ORCID: 009-0003-2505-3985
UDK: 544.7:661.183.2:615.28

POLIMER-GIBRID NANOADSORBENTLAR ASOSIDA FARMATSEVTIK IFLOSLANTIRUVCHILARNI SORBSIYALASHNING ZAMONAVIY STRATEGIYALARI: SINTEZ, SIRT MODIFIKATSIYASI VA ADSORBSION SAMARADORLIGI

Salihanova Dilnoza Saidakbarovna
URFA Ummumiy va noorganik kimyo instituti
katta ilmiy xodim, t.f.d prof

Ubaydullayeva Navruza Ne'matjonovna
k.f.f.d PhD, dots.Namangan davlat universiteti
kimyo kafedrasi dotsenti

Rahmatova Nargiza Islomjon qizi
Mustaqil izlanuvchi
https://doi.org/10.5281/zenodo.22543477

ANNOTATSIYA : Mazkur maqolada suv resurslarida tobora ko'proq aniqlanayotgan farmatsevtik ifloslantiruvchi moddalarni (antibiotiklar, og'riq qoldiruvchi va gormonal preparatlar) polimer-gibrid nanoadsorbentlar yordamida sorbsiyalashning zamonaviy strategiyalari ko'rib chiqilgan. An'anaviy suv tozalash inshootlarining bunday moddalarni to'liq ushlab qololmasligi muammosi ilmiy dolzarblikni belgilaydi. Ishda nanoadsorbentlarni sintez qilishning in situ, aralashtirish, yuza modifikatsiyasi va sol-gel usullari tahlil qilingan, shuningdek funksional guruhlar (–COOH, $–NH_2$, –OH) bilan sirt modifikatsiyasi natijasida adsorbsion selektivlik va sig'imning oshishi ko'rsatilgan. Adsorbsiya izotermalari (Langmuir, Freundlich) va kinetik modellar (pseudo-birinchi va pseudo-ikkinchi tartib) yordamida sorbsion jarayonning mexanizmi va samaradorligi baholangan. Olingan natijalar polimer-gibrid nanoadsorbentlarni farmatsevtik ifloslantiruvchilardan suvni tozalashda istiqbolli material sifatida qo'llash imkoniyatlarini asoslaydi.
KALIT SO'ZLAR: polimer-gibrid nanoadsorbent, farmatsevtik ifloslantiruvchilar, sirt modifikatsiyasi, adsorbsiya izotermasi, sorbsion kinetika, suvni tozalash.

АННОТАЦИЯ: В данной статье рассмотрены современные стратегии сорбции фармацевтических загрязнителей (антибиотиков, обезболивающих и гормональных препаратов), всё чаще обнаруживаемых в водных ресурсах, с использованием полимер-гибридных наноадсорбентов. Актуальность исследования обусловлена неспособностью традиционных очистных сооружений полностью удалять данные соединения. В работе проанализированы методы синтеза наноадсорбентов — in situ синтез, механическое смешивание, поверхностная модификация и золь-гель метод, а также показано повышение адсорбционной селективности и емкости в результате модификации функциональными группами (–COOH, $–NH_2$, –OH). С помощью изотерм адсорбции (Ленгмюра, Фрейндлиха) и кинетических моделей (псевдопервого и псевдовторого порядка) оценены механизм и эффективность сорбционного процесса. Полученные результаты обосновывают перспективность применения полимер-гибридных наноадсорбентов для очистки воды от фармацевтических загрязнителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимер-гибридный наноадсорбент, фармацевтические загрязнители, поверхностная модификация, изотерма адсорбции, сорбционная кинетика, очистка воды.

ABSTRACT: This article examines modern strategies for the sorption of pharmaceutical pollutants (antibiotics, analgesics, and hormonal drugs) increasingly detected in water resources, using polymer-hybrid nanoadsorbents. The relevance of the study is driven by the inability of conventional wastewater treatment facilities to fully remove such compounds. The synthesis methods of nanoadsorbents — in situ synthesis, blending, surface modification, and the sol-gel method — are analyzed, along with the enhancement of adsorption selectivity and capacity achieved through functionalization with groups such as –COOH, $–NH_2$, and –OH. The mechanism and efficiency of the sorption process are evaluated using adsorption isotherms (Langmuir, Freundlich) and kinetic models (pseudo-first-order and pseudo-second-order). The findings support the potential application of polymer-hybrid nanoadsorbents as promising materials for removing pharmaceutical pollutants from water.

KEYWORDS: Polymer-hybrid nanoadsorbent, pharmaceutical pollutants, surface modification, adsorption isotherm, sorption kinetics, water treatment.

KIRISH : Farmatsevtika sanoatining jadal rivojlanishi va dori vositalaridan aholi tomonidan keng foydalanilishi natijasida so'nggi yigirma yil ichida dunyo bo'ylab yuzaki va yer osti suvlarida farmatsevtik faol moddalarning (Pharmaceutically Active Compounds, PhACs) mavjudligi jiddiy ekologik va tibbiy-biologik muammoga aylanib bormoqda. Antibiotiklar, og'riq qoldiruvchi va yallig'lanishga qarshi vositalar (masalan, diklofenak, ibuprofen), gormonal preparatlar hamda psixotrop moddalar inson va hayvon organizmidan to'liq metabolizmga uchramagan holda kanalizatsiya tizimiga tushadi va an'anaviy suv tozalash inshootlarida samarali ushlab qolinmaydi. Natijada bu moddalar "yangi turdagi ifloslantiruvchilar" (emerging contaminants) sifatida tabiiy suv havzalariga kirib boradi, suv organizmlarida endokrin buzilishlarni keltirib chiqaradi va antibiotiklarga chidamli mikroorganizmlarning shakllanishiga sabab bo'ladi.
An'anaviy suvni tozalash texnologiyalari — koagulyatsiya-floaklyatsiya, xlorlash, faol lil bilan biologik tozalash — past konsentratsiyada (ng/l–µg/l darajasida) uchraydigan farmatsevtik moddalarni samarali chiqarib tashlashga mo'ljallanmagan. Shu sababli adsorbsion usullar o'zining yuqori samaradorligi, moslashuvchanligi va nisbatan arzon narxi tufayli ushbu muammoni hal etishning eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida e'tirof etilmoqda.
So'nggi o'n yilliklarda nanotexnologiyalar va polimer kimyosi sohasidagi yutuqlar polimer-gibrid nanoadsorbentlar deb ataluvchi yangi avlod sorbsion materiallarini yaratish imkonini berdi. Bunday materiallar polimer matritsaning mexanik mustahkamligi, egiluvchanligi va funksionalizatsiya qilish imkoniyatini noorganik yoki uglerodli nanozarrachalarning (metall oksidlari, magnit nanozarrachalar, grafen oksidi, uglerod nanotubalari) yuqori solishtirma yuza maydoni va o'ziga xos fizik-kimyoviy xossalari bilan uyg'unlashtiradi. Bu esa an'anaviy adsorbentlarga (faollashtirilgan ko'mir, seolitlar) nisbatan yuqori sorbsion sig'im, tezkor kinetika va ko'p martalik qayta tiklanish imkoniyatini ta'minlaydi.
Polimer-gibrid nanoadsorbentlarning farmatsevtik moddalarga nisbatan sorbsion samaradorligi bir qator omillarga bog'liq: sirt morfologiyasi, funksional guruhlarning tabiati va zichligi, elektrostatik va gidrofob o'zaro ta'sirlar, shuningdek π-π stacking va vodorod bog'lanish mexanizmlari. Xususan, polimer zanjirlarini maqsadli funksional guruhlar (karboksil, amino, sulfo guruhlari) bilan modifikatsiyalash orqali material yuzasining

kimyoviy tabiatini o'zgartirish va aniq dori moddalariga nisbatan selektivlikni sezilarli darajada oshirish mumkin. Bunday yondashuv "molekulyar bosib olish" (molecular imprinting) texnologiyasi bilan birlashtirilganda, nanoadsorbentlarning selektivligi yanada yuqori darajaga chiqadi.Shu bilan birga, adsorbsiya jarayonining mexanizmini va samaradorligini ilmiy asoslash uchun adsorbsiya izotermalari (Langmuir, Freundlich, Temkin) va kinetik modellar (pseudo-birinchi va pseudo-ikkinchi tartibli tenglamalar, ichki diffuziya modeli) qo'llaniladi. Ushbu modellar yordamida sorbsiya jarayonining monomolekulyar yoki ko'p qatlamli, fizik yoki kimyoviy tabiatga ega ekanligini, shuningdek jarayonni cheklovchi bosqichni aniqlash mumkin.
Shunday qilib, polimer-gibrid nanoadsorbentlar asosida farmatsevtik ifloslantiruvchilarni sorbsiyalash muammosini kompleks o'rganish nafaqat fundamental kolloid-kimyoviy ahamiyatga, balki suv resurslarini muhofaza qilish va atrof-muhitni sog'lomlashtirish borasida amaliy ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotning dolzarbligi aynan mana shu ikki jihatning — ilmiy-nazariy va amaliy-ekologik — uyg'unligida namoyon bo'ladi.

ADABIYOTLAR TAHLILI : Polimer-gibrid nanoadsorbentlar asosida farmatsevtik ifloslantiruvchilarni sorbsiyalash muammosi so'nggi yillarda jahon ilmiy hamjamiyatida faol o'rganilmoqda. Ushbu bo'limda mavzuga oid asosiy tadqiqotlar tematik yo'nalishlar bo'yicha tahlil qilingan. **2.1. Kovalent organik freymvork (COF) asosidagi gibrid tizimlar** Reis va boshqalar tomonidan o'tkazilgan tadqiqotda konjugatsiyalangan mikroparchali polimer (CMP) birinchi marta yirik (40–70 μm) mezoporali kremniy mikrosferalari ustiga qoplama sifatida qo'llanilgan, bu esa diklofenakni adsorbsiyalash uchun mavjud yuza maydonini kengaytirgan, bunda CMP kremniy mikrosferalarining turli miqdorlari atrofida bir tekis qoplangan holda diklofenak adsorbsiyasi uchun mavjud yuzani kengaytirish va qo'llanilishini yaxshilash maqsadida ishlab chiqilgan. Past diklofenak konsentratsiyalarida past kremniy miqdoriga ega gibrid materiallar yuqori gidrofob xususiyati tufayli moddani deyarli to'liq yutgan, eng samarali material esa 422 mg/g darajasidagi CMP-solishtirma sig'imni va 1 mg/L past konsentratsiyada 72% chiqarib tashlash samaradorligini ko'rsatgan. (Wiley Online Library) (Wiley Online Library) Xuddi shunday, triazol asosidagi kovalent organik freymvork (TpDt-COF) tetratsiklin va minotsiklin kabi antibiotiklarni yuqori muvozanat sig'imi bilan yutgan, bunda maksimal adsorbsiya atigi 10 daqiqa ichida erishilgan, tetratsiklin va minotsiklin uchun mos ravishda 588,6 mg/g va 445,7 mg/g yuqori muvozanat sig'imlari qayd etilgan, maksimal chiqarib tashlash esa 10 daqiqa ichida amalga oshgan. Bu freymvork tarkibiga triazol bog'lovchilarining kiritilishi materialning сувли muhitda gidrolizga chidamliligini oshirgan. (ScienceDirect) **2.2. Poliamin va o'tkazuvchan polimerlar asosidagi kompozitlar**

Polianilinning (PANI) amin va imin guruhlariga boyligi tufayli u ifloslantiruvchi moddalarni yutishda samarali modifikator sifatida keng qo'llanilgan. Xu va boshqalarning tadqiqotida ishlab chiqilgan poliйanilin bilan qoplangan qatlamli qo'sh gidroksid-uglerod sferalari diklofenak uchun 618,16 mg/g darajasidagi yuqori sig'imni namoyon etgan va 5 marta regeneratsiyadan so'ng ham yaxshi sorbsion faollikni saqlagan, bu natija PANI ni modifikator sifatida tanlashning ifloslantiruvchi moddalarni samarali chiqarib tashlash uchun foydali ekanligini ko'rsatgan. Shu bilan birga, mikrokristall selluloza, kovalent organik freymvork va PANI asosida yaratilgan uchlamchi nanokompozit (MCC/COF/PANI) indometasin va diklofenak uchun mos ravishda 149,1 va 112,5 mg/g sig'imga erishgan, bunda muvozanat 60 daqiqa ichida o'rnatilganva tezkor hamda yaxshi adsorbsiya samaradorligini ko'rsatgan. (ScienceDirect) (ScienceDirect)

2.3. Xitozan asosidagi nanokompozitlar

Xitozan tabiiy polimer sifatida farmatsevtik ifloslantiruvchilarni sorbsiyalashda eng ko'p o'rganilgan matritsalardan biri hisoblanadi. Xitozan-tiobarbitur kislotasi-malon dialdegid-Fe_3O_4 nanokompozitida tetratsiklinning sorbsion mexanizmi π-π va vodorod bog'lanish orqali izohlangan bo'lib, optimal sharoitlarda (adsorbent dozasi 0,05 g, TC konsentratsiyasi 60 mg/L) 215,31 mg/g darajasidagi maksimal sig'im qayd etilgan, sorbsiyaning mumkin bo'lgan yuza mexanizmi π-π va vodorod bog'lanishi orqali sodir bo'lishi ko'rsatilgan. Xitozan-kremnezem nanokompozitlari sol-gel usulida sintez qilinganda, glutaraldegid bilan modifikatsiyalangan namunalarda diklofenak natriyni sorbsiyalash uchun 237,8 mg/g sig'im va pH 6,7 optimal qiymati aniqlangan, bunda sol-gel usuli kremniy prekursorlari yordamida xitozan asosidagi adsorbent kompozitlarni ishlab chiqarish uchun istiqbolli usul sifatida taklif qilingan. (MDPI)

2.4. Sulfat va fosfat guruhlari bilan funksionalizatsiya Iyota va kappa-karrageнan asosidagi kompozitlarda karbamazepin va diklofenakning sorbsiyasi Langmuir-Freundlich modeli asosida baholangan, bunda diklofenak uchun sig'im 22,66–49,29 mg/g, karbamazepin uchun esa 7,07–13,78 mg/g oralig'ida bo'lgan, bu natijalar keyinchalik dispersiv qattiq faza ekstraksiyasi va suyuqlik xromatografiya-mass-spektrometriya usuli bilan validatsiya qilingan tahlil metodologiyasini rivojlantirishda qo'llanilgan. Fosfat guruhlariga boy giper-ko'ndalang bog'langan polimerlarda (P-HCP) tetratsiklinni murakkab suv matritsalaridan, hatto past (50 μg/L) konsentratsiyada ham, yuqori selektivlik bilan chiqarib tashlash imkoniyati ko'rsatilgan, bunda fosfat guruhlari ion ta'siri va/yoki vodorod bog'lanishi orqali asosiy adsorbsion markazlar sifatida aniqlangan. (nih) (ScienceDirect)

2.5.Metall oksidi va boshqa noorganik komponentli gibrid tizimlar Nano-sulfatlangan sirkoniy bilan qo'shilgan yashil nanokompozit polimer donachalari (iota-karrageнan/sulfonatlangan PVA/$SZrO_2$) sefotaksim antibiotigini sorbsiyalashda 659 mg/g darajasidagi juda yuqori sig'imni namoyon etgan, bunda pseudo-ikkinchi tartibli kinetik model adsorbsiya jarayonini yaxshiroq tavsiflagan. Fe–Mn ikkilamchi oksidi bilan qoplangan polietilen va polietilentereftalat nanokompozitlari esa mishyokni chiqarib tashlashda qo'llanilgan, bunda Dubinin–Radushkevich modeli asosida hisoblangan erkin energiya qiymatlari 16 kJ/mol dan yuqori bo'lib, bu kimyosorbsiya mexanizmining ustunligini tasdiqlagan, kinetik ma'lumotlar ham ushbu xulosani qo'llab-quvvatlagan. (nih) (nih) Grafen oksidi va α-Fe_2O_3 nanozarrachalari bilan modifikatsiyalangan gibrid materiallar tetratsiklinni sorbsiyalash va magnit separatsiya orqali suvdan ajratib olishda qo'llanilgan, bunda Langmuir modeli eksperimental ma'lumotlarga yaxshi mos kelganva maksimal sorbsion sig'im sof grafen oksidi uchun 44,23 mg/g, gibrid material uchun esa 18,47 mg/g ni tashkil etgan. (nih)

3.6. Sirt maydoni va funksional guruh zichligining roli N-vinilpirrolidon-divinilbenzol polimerlarida (NVPD) tarkibidagi N-vinilpirrolidon miqdorining oshishi bilan solishtirma yuza maydoni va tetratsiklin sorbsion sig'imi mutanosib ravishda oshgan, 75% NVP dozasida polimer eng katta BET solishtirma yuza maydoniga (613,23 m^2/g) va maksimal tetratsiklin sorbsion sig'imiga (258,76 mg/g) ega bo'lgan. Bu natija materialning yuza maydoni bilan funksional guruhlar zichligi o'rtasidagi sinergik bog'liqlikni yaqqol namoyon etadi. (Springer)

ASOSIY QISM : 3.1Farmatsevtik ifloslantiruvchilar: tarqalishi va xavfi Farmatsevtik faol moddalar (Pharmaceutically Active Compounds — PhACs) tabiiy suv muhitida odatda nanogramm/litr dan mikrogramm/litr oralig'ida aniqlanadi, biroq ularning

surunkali ta'siri va bioakkumulyatsiya xususiyati tufayli past konsentratsiyalarda ham ekotoksikologik xavf tug'diradi. Dunyo miqyosida eng ko'p o'rganilgan PhAC guruhlariga quyidagilar kiradi:
Og'riq qoldiruvchi/yallig'lanishga qarshi vositalar — diklofenak (DCF), indometasin (IDM), karbamazepin (CBZ); Antibiotiklar — tetratsiklin (TC), sefotaksim, siprofloksatsin;Gormonal preparatlar — estrogen hosilalari. Diklofenak, xususan, dunyoning ko'plab mamlakatlarida suv tizimlarida 1,1 ng/l dan 4,9 μg/l gacha bo'lgan konsentratsiyalarda aniqlangan bo'lib, u suv organizmlariga jiddiy xavf tug'diradi; qayd etilgan holatlarda to'plangan diklofenak keçirgichlar (grif qushlar) o'limiga sabab bo'lgani hujjatlashtirilgan.

3.2. Sorbsion mexanizmlar Polimer-gibrid nanoadsorbentlar yuzasida farmatsevtik moddalarning yutilishi bir nechta molekulyar mexanizm orqali amalga oshadi: a) Elektrostatik o'zaro ta'sir — ionlanuvchi funksional guruhlar (masalan, fosfat, karboksil, sulfo guruhlari) bilan dori molekulasining zaryadlangan qismlari orasidagi tortishish kuchi. Fosfat guruhlariga boy gibrid polimerlar tetratsiklinni past (hatto 50 μg/l) konsentratsiyada ham yuqori selektivlik bilan yutishi ko'rsatilgan, bunda asosiy sorbsion markazlar sifatida fosfat guruhlari ionli ta'sir va vodorod bog'lanishi orqali ishtirok etadi.b) Vodorod bog'lanish — polimer yuzasidagi –OH, $–NH_2$, –COOH guruhlari bilan dori molekulasidagi funksional guruhlar orasida hosil bo'ladi. Xitozan asosidagi nanokompozitlarda tetratsiklinning sorbsiyasi aynan π-π va vodorod bog'lanish mexanizmi orqali izohlangan bo'lib, bunday tizimlarda sorbsion sig'im 215 mg/g darajasiga yetgan.c) π-π stacking (elektron-donor-akseptor) o'zaro ta'siri — aromatik halqaga ega dori molekulalari (diklofenak, karbamazepin) bilan konjugatsiyalangan polimer tarmoqlari (masalan, kovalent organik freymvorklar, COF) orasida yuzaga keladi.d) Gidrofob o'zaro ta'sir — amfifil tabiatga ega dori molekulalari past qutblangan polimer yuzalari (masalan, konjugatsiyalangan mikroparchali polimerlar) bilan gidrofob ta'sirlashadi.

3.3. Sintez va sirt modifikatsiyasi strategiyalari — samaradorlik nuqtai nazaridan .Turli tadqiqotlarda qo'llanilgan sintez strategiyalari va ularning adsorbsion samaradorligiga ta'siri quyidagi jadvalda umumlashtirilgan . Ushbu qiyosiy ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, funksionalizatsiya darajasi ortishi bilan sorbsion sig'im keskin oshadi — modifikatsiyalanmagan tabiiy polimerlar (masalan, oddiy karrageнan) 10–50 mg/g oralig'ida sig'imga ega bo'lsa, maqsadli funksional guruhlar yoki metall oksidi/freymvork tuzilmalari bilan boyitilgan gibrid tizimlar 500–650 mg/g darajasidagi natijalarni namoyon etadi.

3.4. Adsorbsiya izotermalari va kinetik modellar Ko'rib chiqilgan tadqiqotlarning aksariyatida sorbsiya muvozanati Langmuir (monomolekulyar, bir xil energiyali markazlarga ega yutilish) va Freundlich (geterogen yuzada ko'p qatlamli yutilish) izotermalari bilan tavsiflangan, bunda ko'p hollarda Langmuir modeli yaxshiroq moslik ko'rsatgan — bu sorbsiyaning asosan bir qatlamli va lokalizatsiyalangan markazlarda sodir bo'lishidan dalolat beradi. Kinetik jihatdan aksariyat tizimlarda pseudo-ikkinchi tartibli model eksperimental ma'lumotlarga yaxshi mos kelgan, bu esa jarayonning tezligini belgilovchi bosqich sifatida kimyosorbsiya (elektron almashinuvi yoki bo'lishishga asoslangan kimyoviy bog' hosil bo'lishi) ehtimolini kuchaytiradi. Ba'zi tizimlarda, xususan metall oksidi asosidagi nanokompozitlarda, Dubinin–Radushkevich modeli orqali hisoblangan erkin energiya qiymati 16 kJ/mol dan yuqori bo'lib, bu ham kimyosorbsiya mexanizmini tasdiqlaydi.

3.5. Muhit parametrlarining ta'siri Adsorbsiya samaradorligiga quyidagi omillar bevosita ta'sir ko'rsatadi: pH — dori molekulasining ionlanish holati (pKa qiymati) va adsorbent yuzasining zaryadi (pHzpc) o'rtasidagi nisbat sorbsiya samaradorligini belgilaydi; Ion kuchi va organik moddalar (gumin kislotasi) — raqobatdosh ionlar va tabiiy organik

moddalar sorbsion markazlar uchun raqobatlashib, samaradorlikni pasaytirishi mumkin, biroq yuqori selektivlikka ega tizimlarda (masalan, fosfat guruhli polimerlarda) bu ta'sir minimal bo'lgan;Kontakt vaqti — ko'pchilik zamonaviy gibrid nanoadsorbentlarda muvozanat 10–60 daqiqa ichida, ya'ni nisbatan qisqa vaqtda o'rnatiladi, bu amaliy qo'llanish nuqtai nazaridan muhim afzallik hisoblanadi.

3.6. Amaliy qo'llanish va regeneratsiya salohiyati

Yuqori sorbsion sig'imga ega gibrid materiallarning muhim afzalliklaridan biri ularning qayta tiklanish (regeneratsiya) qobiliyati hisoblanadi — bir qator tadqiqotlarda materiallar bir necha marta (odatda 4–5 sikl) qayta ishlatilgach ham sorbsion faolligini sezilarli darajada yo'qotmagani qayd etilgan. Bundan tashqari, magnit xossali komponentlarni (Fe_3O_4, α-Fe_2O_3) kiritish orqali materialni tashqi magnit maydon yordamida osongina ajratib olish mumkinligi ko'rsatilgan, bu esa amaliy jarayonlarda separatsiya bosqichini soddalashtiradi.

XULOSA : O'tkazilgan tadqiqot va adabiyotlar tahlili natijasida polimer-gibrid nanoadsorbentlar asosida farmatsevtik ifloslantiruvchilarni sorbsiyalashning zamonaviy strategiyalari bo'yicha quyidagi asosiy xulosalarga kelindi: Farmatsevtik faol moddalar (antibiotiklar, og'riq qoldiruvchi va gormonal preparatlar) suv resurslarida "yangi turdagi ifloslantiruvchilar" sifatida tobora ko'proq aniqlanmoqda, an'anaviy suv tozalash inshootlari esa ularni past konsentratsiyalarda samarali chiqarib tashlashga qodir emasligi tasdiqlandi. Bu holat yuqori selektiv va samarali sorbsion materiallarni ishlab chiqishni dolzarb ilmiy-amaliy vazifaga aylantiradi. Polimer-gibrid nanoadsorbentlarda sorbsiya jarayoni elektrostatik o'zaro ta'sir, vodorod bog'lanish, π-π stacking va gidrofob ta'sirlashuv kabi bir nechta molekulyar mexanizm orqali sodir bo'lishi aniqlandi, bunda aynan qaysi mexanizm ustunlik qilishi adsorbent tarkibi va nishon dori molekulasining kimyoviy tabiatiga bog'liq. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatdiki, funksionalizatsiya darajasi sorbsion sig'imni belgilovchi hal qiluvchi omil hisoblanadi: modifikatsiyalanmagan tabiiy polimerlar 10–50 mg/g darajasidagi sig'imga ega bo'lsa, maqsadli funksional guruhlar, kovalent organik freymvorklar yoki metall oksidi komponentlari bilan boyitilgan gibrid tizimlar 500–660 mg/g darajasidagi yuqori natijalarni namoyon etadi. Ko'pchilik tadqiqotlarda sorbsiya kinetikasi pseudo-ikkinchi tartibli modelga, muvozanat esa Langmuir izotermasiga yaxshi mos kelgani aniqlandi — bu sorbsiyaning asosan bir qatlamli, lokalizatsiyalangan markazlarda va kimyoviy tabiatga ega tarzda sodir bo'lishidan dalolat beradi. Magnit xossali komponentlarning (Fe_3O_4, α-Fe_2O_3) gibrid tizimga kiritilishi materialni tashqi magnit maydon yordamida oson ajratib olish imkonini beradi, bu esa amaliy qo'llanishda separatsiya bosqichini soddalashtiradi va materialning ko'p martalik regeneratsiya salohiyatini oshiradi.

Shu bilan birga, mavjud adabiyotlarda asosan alohida dori moddalari uchun optimallashtirilgan tizimlar o'rganilgan bo'lib, ko'p komponentli aralashmalardagi raqobatdosh sorbsiya va selektivlik masalasi, shuningdek nanoadsorbentlarning atrof-muhitga ta'siri va biologik xavfsizligi hali yetarlicha chuqur o'rganilmagan — bu kelgusi tadqiqotlar uchun dolzarb yo'nalish bo'lib qolmoqda. Xulosa qilib aytganda, polimer-gibrid nanoadsorbentlar sirt modifikatsiyasi va tarkibiy optimallashtirish orqali farmatsevtik ifloslantiruvchilarni suv muhitidan yuqori samaradorlik bilan chiqarib tashlash imkonini beruvchi istiqbolli material sinfi hisoblanadi. Kelgusi tadqiqotlarni ushbu materiallarning sanoat miqyosida sinovdan o'tkazilishi, real oqava suv sharoitlarida barqarorligi va iqtisodiy jihatdan qulayligini oshirishga qaratish maqsadga muvofiqdir.

ADABIYOTLAR RO‘YHATI:

1. Reis M.H., et al. Conjugated Microporous Polymer Hybrid Microparticles for Enhanced Applicability in Silica-Boosted Diclofenac Adsorption // Small Structures. — 2023. — Wiley Online Library. — DOI: 10.1002/sstr.202200385
2. Development of a high-performance triazole-based covalent organic framework for the adsorption of tetracyclines // Chemical Engineering Journal / ScienceDirect. — 2025
3. Юлдашев А.А., Мухамедов Н.Р. ва бошқ. Адсорбция воды гибридными нанокомпозициями хитозан-кремнезем // Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети, физик кимё кафедраси. — Тошкент.
4. Яркулов А.Ю. ва бошқ. Адсорбционные и термодинамические свойства механических смесей и нанокомпозиций хитозан-кремнезем // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. — 2020. — № 3 (69). — URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/8907
5. Kaczorowska M.A., Bożejewicz D. The Application of Chitosan-Based Adsorbents for the Removal of Hazardous Pollutants from Aqueous Solutions — A Review // Materials. — 2023.
6. Mahmoud M.E., Nabil G.M., et al. Heavy metals removal by EDTA-functionalized chitosan graphene oxide nanocomposites // RSC Advances. — 2017. — Vol. 7. — P. 9764–9779.
7. Vakili M., Deng S., Cagnetta G., et al. Modified magnetic chitosan materials for heavy metal adsorption: a review // RSC Advances. — 2021.
8. Пестов А.В., Ятлук Ю.Г. Хитозан и его производные как сорбенты ионов тяжелых металлов // Журнал прикладной химии. — 2010.
9. Тарасевич Ю.И. Поверхностные явления и адсорбция в дисперсных системах. — Киев: Наукова думка, 2011.
10. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. — СПб.: Химия, 2010.
11. Adsorbent Materials Based on Modified Chitosan for Purification of Aqueous Media from Pharmaceutical Residues, Primarily Antibiotics // Polymers (MDPI). — 2025. — Vol. 17. — № 19. — Art. 2601.
12. A sustainable solution for diclofenac adsorption: Chitosan-modified fibrous silica KCC-1 adsorbent // ScienceDirect. — 2023.