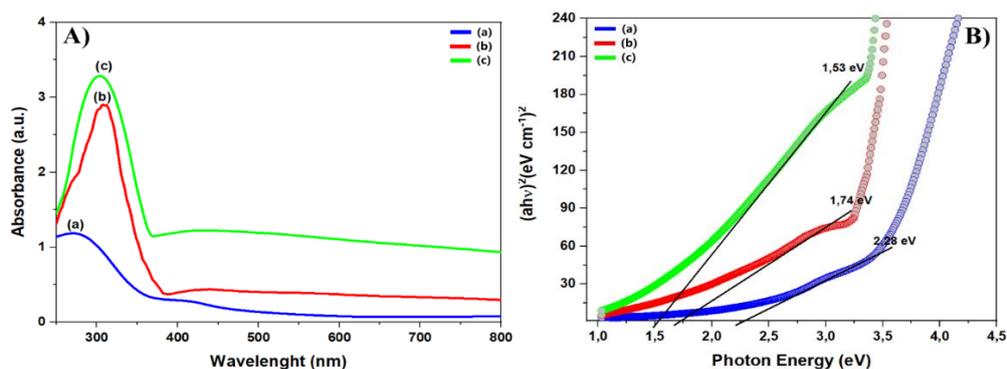
Tadqiq qilingan namunalarda (FM140, FM160, FM180) difraksiyon spektrlarda intensiv va aniq piklar bilan ajralib turib, Fe_3O_4 kristallarining muvaffaqiyatli hosil bo'lganini tasdiqladi. Xususan, FM140 namunasida $2\theta = 27.25^\circ$, 45.25° va 57.28° burchaklarda joylashgan piklar Fe_3O_4 kristall fazasiga (JCPDS 85-1436) mos ravishda (220), (311) va (511) tekisliklarga to'g'ri keladi. FM160 namunada esa $2\theta = 30.3^\circ$, 35.6° , 43.28° , 53.6° , 57.18° va 62.8° dagi difraksiyon cho'qqilar mos ravishda Fe_3O_4 ning (220), (311), (400), (422), (511) va (440) kristall tekisliklariga to'g'ri keladi. FM180 namunasi eng yuqori kristall struktura ko'rsatgan bo'lib, unda $2\theta = 18.51^\circ$ dan 94.9° gacha bo'lgan intervalda (111), (220), (311), (400), (422), (511), (622), (731) va (800) tekisliklarga mos 10 dan ortiq intensiv piklar qayd etildi. Debye–Scherrer tenglamasi asosida hisoblangan zarracha o'lchamlari FM140 namunada 48 nm, FM160 namunada 38 nm va FM180 namunada 18 nm ni tashkil etdi. Bu natijalar shuni ko'rsatadiki, sintez harorati ortgan sari Fe_3O_4 zarrachalari kichiklashib, ularning disperslanish darajasi ortadi, bu o'z navbatida zarrachalarning sirt maydonini ortishiga olib kelgan.

Fe_3O_4 /PPE-2 funksional polimer nanokompozit materialining sirt maydoni, g'ovak hajmi va diametri kabi parametrlari azot gazining (N_2) adsorbsiyasi usuli yordamida o'rganildi. BET va BJH modellari asosidagi hisob-kitob natijalariga ko'ra, sintez jarayonidagi haroratning ortishi bilan nanokompozitning sirt maydoni $28.48 \text{ m}^2/\text{g}$ gacha ortdi, g'ovak diametri esa 13–22 nm oralig'ida bo'lib, bu mezog'ovakli struktura shakllanganligini ko'rsatdi. Ayniqsa, FM180 namunasi keng

sirt maydoni, yuqori g'ovaklik darajasi va H4-turdagi gisterezis halqasi bilan ajralib turadi. Ushbu morfologik xususiyatlar ifloslantiruvchi molekulalarning nanokompozit ichiga oson kirib borishini, samarali diffuziyani va natijada yuqori fotokatalitik faollikni ta'minlaydi.

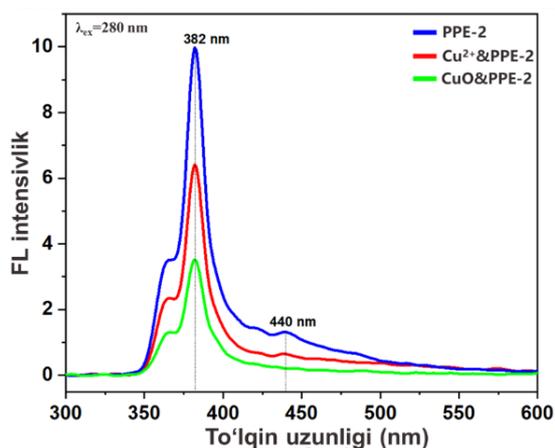
PPE-2 va CuO/PPE-2 funksional polimer nanokompozitning kimyoviy tuzilishini, molekulyar o'zaro ta'sirlar va strukturaviy o'zgarishlarini aniqlash maqsadida infraqizil (IQ) va Raman spektroskopik tadqiqotlar o'tkazildi. IQ va Raman spektroskopiyasi orqali CuO/PPE-2 nanokompozitidagi funksional guruhlar o'zgarishi va molekulyar o'zaro ta'sirlar aniqlandi. Spektral tahlillar N-H, C-H, C-N va C-Cl guruhlarining tebranishlarida siljishlar va intensivlik o'zgarishlarini ko'rsatdi, bu Cu^{2+} ionlarining aminoguruhlar bilan koordinatsion bog'lanishini tasdiqlaydi. Shuningdek, Cu-O bog'lariga xos 840 , 570 va 430 cm^{-1} da yangi tebranishlar paydo bo'lishi CuO ning monoklinik fazada shakllanganini ko'rsatdi. Bu o'zgarishlar kompozitda CuO nanozarrachalari muvaffaqiyatli hosil bo'lganini va ularning polimer strukturasi kuchli ta'sir ko'rsatganini tasdiqlaydi.

UV-Vis spektrlari tahlili $200\text{--}800 \text{ nm}$ diapazonda olib borildi, absorbsiya spektrlari PPE-2, Cu^{2+} /PPE-2 va CuO/PPE-2 namunalarida yorug'lik yutilishi mos ravishda 372 nm , 362 nm va 366 nm da qayd etildi. Tauc grafigi yordamida aniqlangan ta'qiqlangan zona kengligi (E_g) qiymatlari PPE-2 uchun $2,28 \text{ eV}$, Cu^{2+} /PPE-2 uchun $1,74 \text{ eV}$, CuO/PPE-2 uchun esa $1,53 \text{ eV}$ ni tashkil etdi (7-rasm). E_g qiymatlarining pasayishi CuO nanozarrachalarining polimer matritsaga integratsiyalanganini, elektron-kovak juftlari energiya darajalarining qayta taqsimlanganini va interfasial zaryad almashinuv jarayonlarining shakllanganini ko'rsatdi. Kubelka-Munk funksiyasi asosida qayta ishlangan ma'lumotlar Tauc grafigi natijalarini to'liq tasdiqlab, CuO/PPE-2 nanokompozitining ko'rinadigan yorug'lik diapazonida samarali absorbsiya qobiliyatiga egaligini isbotladi.



7-rasm. CuO/PPE-2 funksional materialning yutilish spektri hamda hisoblangan E_g qiymati

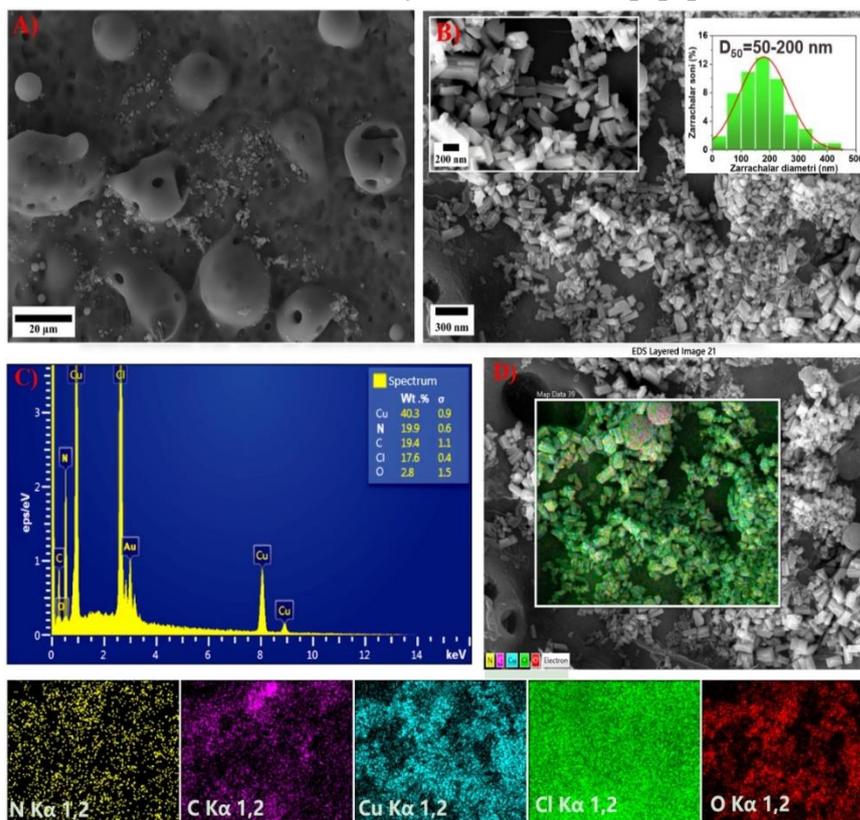
PL (fotoluminessensiya) tahlillari 280 nm da qo'zg'atilgan PL spektrlari $300\text{--}600 \text{ nm}$ diapazonda o'lchandi. PPE-2 va CuO/PPE-2 namunalarida 382 nm va 440 nm da asosiy emissiya cho'qqilari qayd etildi. Bundan tashqari, 480 nm da past intensivlikdagi qo'shimcha cho'qqi kuzatildi. 382 nm dagi emissiya zonalararo o'tishlar va kislorod vakansiyalari bilan bog'liq bo'lsa, 440 nm dagi nurlanish polimerning π -orbitalari va Cu d-orbitalari o'rtasidagi gibridlanish tufayli paydo bo'lganini ko'rsatadi (8-rasm).



8-rasm. CuO/PPE-2 va PPE-2 anion almashinuvchi materialning fotolyuminescent (PL) spektrlari

CuO nanozarrachalari kiritilishi natijasida PL intensivligining keskin pasayishi qayd etildi. Bu hodisa fotogeneratsiyalangan elektron–kovak juftliklarining rekombinatsiyasi samarali ravishda bostirilganini, interfasial zaryad ajralishi tezligi ortganini va elektron–kovaklarning uzoqroq yashash vaqtiga ega bo‘lganini bildiradi. Bunday materiallar optik va optoelektron xususiyatlar nanokompozitning fotokatalitik va antibakterial jarayonlarda yuqori funksional faollikka ega bo‘lishini ilmiy asosda tasdiqlaydi.

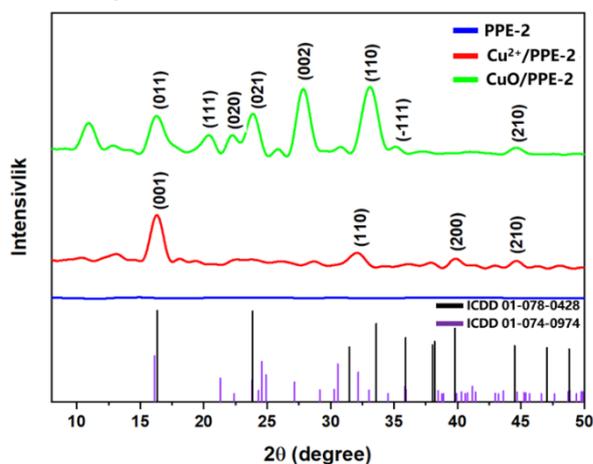
CuO/PPE-2 funksional polimer nanokompozitining sirt morfologiyasi, CuO nanozarrachalarining polimer matritsasida taqsimlanishi hamda element tarkibini o‘rganish uchun SEM va EDX usullari yordamida tadqiq qilindi.



9-rasm. PPE-2 (A) va CuO/PPE-2 (B) funksional materialning SEM mikrofotografiyasi, CuO/PPE-2 (C) funksional materilaning EDX analizi va elementlarni tarqalish xaritasi (D-E)

PPE-2 polimerining SEM mikrografiyalari uning notekis relyefga ega, sferik zarrachalardan tashkil topgan hamda mikro- va mezo-g'ovakli tuzilishga ega ekanini ko'rsatdi. CuO/PPE-2 nanokompozitida esa 20 μm va 300 nm masshtablarda tayoqchasimon shakldagi, 50–200 nm o'lchamli CuO nanozarrachalari qayd etildi. Ular matritsa yuzasida bir tekis taqsimlangan va qisman aglomeratsiyalangan bo'lib, interfeys zonalari hosil qilgan. EDX tahlillari nanokompozit tarkibida asosiy element sifatida Cu (40,3 wt%) mavjudligini ko'rsatdi. Elementlarning fazoviy tarqalish xaritalari CuO zarrachalarining polimer matritsa bo'ylab bir tekis taqsimlanganini tasdiqladi (9-rasm).

CuO/PPE-2 funksional nanokompozit materialning kristall tuzilishi, fazaviy tarkibi, nanozarrachalarning o'lchami va polimer matritsasi bilan o'zaro ta'sirini aniqlash uchun Rentgen Nurlarining Diffraksiyon analizi yordamida o'rganildi. Quyidagi -rasmida CuO va CuO/PPE-2 nanokompozit materialni difraktogrammasi keltirilgan (10-rasm).



10-rasm. CuO/PPE-2 nanomaterialining XRD analizining rentgenodifraktogrammalari

Sintezdan oldin (PPE-2) va keyin (CuO/PPE-2) olingan na'munalarning XRD rentgenogrammalari taqqoslanganda sezilarli farqlar aniqlandi, bu esa CuO zarrachalarining PPE-2 ning mezo- va mikrog'ovaklarida tarqalganligini ko'rsatadi. XRD tahlilida kuzatilgan o'tkir difraksiya cho'qqilari CuO nanozarrachalarining kristall tuzilishga ega ekanligini tasdiqlaydi. Kristallit o'lchami taxminan 32,3 nm, kristallanish darajasi esa 67% deb hisoblandi. Difraksiya cho'qqilari ICDD bazasidagi 01-078-0428 kartasi bilan to'liq mos tushdi.

CuO/PPE-2 nanokompozitining sirt morfologiyasi va g'ovaklik parametrlari azot molekularining (N_2) adsorbsiyasi–desorbsiyasi izotermalari asosida baholandi. BET modeli yordamida hisoblangan natijalarga ko'ra, dastlabki PPE-2 polimerining sirt maydoni 42,6 m^2/g bo'lsa, CuO nanozarrachalari kiritilgandan keyin bu ko'rsatkich 85,3 m^2/g gacha oshdi (H4-tipli gisterezis halqasi). Keng sirt maydoni va mezog'ovakli struktura kombinatsiyasi ifloslantiruvchi moddalar molekularining tez adsorbsiyasini, samarali diffuziyasini ta'minlab, nanokompozitning fotokatalitik va antibakterial faolligini sezilarli darajada ortishi ilmiy asosda isbotlandi.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ nanokompoziti ishtirokida Rodamin B (RhB), Metilen ko'ki bo'yog'i (MB), Parasetamol analgetigining hamda CuO/PPE-2 nanokompozitining tetrasiklin (TC) antibiotigiga nisbatan fotodegradatsiyasi quyosh nuri ta'sirida samarali fotokatalitik parchalanishi o'rganildi (jadval-1).

Fe₃O₄/PPE-2 va CuO/PPE-2 nanokompozitlarining organik ifloslantiruvchilarga nisbatan qiyosiy fotokatalitik faolligi

Organik ifloslantiruvchilar	λ , nm	Konsentratsiya	Kinetik konstanta k_1 (g/mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ² qiymati	kinetik model	Parchalanish vaqt (min)	Degradatsiya unumi	Funksional material
RhB	554	100 mg/l	0.02501	0.9355	pseudo birinchi tartibli	180	98,2	Fe ₃ O ₄ /PPE-2
MB	664	100 mg/l	0,0137	0,9563	pseudo birinchi tartibli	140	96	
Parasetamol	236	50 mg/l	0.01276	0.9275	pseudo birinchi tartibli	160	85	
TC	358	100 mg/l	0,90951	0,93748	pseudo birinchi tartibli	200	98	CuO/PPE-2

CuO/PPE-2 funksional nanokompozitining gram-manfiy bakteriyalar – *Escherichia coli* va *Pseudomonas aeruginosa* – ga nisbatan yuqori antibakterial faollikka ega ekani aniqlandi (jadval-2).

***E. coli* va *P. aeruginosa* bakteriyalariga qarshi CuO/PPE-2 hamda Cu²⁺/PPE-2 materiallarining antibakterial faolligi**

Funksional polimer material	FMni tayyorlash sharoitlari	antibakterial zona diametri (mm±SD)	
		<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
Cu ²⁺ /PPE-2	0.1 mol/L	14± 0.5	15± 0.5
CuO/PPE-2	0.1 mol/L	20± 0.5	23± 0.5
CuO/PPE-2	150°C	26± 0.5	35± 0.5

Dissertatsiyaning “**Tajriba qism**” deb nomlangan **to‘rtinchi bobida** tadqiqot ishida qo‘llanilgan reaktivlarning tavsifi, polimerlarda kimyoviy o‘zgarishlar olib borish usullari, funksional polimer materiallar va ular asosida Fe₃O₄/PPE-2 va CuO/PPE-2 nanokompozit materiallarni sintez qilish tadqiqot uslublari keltirilgan.

XULOSALAR

1. Ilk bora polivinilxlorid asosida olingan PPE-2 anion almashinuvchi material sirtida Fe₃O₄ nanokristallari hosil bo‘lish sharoitlarini eritma pH muhiti, sintez jarayoni harorati, hamda reaksiya davomiyligini o‘zgartirish orqali polimer matritsa

sirtida 200-400 nm o'lchamdagi nanosferik (FM140), 50-200 nm o'lchamdagi nanokubsimon hamda (FM160), 5-25 nm o'lchamdagi nanosterjen (FM180) kristallari hosil bo'lishining maqbul sharoitlarini aniqlash imkonini yaratdi.

2. Ilk bora polivinilxlorid asosidagi anion almashinuvchi material sirtida CuO nanokristallarini hosil qilishda maqbul sharoitlar eritma pH muhiti 10, sintez jarayoni harorati 150 °C, hamda reaksiya davomiyligi 10 soat orqali yuqori fotokatalitik va antibakterial xossali multifunksional CuO/PPE-2 polimer nanokompozit material sintez qilish imkonini berdi;

3. Sintez qilingan multifunksional Fe₃O₄/PPE-2 va CuO/PPE-2 nanokompozit materiallarni IQ, Raman, UB-ko'rinuvchi, PL spektraskopiyalar yordamida polimer nanokompozit materillarni tuzilishini identifikatsiya qilish orqali, polimer matritsasidagi amino guruhlarining, polimer sirtida metal oksid nanokristallari hosil bo'lishiga ta'sir qilishi hamda nanokristallarni stabillashda ishtirok etishini aniqlash imkonini berdi.

4. Olingan multifunksional Fe₃O₄/PPE-2 va CuO/PPE-2 nanokompozit materiallarni SEM, XRD, TGA, DSC, BET va BJH analiz usullari yordamida struktur morfologiyasini identifikatsiyalash orqali, polimer matritsa sirtida turli o'lcham va truli shakildagi metal nanokristallari mavjudligi hamda ularning mezog'ovak tuzulishga ega ekanligi va polimer matritsada metal oksid nanokristallarining hosil bo'lishi materiallarning termik barqarorligini ortishiga olib kelishi tasdiqlandi.

5. Multifunksional Fe₃O₄/PPE-2 polimer nanokompozit materiallarning zararli organik birikmalar Rodamin B organik bo'yog'i hamda, Parasetamol analgetigiga nisbatan fotokatalitik xossalarini tekshirish orqali polimer matritsa sirtida 5-15 nm o'lchamdagi magnetit Fe₃O₄ nanorood kristallarni (FM180) saqlagan funksional materialning fotokatalitik parchalash samaradorligi 98,2% va 85% mos ravishda ekanligi aniqlandi. Shuningdek multifunksional FM180 nanokompozit materialining takror qo'llanilish samaradorligi 10 va 5 sikldan keyin bor-yo'g'i mos ravishda 3,2% va 2,3% ga kamayganligi ko'rsatildi;

6. Polivinilxlorid, karbamid va mis tuzi asosidagi multifunksional CuO/PPE-2 polimer nanokompozit material TC antibiotigini 98.2% samara bilan fotokatalitik parchalaganligi hamda, E.coli va P.ariginoza bakterialariga nisbatan mos ravishda 26 mm va 35 mm antibakterial zonaga egaligi CuO/PPE-2 polimer nanokompozit materialning samarali fotokatalitik hamda, antibakterial xossaga ega ekanligini aniqlash imkonini berdi.

7. Polivinilxlorid, karbamid va temir tuzlari asosida sintez qilingan multifunksional Fe₃O₄/PPE-2 (FM 180) polimer nanokompozit materiali yordamida "Gurlan Global Teks" MChJ hududida joylashgan paxta tolasiga ishlov berish jarayonida ajralib chiqqan oqava suvlarini tozalash inshootida oqava suvlari tarkibidagi zaharli Rodamin B organik bo'yogidan samarali fotokatalitik parchalab tozalash uchun tavsiya etildi va joriy qilindi.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПРИ НАУЧНОМ СОВЕТЕ
DSc.03/30.12.2019.K.01.03 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

ЭШТУРСУНОВ ДАВРОН АБДИСАМАТОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ
НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРОВ И ИХ СВОЙСТВА**

02.00.06 – Высокомолекулярные соединения

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

Ташкент-2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по химическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инновации Республики Узбекистан под номером B2024.1.PhD/K726

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках [узбекский, русский, английский (резюме)] размещен на веб-странице по адресу www.ik-kimyo.nuu.uz и информационно-образовательном портале «ZiyoNET» по адресу www.ziyo.net.uz.

Научный руководитель:

Бекчанов Давронбек Жумазарович
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Юнусов Хайдар Эргашович
доктор технических наук, профессор

Ишанкулов Алишер Фармонович
доктор философии по химии, доцент

Ведущая организации:

Институт общей и неорганической химии

Защита диссертации состоится 21 октября 2025 г. в 15:00 часов на заседании разового научного совета при Научном совете PhD.03/30.12.2019.K.01.03 при Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, 4. Тел.: (998 71) 246-07-88; (998 71) 227-12-24, факс: (+99871) 246-53-21; 246-02-24, e-mail: ilmiy_kengash@nuu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Национального университета Узбекистана (зарегистрирован за № **161**) (Адрес: 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, 4. Тел.: (+99871) 246-67-71; 227-12-24; факс: (+99871) 246-53-21; 246-02-24, e-mail: rector@nuu.uz).

Автореферат диссертации разослан « ____ » октября 2025 г.
(протокол рассылки № 22 от « ____ » октября 2025 г.).




З.А. Сманова
Председатель разового
научного совета по
присуждению учёной степени
доктора наук, д.х.н., профессор


Н.Х. Кутлимуратова
Ученый секретарь разового
научного совета по
присуждению учёной степени
доктора наук, д.х.н., профессор


М.Г. Мухамедиев
Председатель разового научного
семинара при научном совете по
присуждению учёной степени
доктора наук, д.х.н., профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В современном мире стремительный рост потребности в высокоэффективных, экологически безопасных и функциональных материалах для ведущих отраслей экономики, таких как промышленность, энергетика и здравоохранение, обуславливает актуальность проводимых исследований. На фоне увеличения численности населения и усложнения технологических процессов особое значение приобретают материалы на основе наночастиц, которые рассматриваются в качестве альтернативных решений. В данном контексте полимерные нанокомпозиты, сочетающие свойства органических и неорганических компонентов, обладают значительными преимуществами для применения в задачах контроля загрязнений, доставки лекарственных препаратов, создания сенсоров и фотокатализаторов. Высокая механическая и термическая стабильность, химическая адаптивность, селективная адсорбция, каталитическая активность, а также возможность повторного использования обеспечивают полимерным нанокомпозитам широкий спектр практических применений в глобальном масштабе.

В мире последовательно расширяются научные исследования, направленные на модификацию синтетических полимеров и синтез многофункциональных полимер-металлических нанокомпозитов, обладающих совокупностью функциональных свойств. В частности, полимеры на основе виниловых мономеров подвергаются структурной модификации посредством нуклеофильного замещения, ковалентного связывания или химической модификации с целью образования активных центров, на поверхность которых с помощью метода осаждения формируются наночастицы оксидов металлов. Полученные таким образом многофункциональные (оптически, каталитически и биологически активные) композитные системы отличаются повышенной химической и термической стабильностью, улучшенной дисперсностью металлических частиц и усиленной фотокаталитической активностью, что придаёт им значительное научно-практическое значение. Одновременно особое внимание уделяется применению современных физико-химических методов анализа для глубокого изучения их химического состава и структуры, что позволяет определить механизм синтеза и оптимальные технологические параметры формирования нанокомпозитов. Такой подход способствует пониманию молекулярных механизмов взаимодействия в полимер-нанокомпозитных системах, оценке их энергетической устойчивости и созданию теоретической базы для разработки нового поколения экологичных, биосовместимых и энергоэффективных материалов. В связи с этим научные исследования, проводимые в данном направлении, обладают важным научным значением.

В Республике Узбекистан одной из приоритетных задач современного этапа развития является экологически безопасная очистка сточных вод, образующихся в результате деятельности текстильной и фармацевтической промышленности, от органических загрязняющих веществ. В «Стратегии

развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»³, особое внимание уделено обеспечению экологической безопасности путём переработки отходов и внедрения современных технологий. В этом контексте проведение научных исследований, направленных на создание функциональных материалов с высокой добавленной стоимостью, обладающих высокой селективностью, возможностью повторного использования, низкой себестоимостью и экологической безопасностью на основе местного сырья, приобретает важное значение.

Данное диссертационное исследование в определённой степени способствует реализации задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ–60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Указом Президента Республики Узбекистан от 30 октября 2019 года № ПФ–5863 «Об утверждении Концепции охраны окружающей среды Республики Узбекистан до 2030 года», Указом Президента Республики Узбекистан от 30 января 2025 года № ПФ–16 «О Государственной программе по реализации Стратегии “Узбекистан – 2030” в Год охраны окружающей среды и “зелёной экономики”», а также другими нормативно-правовыми актами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики: VII. Химические технологии и нанотехнологии.

Степень изученности проблемы. В мировой научной литературе ведутся систематические исследования по созданию функциональных материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ). В частности, такие исследователи, как S. Marian, M. Herrero, P. Jia, A. Rodionova, M. Wang, S. Allan, H. Khdir, A. Roudman, W. Chaisriratanakul, P. Zuo, R. Wang, J. Verdu, H. Reinecke, J. Koo, Z. Shifrina, A. Ghazzy, M. Bustamante-Torres, T. Druffel, E. Morici, A. Kockmann, Z. Wang, Sh. Lawaniya, J. Zhang, K. Günay, T. Netke и др. занимались улучшением физико-химических и структурных свойств ПВХ путём его химической модификации и расширением областей практического применения. Основное внимание в их работах уделялось реакциям нуклеофильного замещения, процессам пластификации, поверхностной модификации, а также иммобилизации с кристаллами металлов и оксидов металлов для получения различных композитных систем.

Учёные Республики Узбекистан – У.Н. Мусаев, М.А. Аскар, С.Ш. Рашидова, Х.Т. Шарипов, М.Г. Мухамедиев, Т.М. Бабаев, Т.Х. Рахимов, О.Н. Рузимуродов, Д.Ж. Бекчанов, Д.А. Гафурова, Н.Т. Каттаев и др. – также внесли значительный вклад в развитие полимерной химии, исследование функциональных полимеров и их нанокомпозитов, синтез сорбентов и ионитов. В их работах особое внимание уделялось модификации ПВХ реагентами, содержащими аминогруппы, синтезу катион- и анионообменных

³ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 “О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы”

материалов, а также изучению их сорбционных и комплексообразующих свойств.

Однако анализ существующей научной литературы показывает, что пока недостаточно систематически исследованы вопросы модификации гранулированного промышленного ПВХ нуклеофильными модификаторами с целью введения функциональных групп, синтеза на их основе полимерных нанокомпозитов с закреплёнными наноразмерными частицами оксидов металлов, обладающих высокой поверхностной активностью и фотокаталитической эффективностью, а также установления взаимосвязи «структура–свойства». В связи с этим в настоящей диссертационной работе ставилась цель восполнить данный научный пробел посредством синтеза функциональных нанокомпозитов на основе поливинилхлорида и комплексного анализа их структурных, морфологических и фотохимических свойств.

Связь темы диссертации с планом научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Национального университета Узбекистана в рамках прикладного проекта AL-552101242 «Синтез новых ионитов на основе поливинилхлорида, содержащих аминные и гидроксильные группы, и их применение для очистки сточных вод от ионов Cr(VI)» (2022–2025 гг.).

Целью исследования заключалась в формировании наноразмерных частиц металлов на поверхности полимеров и изучении их свойств.

Задачи исследования:

определение оптимальных условий синтеза магнитного многофункционального полимерного нанокомпозита Fe₃O₄/PPE-2;

исследование закономерностей синтеза функционального полимерного нанокомпозита CuO/PPE-2;

идентификация состава, строения и структурно-морфологических характеристик функциональных полимерных нанокомпозитов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2;

изучение фотокаталитических свойств многофункциональных полимерных нанокомпозитов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2 по отношению к вредным органическим соединениям;

определение антибактериальной активности функционального полимерного нанокомпозита CuO/PPE-2;

выявление областей применения новых функциональных полимерных нанокомпозитных материалов.

Объектом исследования являлись: местное сырьё – поливинилхлорид, модифицирующий реагент – мочевины, соли металлов (Fe²⁺, Fe³⁺, Cu²⁺) для создания функциональных нанокомпозитных материалов, а также красители-текстильные загрязнители, фармацевтические препараты и патогенные микроорганизмы для проведения адсорбционно-фотокаталитических и антимикробных исследований.

Предметом исследования служили: анионообменный материал (PPE-2),

полученный на основе модификации поливинилхлорида (ПВХ) карбамидом, а также синтезированные на его основе методом осаждения оксидов металлов функциональные нанокompозиты Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2. Основное направление исследования составляют их структурно-морфологические и физико-химические свойства, механизмы фотокаталитической активности и антибактериальная эффективность.

Методы исследования. В ходе исследования были применены современные теоретические и экспериментальные методы химического анализа. Для установления структуры, состава и морфологических свойств модифицированного полимера и полученных нанокompозитных материалов использовались методы FTIR, Raman, SEM, EDX, XRD, XRF, DLS и масс-спектрометрии. Для оценки термической стабильности и фазовых превращений применялись TG и DSC анализы, а для изучения оптических и электронных свойств – методы УФ-видимой (UV-Vis) и фотолюминесцентной (PL) спектроскопии. Фотокаталитическая эффективность и кинетические параметры определялись в условиях фотореактора с использованием моделей Ленгмюра–Хиншельвуда и псевдопервого порядка.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые на поверхности анионообменного материала PPE-2, синтезированного на основе поливинилхлорида, методом осаждения в гидротермальных условиях были получены нанокристаллы Fe₃O₄ и CuO;

впервые установлено, что с использованием нанокompозитного материала Fe₃O₄/PPE-2, синтезированного при 180 °С в течение 8 часов, обеспечивается эффективная фотокаталитическая деградация токсичного органического красителя родамина В (20 мг/10 мл раствора), содержащегося в сточных водах текстильной промышленности: под действием солнечного излучения при рН = 6,5–7,5 в течение 180 минут достигалось до 98,2% разложения. Кинетический анализ процесса показал, что константа скорости реакции составляет 0,027 мин⁻¹;

впервые экспериментально доказано, что морфология нанокристаллов оксидов металлов на поверхности синтезированных нанокompозитов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2 оказывает прямое влияние на их фотокаталитические и оптические свойства;

впервые установлено, что нанокompозит CuO/PPE-2 проявляет выраженное бактерицидное действие в отношении клинически значимых антибиотикорезистентных штаммов патогенных бактерий *E. coli* и *P. aeruginosa* при 36 °С в течение 24 часов;

определено, что нанокompозиты, синтезированные с участием ионогенных и комплексообразующих групп полимера, обладают более высокой дисперсностью, структурной стабильностью, фотокаталитической активностью и антибактериальными свойствами по сравнению с чистыми нанокристаллами оксидов металлов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана технология синтеза наночастиц Fe₃O₄ и CuO на поверхности модифицированного функционального полимерного материала на основе

поливинилхлорида методом осаждения в гидротермальных условиях. В процессе синтеза нанокompозитов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2 изучено влияние параметров среды: pH (pH = 10), температуры кальцинации (180 °C и 150 °C), продолжительности кальцинации (8 и 10 часов), а также условий сушки (80 °C в течение 12 часов) на формирование нанокристаллов, выбраны оптимальные условия синтеза;

впервые на поверхности ионообменных полимеров в соответствии с принципами «зелёной химии» синтезированы нанокompозиты с мультифункциональными свойствами, изучены их фотокаталитические и антибактериальные характеристики. Установлено, что фотокаталитическая активность нанокompозита Fe₃O₄/PPE-2 по отношению к органическому красителю родамину В достигает 98,2% при коэффициенте скорости реакции 0,027 мин⁻¹. Нанокompозит CuO/PPE-2 проявил выраженные антибактериальные свойства в отношении штаммов *E. coli* и *P. aeruginosa*;

синтезированный нанокompозитный материал Fe₃O₄/PPE-2 прошёл испытания на очистных сооружениях ООО «Gurlan Global Teks». При фотокаталитическом процессе наблюдалась деградация органического красителя родамина В, достигавшая 98,2% эффективности. Для идентификации конечных продуктов образцы были проанализированы методом масс-спектрометрии, что подтвердило полную минерализацию процесса с образованием CO₂ и H₂O;

разработанные в ходе исследования недорогие, эффективные и экологически безопасные нанокompозитные сорбенты и фотокатализаторы рекомендованы в качестве перспективных практических решений для охраны окружающей среды, в частности для обезвреживания фармацевтических препаратов и красителей в сточных водах.

Достоверность полученных результатов исследования. Научные результаты, полученные в диссертационной работе, обоснованы с использованием современных высокоинформативных физико-химических методов анализа. Состав, строение, морфология и свойства полимерных нанокompозитов определены с применением инфракрасной спектроскопии (FTIR), спектроскопии комбинационного рассеяния (Raman), УФ–видимой (UV–Vis) и фотолюминесцентной (PL) спектроскопии, термогравиметрического (TG) и дифференциально-сканирующего калориметрического (DSC) анализа, рентгеноструктурного анализа (XRD), энергодисперсионного анализа (EDX), сканирующая (SEM) электронная микроскопия, а также масс-спектрометрии (MS). Фотокаталитические и ионообменные процессы исследованы на основе кинетических моделей Лэнгмюра–Хиншелвуда и псевдо-первого порядка. Теоретические и экспериментальные результаты обработаны методами математико-статистического анализа и подтверждены достоверными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования:

Научная значимость проведённых исследований заключается в том, что определение оптимальных условий образования наночастиц оксидов металлов на поверхности гранулированных ионообменных материалов в гетерогенной

среде позволило выявить закономерности формирования их свойств и показало возможность синтеза функциональных полимерных материалов с выраженной фотокаталитической активностью.

Наночастицы оксидов металлов, осаждённые на поверхности ионообменных материалов, имеют средний размер 50–100 нм, что обеспечивает более высокую удельную поверхность по сравнению с их микроаналогами и, соответственно, повышенную реакционную активность. Были определены технологические параметры дешёвых и эффективных методов синтеза наночастиц Fe_3O_4 и CuO на поверхности функциональных полимеров для получения фотокаталитически активных материалов. С учётом принципов «зелёной химии», синтезированные наноструктурированные полупроводниковые материалы и их композиты представляют собой перспективные объекты для очистки сточных вод от органических загрязнителей.

Практическая значимость результатов заключается в следующем: синтезированный анионообменный материал PPE-2 и полученные на его основе функциональные полимерные нанокомпозиты могут применяться для удаления из промышленных сточных вод различных токсичных органических и биологических загрязнителей, а также для решения проблемы утилизации отработанных ионитов посредством разработки простого и дешёвого метода получения фотокатализаторов. Синтез нанокомпозитов на основе функциональных полимерных материалов не требует применения вакуума или инертной атмосферы, что упрощает технологическую схему и обеспечивает возможность масштабного промышленного внедрения.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по синтезу, морфологии и фотокаталитическим свойствам функциональных нанокомпозитов на основе поливинилхлорида (ПВХ), модифицированных частицами Fe_3O_4 и CuO :

– научные данные, характеризующие состав, структуру, фотокаталитическую активность и регенерационные свойства полимерного нанокомпозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, были использованы в трёх зарубежных научных журналах с высоким импакт-фактором: *Sustainability* (2025, Vol. 17, No. 9, p. 4084; IF 3.3), *Reactive and Functional Polymers* (2025, Vol. 216, Article 106457; IF 5.1), *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (2025, Vol. 6, Article 100835; IF 5.4). В результате данный нанокомпозит был охарактеризован как высокоэффективный фотокатализатор при деградации красителя родамин В, что послужило научной основой для создания экологически безопасных и перерабатываемых функциональных материалов.

– функциональный полимерный нанокомпозит внедрён в практику на предприятии ООО «Gurlan Global Tekс» (справка Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан № 03-03/1-03/3-3815 от 21.04.2025 г.). Внедрение материала обеспечило эффективное удаление токсичных примесей из сточных вод предприятия.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 14 научных конференциях, в том числе на 6

международных и 8 республиканских научно-практических форумах.

Опубликованность результатов исследования. По материалам диссертационной работы опубликовано всего 22 научных трудов, из них 4 статьи – в республиканских изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание степени доктора философии (PhD), и 4 статьи (в том числе 3 в базе Scopus) – в зарубежных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Объём диссертации составляет 120 страниц.⁴

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, а также объекты и предмет исследования, приведено соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснованы достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость результатов диссертации, даны сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Получение нанокompозитов на основе функциональных полимерных материалов и их свойства»** (обзор литературы) – проводится анализ научных публикаций по теме исследования. Показано, что гидроксильные, карбоксильные, аминные и тиольные группы функциональных полимеров определяют их физические, химические и биологические свойства. Научно обосновано, что данные функциональные группы играют ключевую роль в формировании селективности, каталитической активности, а также электрических и оптических характеристик. Отмечено, что взаимодействие полимеров с наночастицами посредством модификации структуры позволяет создавать новые функциональные нанокompозиты. Рассмотрены методы их получения – золь-гель, «зелёный» синтез, соосаждение и гидротермальный способ, проведено сравнение их преимуществ и экологических ограничений. Установлено, что нанокompозиты на основе оксидов металлов (TiO_2 , ZnO , Fe_3O_4 , CuO) обладают улучшенными механическими, электрическими, оптическими и каталитическими свойствами. Кроме того, раскрыты перспективы практического применения данных материалов в сенсорных технологиях, биомедицине, области накопления энергии и катализа. На основании анализа подтверждена эффективность нанокompозитов в решении экологических задач, в частности, их высокие преимущества в очистке воды от органических загрязнителей.

⁴ Автор выражает искреннюю благодарность доктору химических наук, профессору Мухамедиеву М.Г. за научные консультации при выполнении диссертационной работы.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Закономерности получения нанокompозитов на основе функциональных полимерных материалов**», изучены структурные особенности и физико-химические свойства анионообменного полимерного материала PPE-2, синтезированного на основе поливинилхлорида (ПВХ). На основе данного полимера проведён синтез функциональных нанокompозитов, модифицированных наночастицами оксидов железа (Fe_3O_4) и меди (CuO), а также исследованы закономерности их формирования.

Магнитный полимерный нанокompозит $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ был получен методом соосаждения в две стадии: на первом этапе осуществлялась адсорбция ионов металлов на поверхности полимера, на втором – в щелочной среде проводилось осаждение и кристаллизация частиц Fe_3O_4 . Влияние температуры на размер наночастиц оксида железа, распределённых на поверхности материала, представлено на рис. 1.

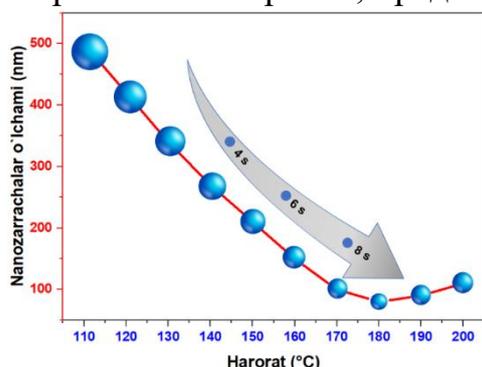


Рис. 1. Зависимость влияния температуры на размер наночастиц Fe_3O_4 на поверхности функционального полимерного нанокompозита

Оптимальные условия синтеза магнитного нанокompозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ определены следующим образом: соотношение солей $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+} = 1:2$, pH = 10, температура $T = 180^\circ\text{C}$, продолжительность процесса – 8 часов. В этих условиях на поверхности полимера формировались равномерно распределённые стержневые наночастицы Fe_3O_4 размером 5–25 нм, обладающие высокой магнитной активностью (рис. 2).

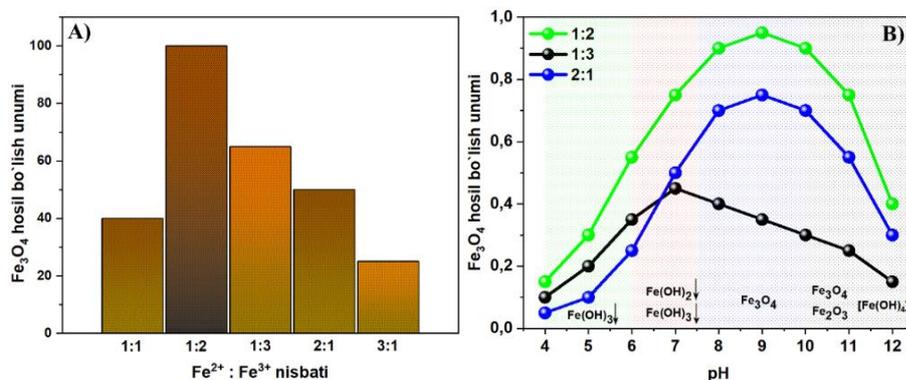


Рис. 2. (А) Зависимость синтеза магнититовых наночастиц в составе функционального полимерного материала от соотношения ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} ; (В) Влияние pH среды на образование магнититовых наночастиц

Комплексный анализ исходного анионита (PPE-2) и нанокompозита ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$) методами ИК-, Раман-спектроскопии, SEM, EDX и XRD

подтвердило равномерное распределение наночастиц Fe_3O_4 в полимерной матрице, их малый размер, а также наличие фазы Fe_3O_4 на поверхности полимера.

Процессы синтеза нанокompозита $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ были всесторонне изучены. Нанокompозит получен в два этапа. На первом этапе в полимерную матрицу PPE-2 адсорбировались ионы Cu^{2+} из растворов $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Кинетика и изотермы адсорбции исследовались в температурном интервале 293–313 К, при различной продолжительности процесса (2–10 ч) и концентрациях (0,0125–0,1 моль/л). Наиболее высокая эффективность адсорбции зафиксирована при 313 К, концентрации 0,1 моль/л и времени 10 ч. Емкость адсорбции составила 248 мг/г, что было определено как оптимальные условия для последующего этапа синтеза. На втором этапе адсорбированные на поверхности полимера ионы Cu^{2+} подвергались осаждению путём добавления раствора NH_4OH (1 моль/л) при 60 °С до достижения рН 8–9, в результате чего образовывались осадки $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Полученный осадок подвергался гидротермальной обработке при различных температурах (110 °С, 130 °С и 150 °С) и временах выдержки (6, 8 и 10 ч). В итоге на поверхности полимерной матрицы формировались устойчиво распределённые наночастицы CuO .

В третьей главе диссертации **«Физико-химические свойства функциональных полимерных нанокompозитов»** исследованы химическое строение, морфологические свойства поверхности функциональных полимерных материалов $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ и $\text{CuO}/\text{PPE-2}$, а также их фотокаталитическая активность по отношению к органическим красителям (RhB, MB), антибиотикам (тетрацилин, парацетамол) и антибактериальные свойства в отношении патогенных бактериальных штаммов.

Целью получения ИК- и Раман-спектров функционального материала $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ являлось определение природы связей и функциональных групп, а также характера взаимодействия между наночастицами Fe_3O_4 и полимерной матрицей. В ИК-спектрах полимера PPE-2 валентные колебания –NH-группы наблюдались в области 3340–3430 cm^{-1} в несколько уширенном диапазоне и с высокой интенсивностью. Деформационные колебания фиксировались при 2925 cm^{-1} (растяжение – CH_2), 1630–1665 cm^{-1} (–C=N группы), а также в интервале 1030–1150 cm^{-1} , соответствующем –C–N и –C–O связям. На основе ИК-спектров выявлено смещение полос, характерных для –NH, –OH, C=N и C–N групп, а также появление новых колебаний Fe–O в диапазоне 580–620 cm^{-1} , что свидетельствует о формировании координационных связей ионов Fe^{3+} с аминогруппами полимера. Раман-спектроскопия показала характерные для кристаллов Fe_3O_4 колебательные моды: A_{1g} (776 cm^{-1}) и T_{2g} (560 и 490 cm^{-1}), что подтверждает высокую степень кристалличности материала.

С целью оценки характеристик светопоглощения, оптической активности и ширины запрещённой зоны (band gap) функционального нанокompозитного материала $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ был проведён спектроскопический анализ в области ультрафиолет–видимого излучения (UV–Vis). В спектре исходного полимера PPE-2 основной полоса поглощения зафиксирован при

длине волны 370 нм, что соответствует $\pi \rightarrow \pi^*$ электронным переходам. При модификации PPE-2 наночастицами Fe_3O_4 наблюдается смещение максимума поглощения в область 350–370 нм, а также общее увеличение интенсивности поглощения. Особенно образец FM180 продемонстрировал максимальный пик поглощения в УФ-области составляет 355 нм, что свидетельствует о повышенной оптической активности наночастиц Fe_3O_4 при повышении температуры синтеза. В видимой области спектра у образцов FM160 и FM180 выявлено усиление поглощения в диапазоне 420–550 нм, что связано с d–d переходами, характерными для магнетитной фазы Fe_3O_4 , и свидетельствует об активности нанокompозита в видимой области спектра.

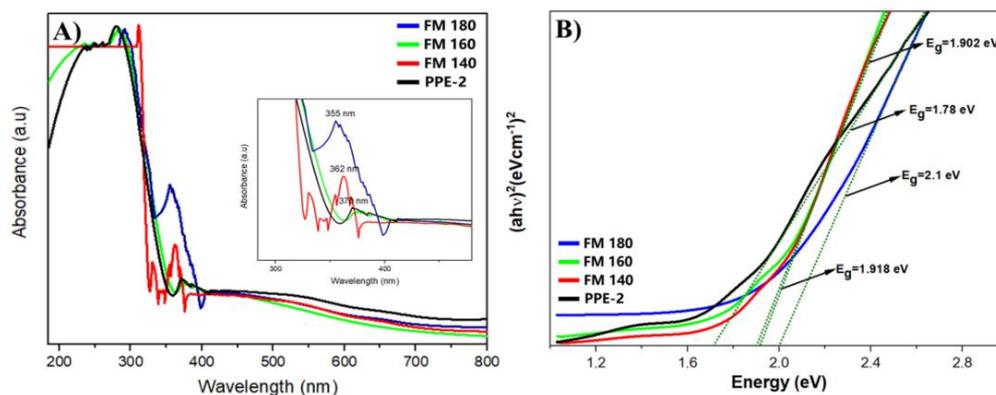


Рис. 3. Спектроскопические изображения образцов, модифицированных PPE-2 и Fe_3O_4 (а (FM140) б (FM160) в (FM180)) UV–Vis

Получены следующие значения величины ширины запрещенной зоны: для PPE-2: 1,78 эВ, FM140: 2,1 эВ, FM160: 1,918 эВ, FM180: 1,902 эВ (рис.3). Образец FM180 имеет наименьшую ширину запрещенной зоны, что обеспечивает легкое разделение электрон–дырочных пар, эффективное поглощение света и высокую активность в фотокаталитических процессах.

Для оценки оптоэлектронных характеристик функционального нанокompозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, скорости рекомбинации фотогенерированных электронно–дырочных пар и оптоэлектронных факторов, влияющих на фотокаталитическую активность, был проведен спектроскопический анализ фотолюминесценции (PL). В PL-спектре полимера PPE-2 зафиксированы широкие полосы излучения в диапазоне 443–520 нм (рис. 4), что связано с рекомбинацией экситонов в полимерной матрице и подтверждает относительно низкую фотопоглощающую способность материала.

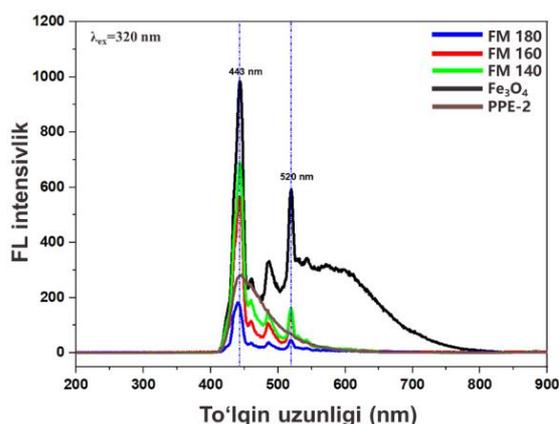


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции (PL) нанокompозитов PPE-2, Fe_3O_4 и $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ а (FM140), б (FM160), в (FM180)

В нанокompозитах с Fe_3O_4 наблюдалось снижение интенсивности PL. Так, у образца FM140 интенсивность PL была несколько ниже по сравнению с PPE-2, у FM160 – ещё более сниженной, а у FM180 регистрировались минимальные значения. Наименьшая амплитуда PL-пигов у FM180 свидетельствует о том, что кристаллические частицы Fe_3O_4 эффективно подавляют рекомбинацию электрон–дырочных пар.

Таким образом, нанокompозиты $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, и в особенности образец FM180, характеризуются эффективным поглощением света, узкой запрещённой зоной и низкой скоростью рекомбинации, что экспериментально подтверждает их высокую фотокаталитическую активность.

Для изучения морфологии поверхности и элементного состава нанокompозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ были проведены анализы SEM и EDX. Установлено, что в результате гидротермального синтеза при температурах 140 °C (4 часа), 160 °C (6 часов) и 180 °C (8 часов) наблюдаются существенные различия в размере и форме частиц.

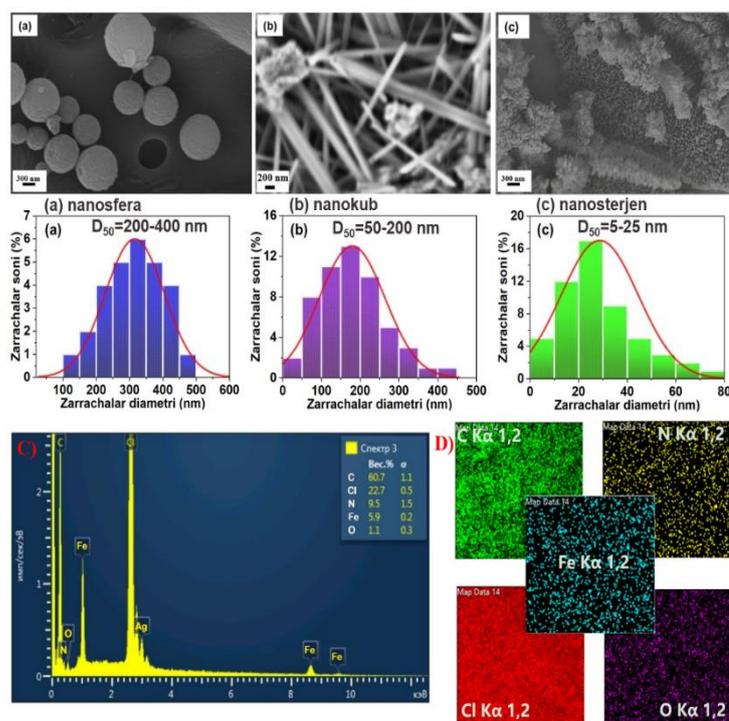


Рис. 5. SEM-микрофотографии $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, синтезированного при различных температурах и временах: (а) FM140, (б) FM160, (с) FM180; результаты EDX-анализа и карты распределения элементов функционального полимерного нанокompозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$

На SEM-микрографиях установлено, что в образце FM140 присутствуют наносферические частицы Fe_3O_4 размером 200–400 нм, в образце FM160 – нанокубические частицы 50–200 нм, тогда как в образце FM180 наблюдаются наностержни размером 5–25 нм (рис. 5 а, б, с). Повышение температуры синтеза сопровождалось уменьшением размеров частиц и увеличением их дисперсности, при этом в образце FM180 частицы распределены более равномерно, но склонны к агрегации. Выявленные интерфейсные зоны между

частицами указывают на наличие электростатических и донорно-акцепторных взаимодействий между аминогруппами полимера и наночастицами Fe_3O_4 .

По данным EDX-анализа, в образце FM180 содержание элемента Fe составило 5,9%. Карты распределения показали равномерное пространственное распределение элементов Fe и N, что подтверждает формирование прочных электростатических и координационных связей между матрицей PPE-2 и наночастицами Fe_3O_4 . Полученные результаты свидетельствуют об оптимальности выбранных условий гидротермального синтеза и эффективной интеграции наночастиц в полимерную матрицу.

Для определения степени кристаллизации, фазовой структуры и размеров частиц нанокompозитов $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ был проведён рентгенодифракционный (XRD) анализ. Метод XRD позволил идентифицировать кристаллические фазы наноматериалов, оценить степень их структурной упорядоченности, а также рассчитать размеры частиц по уравнению Дебая–Шеррера (рис. 6).

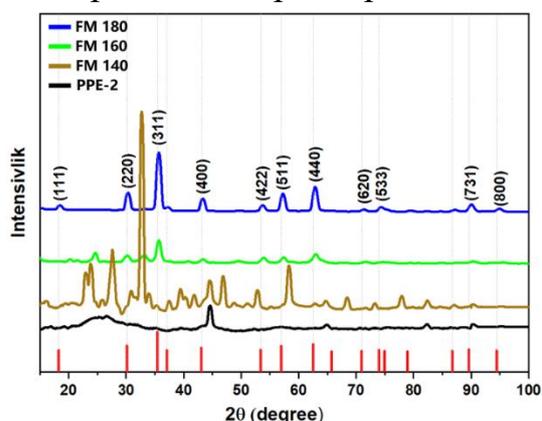


Рис. 6. Рентгенодифрактограммы наноматериала $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$

Исследованные образцы (FM140, FM160, FM180) характеризовались чёткими и интенсивными дифракционными пиками, что подтверждает успешное формирование кристаллов Fe_3O_4 . В частности, в спектре образца FM140 пики при углах $2\theta = 27,25^\circ$, $45,25^\circ$ и $57,28^\circ$ соответствуют плоскостям (220), (311) и (511) кристаллической фазы Fe_3O_4 (JCPDS 85-1436). Для образца FM160 дифракционные пики при $2\theta = 30,3^\circ$, $35,6^\circ$, $43,28^\circ$, $53,6^\circ$, $57,18^\circ$ и $62,8^\circ$ идентифицируются как плоскости (220), (311), (400), (422), (511) и (440) соответственно. Наиболее выраженную кристаллическую структуру показал образец FM180, в спектре которого в интервале $2\theta = 18,51^\circ$ – $94,9^\circ$ зарегистрировано более 10 интенсивных пиков, соответствующих плоскостям (111), (220), (311), (400), (422), (511), (622), (731) и (800). Согласно расчётам по уравнению Дебая–Шеррера, средний размер частиц составил: для FM140 – 48 нм, FM160 – 38 нм и FM180 – 18 нм. Таким образом, установлено, что с повышением температуры синтеза размеры наночастиц Fe_3O_4 уменьшаются, возрастает их дисперсность, что, в свою очередь, приводит к увеличению удельной поверхности частиц.

Параметры поверхности нанокompозита $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$, такие как удельная поверхность, объём и диаметр пор, были исследованы методом адсорбции азота (N_2), а также оценивалось прямое влияние этих параметров на фотокаталитическую активность. Согласно расчётам на основе моделей ВЕТ и ВЛН, установлено, что с повышением температуры синтеза удельная

поверхность нанокompозита увеличивается до 28,48 м²/г, а диаметр пор находится в диапазоне 13–22 нм, что соответствует мезопористой структуре. В частности, образец FM180 характеризуется широкой удельной поверхностью, высокой пористостью и петлей гистерезиса типа H4. Указанные морфологические особенности обеспечивают лёгкое проникновение молекул-загрязнителей внутрь нанокompозита, эффективную диффузию и, как следствие, высокую фотокаталитическую активность.

Были проведены инфракрасные (ИК) и рамановские спектроскопические исследования для определения химической структуры, молекулярных взаимодействий и структурных изменений нанокompозитов PPE-2 и CuO/PPE-2. Спектральные анализы показали смещения и изменения интенсивности колебаний групп N–H, C–H, C–N и C–Cl, что подтверждает координационное связывание ионов Cu²⁺ с аминогруппами. Кроме того, появление новых колебаний при 840, 570 и 430 см⁻¹, характерных для связей Cu–O, свидетельствует о формировании CuO в моноклинной фазе. Эти изменения подтверждают успешное образование наночастиц CuO в составе композита и их значительное влияние на структуру полимера.

Анализ UV–Vis спектров проводился в диапазоне 200–800 нм, при этом пики поглощения света для образцов PPE-2, Cu²⁺/PPE-2 и CuO/PPE-2 были зафиксированы соответственно при 372 нм, 362 нм и 366 нм. Значения ширины запрещённой зоны (E_g), определённые по графику Таус, составили: для PPE-2 – 2,28 эВ, для Cu²⁺/PPE-2 – 1,74 эВ, для CuO/PPE-2 – 1,53 эВ (рис. 7).

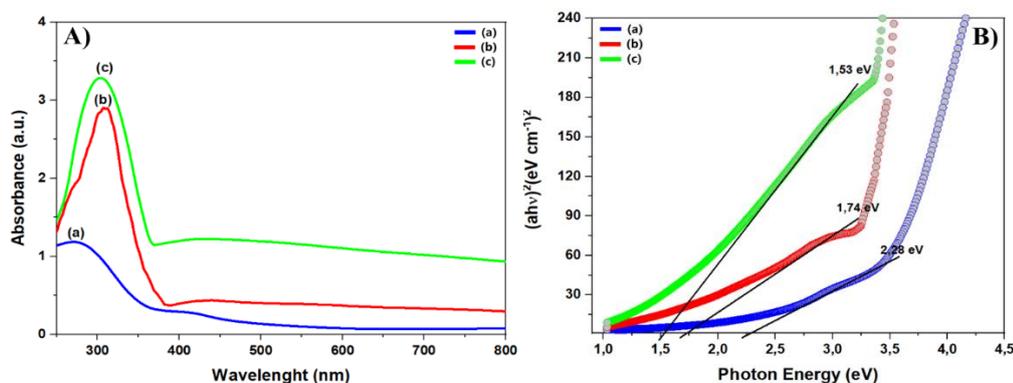


Рис. 7. Спектр поглощения функционального материала CuO/PPE-2 и рассчитанное значение E_g

Снижение значений E_g указывает на интеграцию наночастиц CuO в полимерную матрицу, перераспределение энергетических уровней электрон–дырочных пар и формирование межфазных процессов зарядообмена. Данные, обработанные с использованием функции Кубелка–Мунка, полностью подтвердили результаты графика Така и доказали эффективную способность нанокompозита CuO/PPE-2 к поглощению в области видимого света.

Фотолуминесцентные (PL) анализы проводились при возбуждении на 280 нм, спектры измерялись в диапазоне 300–600 нм. Для образцов PPE-2 и CuO/PPE-2 зарегистрированы основные пики эмиссии при 382 нм и 440 нм. Кроме того, при 480 нм наблюдался дополнительный пик низкой интенсивности. Излучение при 382 нм связано с межзонными переходами и

кислородными вакансиями, тогда как пик при 440 нм обусловлен гибридизацией π -орбиталей полимера и d-орбиталей меди (рис. 8).

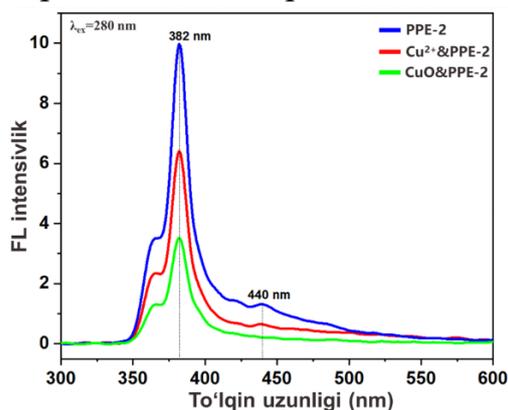


Рис. 8. Спектры фотолюминесценции (PL) CuO/PPE-2 и анионообменного материала PPE-2

При добавлении наночастиц CuO было зафиксировано резкое снижение интенсивности PL, что свидетельствует об эффективном подавлении рекомбинации фотогенерированных электрон–дырочных пар, увеличении скорости межфазного разделения зарядов и удлинении времени жизни электрон–дырок. Такие материалы, обладающие улучшенными оптическими и оптоэлектронными свойствами, научно обоснованно подтверждены как высокофункциональные в процессах фотокатализа и антибактериальной активности.

Морфология поверхности функционального полимерного нанокompозита CuO/PPE-2, распределение наночастиц CuO в полимерной матрице, а также его элементный состав были исследованы с использованием методов SEM и EDX.

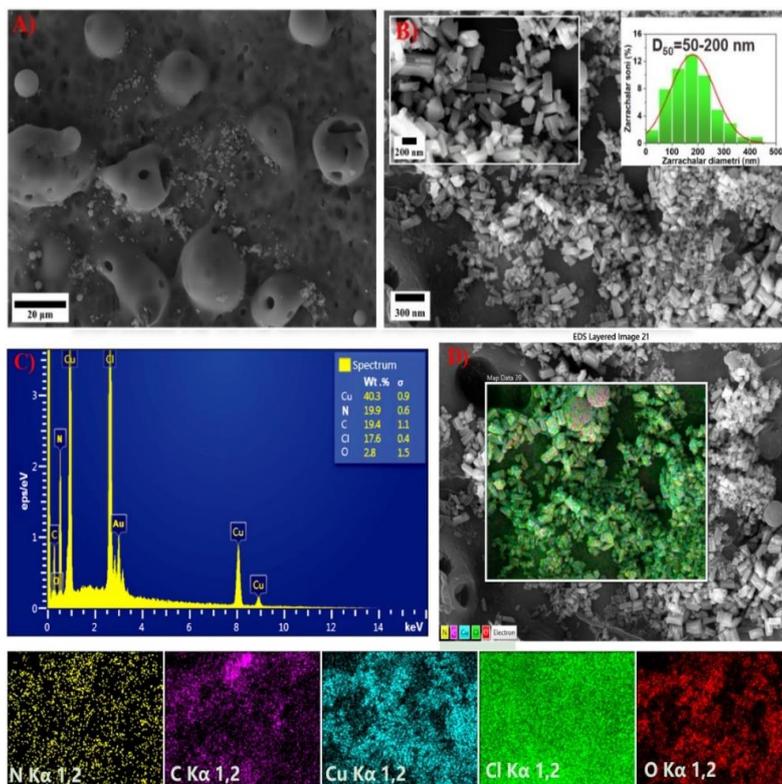


Рис. 9. Микрофотографии SEM функциональных материалов PPE-2 (A) и CuO/PPE-2 (B), анализ EDX и карта распределения элементов функциональных материалов CuO/PPE-2 (C) (D-E)

SEM-микрографии полимера PPE-2 показали, что он обладает неровным рельефом, состоит из сферических частиц и имеет микро- и мезопористую структуру. В нанокompозите CuO/PPE-2 при масштабах 20 мкм и 300 нм были зафиксированы стержнеобразные наночастицы CuO размером 50–200 нм. Они равномерно распределены на поверхности матрицы, частично агрегированы и формируют межфазные зоны. Анализ EDX показал, что в составе нанокompозита основным элементом является медь (40,3 мас.%). Карты пространственного распределения элементов подтвердили равномерное распределение наночастиц CuO по полимерной матрице (рис. 9)

Кристаллическая структура, фазовый состав, размеры наночастиц и их взаимодействие с полимерной матрицей функционального нанокompозита CuO/PPE-2 были исследованы методом рентгеновской дифракции (XRD). На рис. 10 приведены дифрактограммы CuO и нанокompозита CuO/PPE-2. Сравнение рентгенограмм образцов до (PPE-2) и после синтеза (CuO/PPE-2) показало существенные различия, что указывает на распределение частиц CuO в мезо- и микропорах PPE-2. Наблюдаемые в XRD-анализе острые дифракционные пики подтверждают наличие у наночастиц CuO кристаллической структуры. Размер кристаллитов составил примерно 32,3 нм, а степень кристалличности оценена в 67 %. Дифракционные пики полностью совпали с данными карты ICDD № 01-078-0428.

Поверхностная морфология и параметры пористости нанокompозита CuO/PPE-2 были оценены на основе изотерм адсорбции–десорбции азота (N₂). Согласно результатам, рассчитанным по модели BET, удельная поверхность исходного полимера PPE-2 составляла 42,6 м²/г, тогда как после введения наночастиц CuO этот показатель увеличился до 85,3 м²/г (петля гистерезиса H4-типа). Сочетание большой удельной поверхности и мезопористой структуры обеспечивает быструю адсорбцию и эффективную диффузию молекул загрязнителей, что научно обоснованно подтверждает значительное возрастание фотокаталитической и антибактериальной активности нанокompозита.

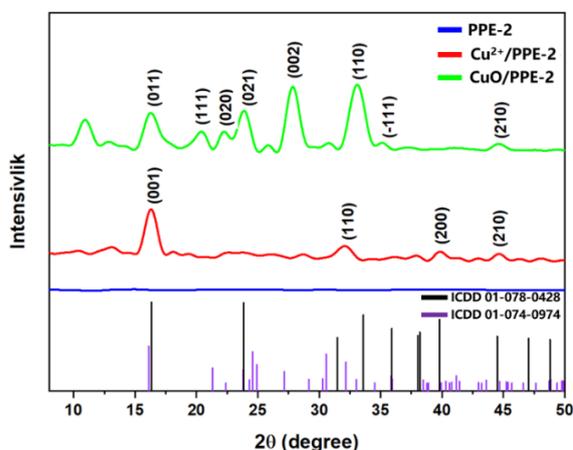


Рисунок 11. Спектр рентгеновского анализа наноматериала CuO/PPE-2

Было изучено эффективное фотокаталитическое разложение родамина В (RhB), красителя метиленового синего, аналгетика парацетамола с участием нанокompозита Fe₃O₄/PPE-2, а также тетрациклинового (ТС) антибиотика с

участием нанокompозита CuO/PPE-2 под воздействием солнечного света (таблица 1).

Таблица 1.

Сравнительная фотокаталитическая активность нанокompозитов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2 по отношению к органическим загрязнителям

Органические загрязнители	λ (nm)	Концентрация	Константа скорости k1 (g/mg·l min ⁻¹)	Значение R ²	Кинетическая модель	Время разложения (мин)	Степень деградации (%)	функциональный полимерный нанокompозит
RhB	554	100 mg/l	0.02501	0.9355	псевдо-первого порядка	180	98,2	Fe ₃ O ₄ /PPE-2
MB	664	100 mg/l	0,0137	0,9563	псевдо-первого порядка	140	96	
Parasetamol	236	50 mg/l	0.01276	0.9275	псевдо-первого порядка	160	85	
TC	358	100 mg/l	0,90951	0,9374	псевдо-первого порядка	200	98	CuO/PPE-2

Установлено, что функциональный нанокompозит CuO/PPE-2 обладает высокой антибактериальной активностью в отношении грамотрицательных бактерий — *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* (таблица 2).

Таблица 2.

Антибактериальная активность материалов CuO/PPE-2 и Cu²⁺/PPE-2 против бактерий *E. coli* и *P. aeruginosa*

функциональный полимерный нанокompозит	Условия	диаметр антибактериальной зоны (mm±SD)	
		<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
Cu ²⁺ /PPE-2	0.1 mol/L	14± 0.5	15± 0.5
CuO/PPE-2	0.1 mol/L	20± 0.5	23± 0.5
CuO/PPE-2	150°C	26± 0.5	35± 0.5

В четвёртой главе диссертации, названной «Экспериментальная часть», приведено описание использованных в исследовании реактивов, методы проведения химических модификаций в полимерах, а также исследовательские подходы к синтезу функциональных полимерных материалов и на их основе нанокompозитных материалов Fe₃O₄/PPE-2 и CuO/PPE-2.

ВЫВОДЫ

1. Впервые были определены оптимальные условия образования нанокристаллов Fe_3O_4 на поверхности анионообменного материала PPE-2, полученного на основе поливинилхлорида, за счёт изменения pH раствора, температуры синтеза и продолжительности реакции. Установлено формирование на поверхности полимерной матрицы наносферических кристаллов размером 200–400 нм (FM140), наноразмерных кубических частиц 50–200 нм (FM160) и наностержней 5–25 нм (FM180).

2. Впервые на поверхности анионообменного материала на основе поливинилхлорида были установлены оптимальные условия получения нанокристаллов CuO : pH раствора 10, температура синтеза 150 °C и длительность реакции 10 часов, что обеспечило синтез многофункционального полимерного нанокompозита $CuO/PPE-2$ с высокими фотокаталитическими и антибактериальными свойствами.

3. Идентификация структуры синтезированных многофункциональных нанокompозитов $Fe_3O_4/PPE-2$ и $CuO/PPE-2$ методами ИК, Раман, УФ–видимой и PL спектроскопии позволила установить участие аминогрупп полимерной матрицы в формировании нанокристаллов металлических оксидов на её поверхности, а также их роль в стабилизации наночастиц.

4. Исследование структурной морфологии синтезированных многофункциональных нанокompозитов $Fe_3O_4/PPE-2$ и $CuO/PPE-2$ методами SEM, XRD, TGA, DSC, BET и ВЖ подтвердило наличие на поверхности полимерной матрицы металлических нанокристаллов различной формы и размеров, их мезопористую структуру, а также повышение термической стабильности материала в результате образования нанокристаллов оксидов металлов.

5. Фотокаталитические испытания многофункционального нанокompозита $Fe_3O_4/PPE-2$ в отношении токсичных органических соединений — органического красителя родамина В и анальгетика парацетамола — показали, что функциональный материал, содержащий наностержни Fe_3O_4 размером 5–15 нм (FM180), обеспечивает эффективность фотокаталитического разложения 98,2% и 85% соответственно. При этом его эффективность при повторном использовании снизилась всего на 3,2% и 2,3% после 10 и 5 циклов, что подтверждает его высокую стабильность.

6. Установлено, что многофункциональный полимерный нанокompозит $CuO/PPE-2$, полученный на основе поливинилхлорида, карбамида и солей меди, фотокаталитически разлагал антибиотик тетрациклин (ТС) с эффективностью 98,2%, а также проявлял выраженную антибактериальную активность против бактерий *E. coli* и *P. aeruginosa*, формируя зоны подавления роста 26 мм и 35 мм соответственно.

7. Многофункциональный полимерный нанокompозит $Fe_3O_4/PPE-2$ (FM180), синтезированный на основе поливинилхлорида, карбамида и солей железа, был рекомендован и внедрён для очистки сточных вод на предприятии ООО «Gurlan Global Teks», образующихся в процессе обработки хлопкового волокна. Материал обеспечил эффективное фотокаталитическое разложение токсичного органического красителя родамина В в составе сточных вод.

**THE ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL BASED ON THE
SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.03/30.12.2019.K.01.03 AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

ESHTURSUNOV DAVRON ABDISAMATOVICH

**FORMATION OF NANOSCALE METAL PARTICLES ON POLYMER
SURFACES AND THEIR PROPERTIES**

02.00.06 – High molecular compounds

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON CHEMICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The title of Doctor of Philosophy (PhD) has been registered by the Supreme Attestation Commission at the Ministry of the Higher education, science and innovation of the Republic of Uzbekistan under the number of B2024.1.PhD/K726

The dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, and English (resume)) is available online at ik-kimyo.nuu.uz and the website of "ZiyoNET" information educational portal www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Davron Bekchanov Jumazarovich**
Doctor of Chemical Sciences, Professor

Official opponents: **Khaidar Ergashovich Yunusov**
Doctor of Engineering Sciences, Professor

Alisher Farmanovich Ishankulov
Doctor of Philosophy in Chemistry, Associate Professor

Leading organization: **Institute of General and Inorganic Chemistry**

The defence of the dissertation will take place on 21 October 2025 at 15:00 at the meeting of the one-time scientific council based on the Scientific council 03/30.12.2019.K.01.03 at the National University of Uzbekistan (Address: 100174, Tashkent, street Universitetical 4. Ph.: (99871)227-12-24, Fax: (99824) 246-53-21; 246-02-24. e-mail: ilmiy_kengash@nuu.uz).

The doctoral dissertation has been registered at the Informational Resource Centre of the National University of Uzbekistan under № 161 (Address: 100174, Tashkent, street Universitetical 4. Ph.: (99871)227-12-24, Fax: (99824) 246-53-21; 246-02-24. e-mail: rector@nuu.uz).

The abstract of the dissertation has been distributed on « _____ » October 2025 year
(Protocol at the register № 22 dated « _____ » October 2025 year)



Z. Smanova

Chairman of single council at Scientific Council for awarding the scientific degree of Doctor of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, professor

N. Qutlimurotova

Scientific Secretary of single council at Scientific Council for awarding the scientific degree of Doctor of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, professor

M. Mukhamediev

Chairman of single council at Scientific Seminar under Scientific Council for awarding the scientific degree of Doctor of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work: The aim is to obtain functional polymer nanocomposite materials with magnetic and antibacterial properties, and to study the photocatalytic, catalytic and antibacterial properties of these materials.

The objects of the research work: polyvinyl chloride, urea as a modifying reagent, metal salts (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+}) for the creation of functional nanocomposite materials, as well as textile dye pollutants, pharmaceutical compounds, and pathogenic microorganisms for adsorption–photocatalytic and antimicrobial studies.

The scientific novelty of the research is as follows:

For the first time, Fe_3O_4 and CuO nanocrystals were obtained on the surface of the anion-exchange material PPE-2, synthesized based on polyvinyl chloride, by the precipitation method under hydrothermal conditions;

For the first time, it was established that the use of the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ nanocomposite material, synthesized at $180\text{ }^\circ\text{C}$ for 8 hours, ensures efficient photocatalytic degradation of the toxic organic dye Rhodamine B (20 mg/10 ml solution) contained in textile industry wastewater: under solar irradiation at $\text{pH} = 6.5\text{--}7.5$ for 180 minutes, up to 98.2% degradation was achieved. Kinetic analysis of the process showed that the reaction rate constant is 0.027 min^{-1} ;

For the first time, it was experimentally demonstrated that the morphology of metal oxide nanocrystals on the surface of the synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ and $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ nanocomposites directly influences their photocatalytic and optical properties;

For the first time, it was established that the $\text{CuO}/\text{PPE-2}$ nanocomposite exhibits pronounced bactericidal activity against clinically significant antibiotic-resistant pathogenic bacterial strains of *E. coli* and *P. aeruginosa* at $36\text{ }^\circ\text{C}$ over 24 hours;

It was determined that nanocomposites synthesized with the participation of ionogenic and complex-forming groups of the polymer possess higher dispersity, structural stability, photocatalytic activity, and antibacterial properties compared to pure metal oxide nanocrystals.

Implementation of research results. Based on the scientific findings on the synthesis, morphology, and photocatalytic properties of functional nanocomposites derived from polyvinyl chloride (PVC) modified with Fe_3O_4 and CuO particles:

Scientific data characterizing the composition, structure, photocatalytic activity, and regeneration properties of the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-2}$ polymer nanocomposite were utilized in three international high–impact factor journals: Sustainability (2025, Vol. 17, No. 9, p. 4084; IF 3.3), Reactive and Functional Polymers (2025, Vol. 216, Article 106457; IF 5.1), and Carbohydrate Polymer Technologies and Applications (2025, Vol. 6, Article 100835; IF 5.4). As a result, this nanocomposite was characterized as a highly efficient photocatalyst for the degradation of Rhodamine B dye, which provided a scientific basis for the development of environmentally safe and recyclable functional materials;

The functional polymer nanocomposite was implemented in practice at the enterprise “Gurlan Global Tekst” LLC (certificate of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan No. 03-03/1-03/3-3815 dated April 21, 2025). The implementation of this material ensured the efficient removal of toxic impurities from the company’s wastewater. *Science*, 2025, Vol. 717, p. 123622, *Scientific Journal Impact Factor*: 8.4).

The structure and volume of the dissertations. The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the thesis is 120 pages.

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

I bo'lim (I часть; I part)

1. Eshtursunov D., Inkhonova A., Botirov S., Fayzullayev Y., Bekchanov D., Mukhamediev M. «Removal of Rhodamine B from Wastewater by Adsorption using Iron Oxide-Polymer Composite Material» // Asian Journal of Chemistry. – 2023. – Vol. 36, No. 1. – P. 32–36. (Scopus Q4)
2. Bekchanov D., Mukhamediev M., Eshtursunov D., Lieberzeit P., Su X. «Cellulose- and starch-based functional materials for efficiently wastewater treatment» // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 35, No. 1. – Article e6207. (Scopus Q1)
3. Bekchanov D., Mukhamediev M., Inkhonova A., Eshtursunov D., Babojonova G., Rajabov O., Khalilov U., Yusupov M., Lieberzeit P. «Magnetic and Reusable Fe₃O₄/PPE-2 Functional Material for Efficient Photodegradation of Organic Dye» // Environmental Research. – 2025. – Vol. 269. – Article 120911. (Scopus Q1)
4. Inxonova A., Eshtursunov D., Fayzullayev Yu., Bekchanov D. J., Muhamediev M. G. «Oqava suvlarni biologik tozalashda PVX asosida olingan mis-polimer kompleksining qo'llanilishi» // NamDU Ilmiy axborotnomasi. – 2023. – № 11. – С. 130–136. (02.00.00, №17)
5. Abdujalilov I., Eshtursunov D., Egambergenova S., Inxonova A., Bekchanov D. «Polimer yuzasida metal oksidi nanozarrachalirini zol-gel usuli yordamida sintez qilish va ularning xossalari» // FarDU Ilmiy xabarlar. – 2024. – № 6. – С. 93–100. (02.00.00, №17)
6. Abdujalilov I., Eshtursunov D., Bekchanov D., Muxamediyev M. «Metall oksid zarrachalarini saqlagan funksional polimer kompleksining olinishi va uning spektroskopik tahlili» // FarDU Ilmiy xabarlar. – 2025. – № 2. – С. 109–114. (02.00.00, №17)
7. Eshtursunov D., Inxonova A., Bekchanov D., Muxamediyev M. «Magnit xossali polimer nanokompoziti yordamida farmasevtika chiqindi suvlaridagi paratsetamolning fotokatalitik degradatsiyasi» // FarDU Ilmiy xabarlar. – 2025. – № 2. – С. 43–52. (02.00.00, №17)

II bo'lim (II часть; II part)

1. Inkhonova A., Eshtursunov D., Botirov S., Bekchanov D. Formation of metal nanoparticles on the surface of polymeric sorbent PVC/PEI // Материалы IX Бакеевской Всероссийской с международным участием школы-конференции для молодых ученых «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные композиты». – Тула, 2023. 8–12 октября. – С. 164.
2. Eshtursunov D., Inkhonova A., Fayzullayev Yu., Usmonova X., Bekchanov D. Tailoring Iron Oxide Nanoparticles via Sol-Gel Synthesis // Материалы IX Бакеевской Всероссийской с международным участием школы-конференции для молодых ученых «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные композиты». – Тула, 2023. 8–12 октября. – С. 164.
3. Мухамедиев М.Г., Бекчанов Д.Ж., Эштурсунов Д.А., Инханова А.А. Формирование наночастиц металлов и их солей на поверхности полимерных сорбентов // Материалы Международной научной конференции «Современные проблемы науки о полимерах». – Санкт-Петербург, 2023. 13–17 ноября. – С. 208.
4. Eshtursunov D., Botirov S., Inkhonova A., Abdujalilov I., Egambergenova S., Bekchanov D., Mukhamediev M. Using advanced oxidation processes to treat antibiotics in wastewater // Proceedings of the International Scientific Conference «Advanced Science

and Technology: Celebrating 15 Years of Turin Polytechnic University in Tashkent». – Tashkent, 2024. 22–23 April. – P. 41.

5. Эштурсунов Д.А., Инхонова А.А., Ботиров С.Х., Бекчанов Д.Ж., Мухамедиев М.Г. Удаление органических красителей из водных растворов с использованием МАОМ // Материалы IX Всероссийской Каргинской конференции «Полимеры-2024». – Москва, 2024. 1–3 июля. – С. 69.

6. Eshtursunov D., Inkhonova A., Bekchanov D., Mukhamediev M. Photodegradation of antibiotics using polymer nanocomposites // Proceedings of the International Scientific Conference «Advanced Science and Technology» Turin Polytechnic University in Tashkent. – Tashkent, 2025. 22–23 April. – P. 72–74.

7. Eshtursunov D., Inkhonova A., Botirov S., Abdjalilov I., Bekchanov D. Investigation of the thermal stability of polymer metal complex of lead with PVC-based ionite // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Интеграция современных физико-химических методов исследования в области науки и производства». – Ташкент, 2023. 22–23 сентября. – С. 154.

8. Inkhonova A., Eshtursunov D., Abdjalilov I., Botirov S., Babojonova G., Bekchanov D., Mukhamediyev M. The use of polymer metal complexes as adsorbents for the removal of dyes from an aqueous medium // «Termoreaktiv oligomerlar, polimerlar saqlovchi chiqindilar, polifunksional birikmalar va ular asosida polimer materiallar yaratishning istiqbollari» mavzusidagi k.f.d., prof. F.A.Magrupovning 80-yillik xotirasiga bag‘ishlangan Respublika ilmiy-amaliy anjumanining ilmiy ishlar to‘plami. – Toshkent, 2024. 18-19 yanvar. – B. 202–203.

9. Eshtursunov D., Abdjalilov I., Egambergenova S., Inkhonova A., Bekchanov D. Polimerlar sirtida metal oksidi nanozarrachalari tutgan funksional materiallar// Замонавий органик кимё: ютуқлар, муаммолар, ечимлар мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий анжумани тўплами. – Тошкент, 2024. 20-21 сентябр, -В 201-203

10. D.A. Eshtursunov, I.I.Abdjalilov, A.Inxonova, D.J.Bekchanov. Synthesis of zinc oxide nanoparticles on the surface of functional polymer by precipitation method//“O‘zbekistonda tabiiy fanlarning zamonaviy tadqiqotlari va ilm-fan integratsiyasi” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi to‘plami. Xorazm Ma‘mun Akademiyasi. – Urganch, 2024. 19-20-sentabr. –B. 111-114

11. I.Abdjalilov, D.Eshtursunov, S.Egambergenova, D.Bekchanov. polimer materiallar sirtida ZnO nanozarrachalari sintezining Raman tahlili//“O‘zbekistonda tabiiy fanlarning zamonaviy tadqiqotlari va ilm-fan integratsiyasi” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi. Xorazm Ma‘mun Akademiyasi. – Urganch, 2024. 19-20-sentabr. –B. 83-84

12. Эштурсунов Д.А., Абдужалилов И.И., Бекчанов Д.Ж. Синтез наночастиц оксида цинка на поверхности функционального полимера золь-гель методом // Современное состояние и перспективы развития науки о полимерах: синтез, структура, свойства и применение. – Ташкент, 2024. 24-25 октября. –С. 95-96.

13. Эштурсунов Д.А., Ботиров С.Х., Сапаев Ф., Бекчанов Д.Ж., Мухамедиев М.Г. Синтез и характеристика магнитного композита Fe₃O₄/PPE-1 методом золь-гель: анализ фазового состава и морфологии // O‘zbekiston milliy universiteti kimyo fakultetining 95 yillik yubileyiga bag‘ishlangan “Kelajakka kimyo bilan intilamiz” mavzusidagi professor-o‘qituvchilar, yosh olimlar, magistrantlar va iqtidorli talabalar ishtirokidagi ilmiy-amaliy anjumani. – Toshkent, 2025. 22-23 may. –B. 90-91

14. Эштурсунов Д.А., Инхонова А., Ботиров С.Х., Бекчанов Д.Ж., Мухамедиев М.Г.

Функциональные полимерные материалы с магнитными свойствами // “Kimyo va kimyoviy texnologiya sohalarining dolzarb muammolari va istiqbollari” xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. Jizzax, 2025. 25–26 aprel. –B. 1236–1239.