

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

XUDAYBERDIYEV NOSIRJON ERGASHEVICH

**IKKILAMCHI TERMOPLASTLAR VA TERMOREAKTIV
QATRONLARDAN KO‘MIRLI ADSORBENTLAR OLISHNING
KOLLOID-KIMYOVIY ASOSLARI**

02.00.11 – Kolloid va membrana kimyosi

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

Falsafa doktori (PhD) Dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
Content of the dissertation abstract of doctor of Philosophy (PhD)

Xudayberdiyev Nosirjon Ergashevich

Ikkilamchi termoplastlar va termoreaktiv qatronlardan ko‘mirli adsorbentlar olishning kolloid-kimyoviy asoslari 3

Худайбердиев Носиржон Эргашевич

Коллоидно-химические основы создания угольных адсорбентов из вторичных термопласта и терморективной смолы..... 21

Khudayberdiev Nosirjon

Colloid-chemical principles for the development of carbon adsorbents from secondary thermoplastics and thermosetting resin..... 39

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

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

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

XUDAYBERDIYEV NOSIRJON ERGASHEVICH

**IKKILAMCHI TERMOPLASTLAR VA TERMOREAKTIV
QATRONLARDAN KO‘MIRLI ADSORBENTLAR OLISHNING
KOLLOID-KIMYOVIY ASOSLARI**

02.00.11 – Kolloid va membrana kimyosi

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

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestasiya komissiyasida B2025.2.PhD/K963 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya ishi Namangan davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus va ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.namdtu.uz) va «ZiyoNet» axborot ta’lim tarmog‘iga (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Ergashev Oybek Karimovich
kimyo fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Salixanova Dilnoza Saidakbarovna
texnika fanlari doktori, professor

Abdulxayev Tolibjon Dolimovich
kimyo fanlari doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Fargona davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi **DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02** raqamli Ilmiy kengashning « 12 » avgust 2025 yil 11⁰⁰ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7-uy. Tel.: (69) 234-14-85; faks: (69) 228-14-85, e-mail: info@namdtu.uz), Namangan davlat texnika universiteti, 6-bino, 1-qavat, Ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (43-raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7. Tel.:(69) 225-10-07).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «29» iyul kuni tarqatildi.
(2025 yil «29» iyuldagi № 21- raqamli reestr bayonnomasi).

Shamshidinov I.T.

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi o‘rinbosari, t.f.d., professor

Mallabayev O.T.

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash kotibi, k.f.f.d., dotsent

Sherqo‘ziyev D.Sh.

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar
raisi, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) Dissertatsiyasi annotasiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Butun dunyoda suvni tozalashning dolzarb muammolaridan biri bu maishiy va sanoat faoliyati natijasida hosil bo'ladigan oqava suvlardan fenollar va farmatsevtik birikmalar kabi bardavom organik ifloslantiruvchilarni yo'qotish masalasi hisoblanadi. Ushbu birikmalarning biologik parchalanishga nisbatan yuqori chidamliligi samarali fizik-kimyoviy tozalash usullarini ishlab chiqishni talab qiladi, ularning orasida adsorbsiya usuli universalligi sababli yetakchi o'rinni egallaydi. Shu bois polimer chiqindilaridan, xususan, ularning termik va kimyoviy faollashtirilishi orqali ko'mirli adsorbentlar olish, g'ovakli tuzilmasi, sirt tarkibi va sorbsiya xossalarini maqbullashtirish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda barqaror organik ifloslantiruvchilarga nisbatan yuqori selektivlikka va sorbsiya sig'imiga ega samarali sorbent materiallarni ishlab chiqishga qaratilgan ilmiy va amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Shu munosabat bilan, ikkilamchi polimer chiqindilar asosida uglerodli adsorbentlar olish, ularni termik va kimyoviy faollashtirish, azot va oltingugurt tutuvchi qo'shimchalar bilan modifikatsiyalash, faollashtirish sharoitlari hamda modifikatorlar tarkibining uglerod matritsasining tuzilmasi va g'ovakligiga ta'siri, shuningdek, polimer xomashyodan samarali sorbentlar olishga qaratilgan ekologik asoslangan va resurs tejamkor texnologiyalarni ishlab chiqish masalalariga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Respublikada mahalliy xomashyo va sanoat chiqindilari asosida yangi adsorbentlar olish bo'yicha ilmiy va amaliy natijalarga erishilgan. Yangi O'zbekiston taraqqiyot strategiyasining 2022-2026 yillarga mo'ljallangan uchinchi yo'nalishida «Milliy iqtisodiyot barqarorligini ta'minlash va ichki yalpi mahsulotda sanoat ulushini oshirish, sanoat mahsulotlari ishlab chiqarish hajmini 1,4 baravarga ko'paytirish...»¹ kabi vazifalar belgilangan. Shu nuqtai nazardan, yuqori samaradorlikka ega adsorbsion materiallar yaratish, ularning g'ovakli tuzilmasi, kolloid-kimyoviy va adsorbsion xossalari o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlashga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar alohida ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026 yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi, 2017 yil 7 fevraldagi PF-4947-sonli "2017-2021 yillarda O'zbekiston Respublikasini rivojlantirishning beshta ustuvor yo'nalishi bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi Farmonlari, shuningdek, 2017 yil 23 avgustdagi PQ-3236-sonli "2017-2021 yillarda kimyo sanoatini jadallik bilan rivojlantirish dasturi to'g'risida", 2018 yil 25 oktyabrdagi PQ-3983-sonli "O'zbekiston Respublikasida kimyo sanoatini jadallik bilan rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi va mazkur soha bilan bog'liq boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarning amalga oshirilishiga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotlarning respublika fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va

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

texnologiyalar rivojlanishining VII “Kimyoviy texnologiyalar va nanotexnologiyalar” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Jahon ilmiy tajribasida barqaror organik ifloslantiruvchilarni oqava suvlardan tozalash uchun yuqori samarali uglerodli sorbentlarni yaratishga qaratilgan faol tadqiqotlar olib borilmoqda. G‘ovakli tuzilma shakllanishining asoslari, uglerodli materiallarning termik va kimyoviy faollashtirilishi, xomashyo tabiatining va modifikatsiya sharoitlarining ta’siri P.Rebinder, G.Tsvik, R.Rouli, J.M. Stencel, F. Rodríguez-Reinoso, A. Linares-Solano, J. Hayashi, L. Mochidzuki, M. Sevilla kabi ilmiy maktablar tadqiqotlarida asoslab berilgan.

O‘zbekistonda esa professor K.S.Ahmedov rahbarligida turli kelib chiqishga ega sorbentlarning tuzilmasi va xossalarini kolloid-kimyoviy yondashuv asosida o‘rganishga yo‘naltirilgan ilmiy maktab shakllangan. Ushbu maktab vakillari E.A. Aripov, F.L.Glekel, S.S.Hamrayev, S.N.Aminov, A.A.Agzamxodjayev, U.K.Ahmedov, G.U. Rahmatkariyev, S.Z.Mo'minov, B.N.Hamidov, V.P.Guro, G.R.Narmetova, S.A.Abdurahimov, I.K.Satayev, O.K.Beysenbayev, O.K.Ergashev, I.D.Eshmetov, Sh.A.Kuldasheva, D.S.Salixanova A.B.Abdikamalova, D.J.Jumayeva va boshqalar adsorbsiyaning ilmiy asoslarini, jumladan, suv muhitlarini tozalash jarayonlarida muhim tadqiqotlarni amalga oshirganlar.

Adabiyotlar tahliliga ko‘ra, uglerodli adsorbentlarni yaratish sohasida erishilgan yutuqlarga qaramay, polimer matritsalar tarkibi va tuzilmasining, termik va kimyoviy faollashtirish sharoitlarining, shuningdek, geteroatomli modifikatorlar qo‘llanishining mikrog‘ovaklilik, funksional guruhlar va adsorbsion faollik shakllanishiga ta’siri masalalari yetarli darajada o‘rganilmaganligicha qolmoqda.

Dissertatsiya mavzusining, dissertatsiya bajarilayotgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Namangan muhandislik-texnologiya instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq 2023-2024 yillarga mo‘ljallangan “Termoreaktiv polimer chiqindilaridan (BMS) to‘ldiruvchi sifatida foydalanilgan holda qurilish materiallari ishlab chiqarish” mavzusidagi loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi ikkilamchi termoplastlar va termoreaktiv qatronlardan uglerodli adsorbentlar olishning kolloid-kimyoviy asoslarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

fenol-formaldegid qatroni (FFQ) va polistirol (PS) asosidagi polimer chiqindilarining termik tahlilini o‘tkazish, ularning termobarqarorligi, uglerodning unumi va termik destruksiya xususiyatlarini hisobga olgan holda maqbul karbonlash sharoitlarini aniqlash;

PAN miqdorining FFQ va PS asosidagi uglerod materiallarida uglerodning unumi, mikrotuzilishi va tartiblilik darajasiga ta’sirini o‘rganish;

kimyoviy faollashtirish orqali morfologiyasi, g‘ovakli tuzilmasi ba teksturaviy xususiyatlarining o‘zgarishini tadqiq qilish, faollashtirishning optimal sharoitlarini aniqlash;

rentgen fazaviy va IQ-spektral tahlil ma'lumotlari asosida faollashtirish sharoitlarining uglerod materiallarining kristallanish, nuqsonlilik darajasi ba funksional tarkibiga ta'sirini baholash;

sintez qilingan adsorbentlarda organik ifloslantiruvchilar (fenol, uning hosilalari va sefazolin) ning adsorbsiyasi kinetikasi ba izotermalarini o'rganish, Lengmyur modellari parametrlarini aniqlash;

uglerod materiallarining tuzilma va tekstura xususiyatlari bilan ularning sorbsiya faolligi o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash ba tanlangan faollashtirish usullarining samaradorligini asoslash.

Tadqiqotning obyekti sifatida PS va FFQ chiqindilari, shuningdek, ularga PAN qo'shimchalari hamda natriy gidroksidi yordamida faollashtirish orqali olingan uglerodli materiallar tanlab olingan.

Tadqiqotning predmeti polimer xomashyosining tabiati, karbonizatsiya sharoiti, modifikatsiyalovchi qo'shimchalar tarkibi va kimyoviy faollash darajasining olingan uglerod adsorbentlarining tuzilishi, teksturaviy xususiyatlari va sorbsiya faolligiga ta'siri hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Dissertatsiya ishini bajarishda dispers tizimlarning fizik-kimyoviy (IQ-spektroskopik, rentgen fazaviy, mikroskopik, termik) va kolloid-kimyoviy (adsorbsion, kalorimetrik, titrimetrik) xossalari aniqlashga mo'ljallangan zamonaviy va an'anaviy usullar keng qo'llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

10 og'. % PAN qo'shilishi FFQ va PS tizimlarida 800 °C da uglerod qoldig'i unumini modifikatsiyalanmagan namunalar bilan solishtirganda kamaytirib, bu aromatik barqarorlashuv va azot tutuvchi tuzilmalar uglerod skeletiga kiritilishi bilan bog'liqligi aniqlangan;

NaOH ishtirokida 1:0,8 nisbatda amalga oshirilgan ishqoriy faollashtirish AFFQ-0,8 uchun 132 m²/g va APS-0,8 uchun 118 m²/g gacha bo'lgan maksimal solishtirma sirt yuzasini ta'minlashi, bu esa skeletning optimal darajadagi emirilishi va mikrog'ovakli tuzilma shakllanishi bilan bog'liqligi aniqlangan;

FFQ+PAN-10 va PS+PAN-10 namunalarining solishtirma sirt yuzasi mos ravishda 94,12 m²/g va 82,24 m²/g ga etishi, shu bilan birga mezog'ovaklar hajmi 0,1585 sm³/g (FFQ) va 0,1923 sm³/g (PS) ni tashkil qilishi, bu esa samarali termostrukturalash va mikrodefektlar shakllanishi bilan bog'liqligi asoslangan;

AFFQ-0,8 va APS-0,8 modifikatsiyalangan sorbentlarining fenolga nisbatan maksimal sorbsiya sig'imi mos ravishda 58 va 31 mg/g ni tashkil qilishi, bu ko'rsatkichlarning modifikatsiyalanmagan namunalar (FFQ-800 13 mg/g; PS-800 8,2 mg/g) bilan solishtirganda 4-7 barobar yuqoriligi, yuqori mikrog'ovak zichligi va funksional guruhlar mavjudligi bilan bog'liqligi isbotlangan;

AFFQ-0,8 namunasi sefazolin moddasini 49 mg/g gacha adsorbsiyalashi, bu ko'rsatkich tijorat aktiv ko'miri uchun atigi 19 mg/g ni tashkil qilishi, bunda sirtning funksional guruhlarga boyligi va antibiotik molekulalariga yuqori affiniglik bilan bog'liqligi aniqlangan;

Langmyur modeli bo'yicha eng yaxshi adsorbsion parametrlar AFFQ-0,8 namunasi uchun aniqlanib, fenol bo'yicha $A_0 = 0,23$ mmol/g, $K = 38,6$ va $\Delta G = -11,3$ kJ/mol, sefazolin bo'yicha esa $A_0 = 0,16$ mmol/g, $K = 41,38$ ni tashkil qilishi,

bu fizik-kimyoviy adsorbsiyaning vodorodli va π - π o‘zaro ta’sirlar orqali amalga oshishini ko‘rsatishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijasi quyidagilardan iborat:

polistirol va fenol-formaldegid qatroni chiqindilaridan modifikatorlar (PAN) va ishqoriy faollashtiruvchi (NaOH) qo‘llagan holda uglerodli adsorbentlar olishning maqbul sharoitlari ishlab chiqilgan;

faollashtirilgan uglerodlardan organik birikmalar, ya’ni fenollar, antibiotiklar va bo‘yoqlardan ifloslangan oqava suvlarini adsorbsion tozalashda foydalanishning ilmiy asoslari aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Ilmiy tadqiqotlar zamonaviy fizik-kimyoviy va kolloid-kimyoviy usullar asosida olib borilgan, tajriba sinovlari esa laboratoriya va ishlab chiqarish sharoitlarida amalga oshirilgan hamda “KHANTEX GROUP” MCHJ tomonidan berilgan sinov dalolatnomalari bilan tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati polimer chiqindilari asosida olingan uglerodli adsorbentlarni olishda modifikatsiyalash, karbonlash va kimyoviy faollashtirish jarayonlarining sorbsiya xossalari bilan bog‘liqligini ochib berish orqali, organik ifloslantiruvchilarga nisbatan sorbsiya faolligini belgilovchi omillarni aniqlash va uglerod materiallarining struktura-faollik bog‘liqligini tushunishda nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati PS va FFQ chiqindilari asosida yuqori sorbsiya xossalariga ega bo‘lgan yangi uglerodli adsorbentlar olish texnologiyasini ishlab chiqish, ularni farmatsevtik moddalardan ifloslangan oqava suvlarda qo‘llash imkoniyatlarini asoslash, shuningdek, mazkur ilmiy natijalarni oliy ta’lim muassasalarida kimyo, kimyoviy va farmatsevtik texnologiya yo‘nalishlari bo‘yicha magistrlar tayyorlash jarayonida o‘quv jarayoniga joriy etish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Polimer chiqindilari asosida adsorbentlar olish bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

0,8 NaOH ishtirokida 800 °S da termokimyoviy faollantirish orqali olingan uglerodli adsorbent (APS-0,8) “KHANTEX GROUP” MChJda fenol birikmalari va fenolli bo‘yoqlar bilan ifloslangan to‘qimachilik oqava suvlarini tozalashda joriy etilgan (O‘zbekiston Respublikasi “O‘zto‘qimachilik sanoat” uyushmasining 2025 yil 22 apreldagi 03/25-2772-sonli ma’lumotnomasi). Natijada, fenol birikmalari konsentratsiyasi 22 mg/l dan 0,8 mg/l gacha, bo‘yoqlar esa 29 mg/l dan 0,2 mg/l dan kamroq darajaga kamaytirish, shuningdek, umumiy organik moddalarning miqdori 128 mg/l dan 1,8 mg/l gacha pasaytirish, barqaror organik ifloslantiruvchilarni samarali ajratib olish imkonini bergan;

fenol-formaldegid qatroni va poliakrilonitril asosida termokimyoviy faollashtirish yo‘li bilan olingan AFFQ-0,8 uglerodli adsorbent “KHANTEX GROUP” MChJda umumiy oqava suvlardan fenol birikmalari va organik modda qoldiqlarini tozalashda joriy etilgan (O‘zbekiston Respublikasi “O‘zto‘qimachilik sanoat” uyushmasining 2025 yil 22 apreldagi 03/25-2772-sonli ma’lumotnomasi). Natijada, fenol birikmalarining konsentratsiyasi 2,2 mg/l dan 0,2 mg/l dan past darajaga, umumiy organik moddalarning miqdorini 36,5 mg/l dan 9,2

mg/l gacha kamaytirish, oqava suvlari chuqur tozalash talablari bo'yicha yuqori samaradorlikka erishish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 16 ta, jumladan 2 ta xalqaro va 10 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 17 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, 1 ta maqola xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, 4 ta asosiy bo'lim, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 117 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida ishning dolzarbligi va o'tkazilgan tadqiqotning ehtiyojdorligi asoslab berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari yoritilgan, ishning O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqot natijalarining ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot davomida erishilgan ilmiy va amaliy natijalar, tajriba-sanoat sinovlari, e'lon qilingan ilmiy maqolalar hamda dissertatsiyaning tuzilmasi haqida ma'lumot berilgan.

Dissertatsiyaning **“Sorbsiya jarayonlari va zamonaviy adsorbentlar. Oqava suvlardan tozalash uchun sorbsiya materiallarini yaratishda polimer chiqindilar”** deb nomlangan birinchi bobida sintetik polimerlarni, xususan, fenol-formaldegid qatroni va polistirolni qayta ishlash orqali uglerodli adsorbentlar olish masalalari tahlil qilingan, barqaror organik ifloslantiruvchilar jumladan, fenol birikmalari, bo'yoqlar va antibiotiklarni oqava suvlardan fizik-kimyoviy usullar bilan tozalashga oid dolzarb yo'nalishlar ko'rib chiqilgan.

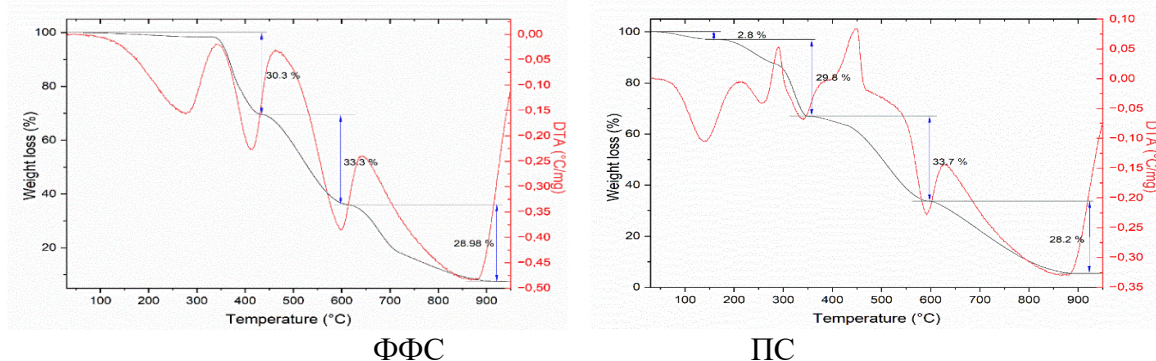
Adabiyotlar sharhida polimer materiallarni termik va kimyoviy faollantirishga, shuningdek, poliakrilonitril kabi modifikatsiyalovchi qo'shimchalarning hosil bo'lgan uglerodli sorbentlarning tuzilmasi, g'ovakligi va sorbsiya xossalariga ta'siriga doir ilmiy ma'lumotlar umumlashtirilgan. O'tkazilgan tahlillar asosida ikkilamchi polimerlar asosida yuqori samarali adsorbentlar sintezi uchun tanlangan yondashuv asoslab berilgan hamda ushbu tadqiqot ishining maqsad va vazifalarini shakllantirishga imkon bergan.

Dissertatsiyaning **“Uglerodli adsorbentlar yaratish uchun obyektlarni tanlash va ularni termik ishlov berish jarayonlarini o'rganish”** deb nomlangan ikkinchi bobida polistirol va fenol-formaldegid qatroni chiqindilarining asosiy xossalarini o'rganishga oid tadqiqot natijalari bayon qilingan.

Polistirol (PS) va fenol-formaldegid qatronlari (FFQ) qurilish, qadoqlash, elektrtexnika va mebel sanoatida keng qo'llaniluvchi eng ommaviy sintetik polimerlar sirasiga kiradi. Tadqiqotda boshlang'ich obyekt sifatida O'zbekistonning “Termozon” MCHJ korxonasi olingan ikkilamchi FFQ va PS chiqindilaridan foydalanilgan. FFQ namunasi qora rangli, silliqashtirilgan va so'ndirilgan holatda,

cho‘yan shaklidagi granulali press-material ko‘rinishida bo‘lib, tarkibida to‘ldiruvchi sifatida qora uglerod (saja) mavjud bo‘lgan. PS esa ikki xil chiqindi shaklida bo‘lgan bo‘lib, ular 20-30 mm qalinlikdagi oq rangli, ko‘piklangan plast massali plitalardan iborat bo‘lgan.

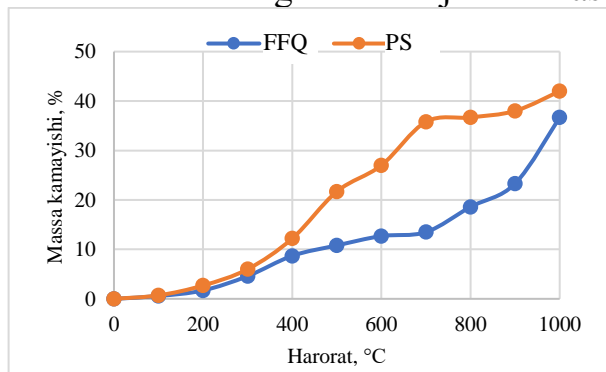
FFQ PSga nisbatan yuqoriroq zichlikka ($1,30-1,35 \text{ g/sm}^3$) ega bo‘lib, bu uning aromatik va bog‘lovchi tuzilmasining zichroq ekanligini ko‘rsatadi. FFQning termik parchalanuv harorati ($\sim 300-350 \text{ }^\circ\text{C}$) ham PSga nisbatan ($\sim 280-320 \text{ }^\circ\text{C}$) balandroq bo‘lib, bu uning yuqori termik barqarorligidan dalolat beradi. Shu bilan birga, FFQ termoreaktiv polimer bo‘lganligi sababli, PSdan farqli ravishda, aniq erish haroratiga ega emas, PS esa taxminan $100 \text{ }^\circ\text{C}$ da yumshashni boshlaydi.



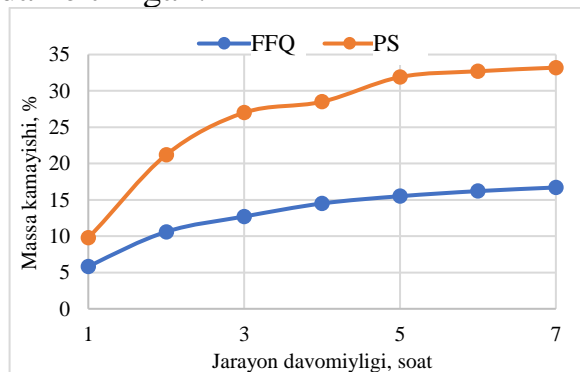
1-rasm. Polimer namunalarning kompleks termik tahlili.

Ta‘qdim etilgan PS namunasi termogrammasida inert muhitda olingan TG va DSC egri chiziqlari tasvirlangan. TG egri chizig‘ida massa yo‘qotilishining bir bosqichli xarakteri kuzatilib, bu jarayon taxminan $347 \text{ }^\circ\text{C}$ atrofida boshlanib, $463 \text{ }^\circ\text{C}$ da yakunlanadi, DTG egri chizig‘ida esa parchalanish tezligining maksimumi $421 \text{ }^\circ\text{C}$ da qayd etilgan. $600 \text{ }^\circ\text{C}$ da umumiy massa yo‘qotilishi taxminan 65% ni, $900 \text{ }^\circ\text{C}$ da esa $92,6 \%$ ni tashkil etadi, bu esa polimerning organik matritsasining deyarli to‘liq termik parchalanishi va faqat juda kam miqdorda qattiq qoldiq hosil bo‘lishini ko‘rsatadi. Bu holat PS uchun xos bo‘lib, uning tuzilmasi monomerli stiro, benzol va boshqa aromatik birikmalar kabi uchuvchan mahsulotlar hosil qiluvchi depolimerlanish jarayonlariga moyilligini bildiradi.

Tadqiq qilinayotgan obyektlarning inert muhitda termik ishlov berish harorati ta‘sirida massa o‘zgarishi natijalari 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Namunalarning termik ishlov berish jarayonida massa kamayishi.

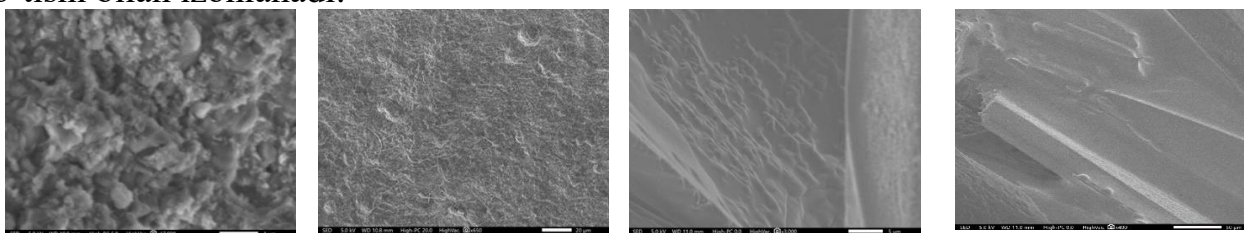


3-rasm. Namunalarning $600 \text{ }^\circ\text{C}$ da termik ishlov berish davomiyligiga bog‘liq holda massa o‘zgarishi.

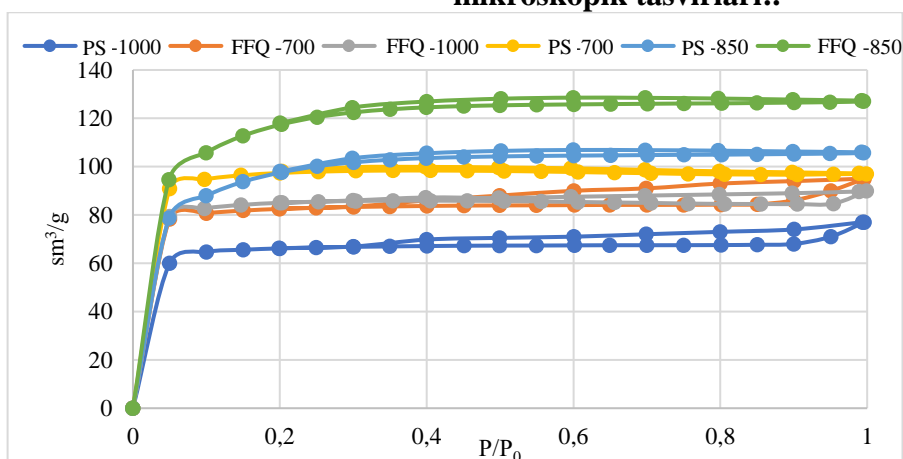
2-rasmdagi grafik tahlili shuni ko‘rsatadiki, inert muhitda qizdirilganda PS $400 \text{ }^\circ\text{C}$ dan boshlab intensiv parchalanishni boshlaydi, FFQda esa bu jarayon

nisbatan barqaror va bir maromda kechadi. 500 °C da PS namunalari da massa yo‘qotilishi 21,7 % ni tashkil etsa, FFQda bu ko‘rsatkich atigi 10,8 % ni tashkil etadi. 1000 °C gacha bo‘lgan umumiy massa yo‘qotilishi PS uchun 42 % va FFQ uchun 36,7 % bo‘lib, FFQning termik parchalanish jarayoni barqarorroq ekanligi va uglerod qoldig‘i hosil qilish salohiyati yuqoriligi aniqlangan.

3-rasmda 600 °C da 7 soat davomida PS va FFQ namunalari ning massa yo‘qotish dinamikasi ko‘rsatilgan. PS dastlabki 3 soatda massaning 27 % ini tezda yo‘qotadi va so‘ngra jarayon barqarorlashib, umumiy yo‘qotish 33,2 % ni tashkil etadi. FFQda esa parchalanish bir tekis kechadi: dastlabki 3 soatda 12,7 % massa yo‘qotiladi, jarayon yakunida esa 16,7 % ga yetadi. Bu esa FFQning yuqori termik barqarorligi va uning to‘rli tuzilmasining bosqichma-bosqich uglerodlanishga o‘tishi bilan izohlanadi.



1) 2) 3) 4)
4-rasm. 1 va 2 – PS hamda 3 va 4 – FFQ asosidagi uglerodli namunalarning elektron mikroskopik tasvirlari:.



5-rasm.
Namunalarda azotning adsorbsiya-desorbsiya izotermalari (yuqoridan pastga): 1) FFQ-850; 2) PS-850; 3) PS-700; 4) FFQ-1000; 5) FFQ-700; 6) PS-1000.

700 °C da pirolizdan so‘ng olingan uglerod qoldiqlarining mikrofotosuratlarini shuni ko‘rsatdiki, FFQ zich, bir jinsli, mayda yoriqli va mikrog‘ovakli tuzilma hosil qiladi, PS esa katta bo‘shliqlar va ko‘plab yoriqlarga ega bo‘lgan bo‘sh, yuqori g‘ovakli skelet shakllantiradi. Pirolizdan so‘ng FFQ monolit uglerod matritsasini saqlab qoladi, unda shisha-ko‘mirga xos belgilar va bir tekis g‘ovaklik kuzatiladi, PS esa tartibsiz, parchalangan va past uglerodlanish darajasiga ega bo‘lgan tuzilma bilan tavsiflanadi. Har ikkala material ham amorf tabiatga ega bo‘lsa-da, FFQdan olingan uglerod yuqori barqarorlik va yaxlitlik bilan ajralib turadi.

5-rasmda keltirilgan azotning adsorbsiya-desorbsiya izotermalari mezog‘ovakli va makrog‘ovakli tuzilmalarga mos kelib, shakli bo‘yicha IUPAC tasnifi bo‘yicha IV-turga mansub bo‘lib, $P/P_0 > 0,4$ da yaqqol namoyon bo‘lgan kapillyar kondensatsiya sohasiga ega.

Ko'mir namunalarning teksturaviy xususiyatlari

Namuna	S_{sol} , m ² /g	V_1 , sm ³ /g	V_2 , sm ³ /g	R, Å	O'rtacha gidravlik g'ovak radiusi (V/A)
FFQ-700	52,33	0,0902	0,0137	80,603	6,226
FFQ-850	94,12	0,1293	0,0162	64,169	3,592
FFQ-1000	63,10	0,1102	0,0145	77,256	5,412
PS-700	65,26	0,1122	0,0173	80,607	3,578
PS-850	82,24	0,1229	0,0142	64,186	3,656
PS-1000	51,83	0,0831	0,0161	81,922	5,422

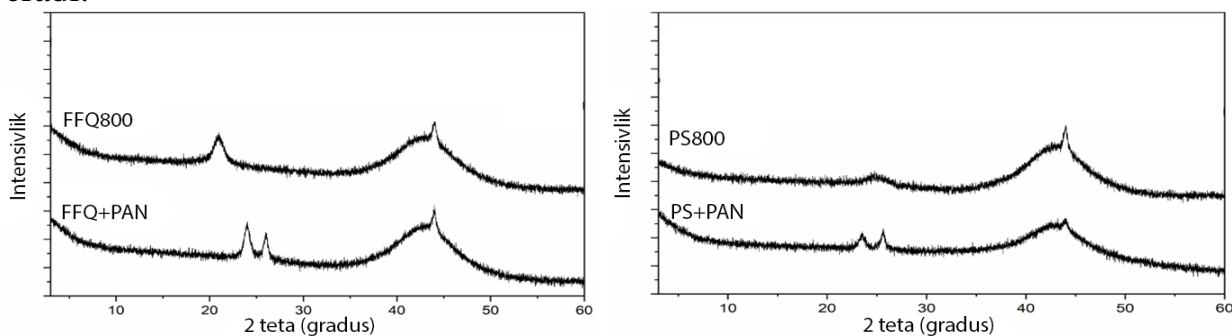
Teksturaviy xususiyatlar tahlili shuni ko'rsatdiki, FFQ va PS uchun eng yuqori solishtirma sirt maydoni va g'ovak hajmi qiymatlari 850 °C da kuzatilgan. FFQ namunasi uchun sirt maydoni 94,12 m²/g, umumiy g'ovak hajmi esa 0,1293 sm³/g ni tashkil etib, ularning asosiy qismini mezog'ovaklar (0,1131 sm³/g) tashkil etgan. 700 °C va 1000 °C da bu ko'rsatkichlar kamaygan bo'lib, bu haroratlarda strukturaning yetarlicha parchalanmasligi yoki sinterlanib qolishi bilan izohlanadi. PS namunasi ham 850 °C da maksimal sirt maydoni – 82,24 m²/g va g'ovak hajmi – 0,1229 sm³/g ni ko'rsatgan, boshqa haroratlarda esa ushbu ko'rsatkichlar pasaygan. Shunday qilib, 850 °C harorati har ikkala tizimda rivojlangan mezog'ovakli tuzilma shakllanishi uchun optimal deb topilgan.

Dissertatsiyaning **“Azot tutuvchi modifikatorlarning uglerodli adsorbentlar tuzilmasi, tarkibi va g'ovakligiga ta'sirini o'rganish”** deb nomlangan uchinchi bobida FFQ va PS asosidagi faollashtirilgan ko'mirlarda turli omillarning g'ovakli tuzilma shakllanishiga ta'siri bo'yicha o'tkazilgan tadqiqot natijalari bayon qilingan.

PAN chiqindilari va natriy gidroksid tanlanishi uglerodli adsorbentlarning g'ovakli tuzilmasini maqsadli shakllantirish zarurati bilan izohlanadi. PAN qo'shilishi termik ishlov paytida gazsimon mahsulotlarning ajralishi hisobiga g'ovaklik rivojlanishiga xizmat qiladi: nitril va boshqa azot tutuvchi guruhlar yuqori haroratgacha tuzilmada saqlanadi va faqat grafitlanish bosqichida parchalanib, qo'shimcha mikrog'ovaklar hosil qiladi hamda solishtirma sirt maydonini oshiradi. Uglerod chiqishi biroz kamayganiga qaramay, PAN qo'shilishi materialning teksturaviy xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilashga imkon beradi. Natriy gidroksid esa kimyoviy faollashtiruvchi sifatida polimer matritsasini parchalash, degidratatsiyani faollashtirish va mikronuqsanlar hosil qilish orqali rivojlangan mikrog'ovakli tuzilma shakllanishiga va uglerodli adsorbentlarning sorbsiya sig'imini oshirishga xizmat qiladi.

PANning uglerod qoldig'i unumiga ta'sirini o'rganish uchun PAN miqdori 0-20 mass.% oralig'ida bo'lgan aralashmalarning karbonizatsiyasi asosida taqqoslovchi tahlil metodikasi ishlab chiqildi. Boshlang'ich komponentlar (FFQ yoki PS) maydalanib, PAN bilan aralastirildi, 105 °C da quritildi va inert muhitda bosqichli termik ishlovga tortildi: 250 °C da stabilizatsiya va 700 °C da karbonizatsiya. Sovitilgach, namunalari tortildi va uglerod chiqishi qoldiq massasining dastlabki massaga nisbati sifatida hisoblab chiqildi. PAN miqdorining uglerod chiqishiga bog'liqligini aks ettiruvchi grafiklar asosida uning g'ovaklik hosil qiluvchi va modifikatsiyalovchi komponent sifatidagi roli baholandi.

PAN qo‘shilishi FFQ va PS namunalarida termik ishlov jarayonida massa yo‘qotilishini kuchaytiradi. Masalan, FFQ uchun 200 °C da PANsiz holatda massa yo‘qotilishi 1,7 % bo‘lsa, 10 % PAN qo‘shilganda bu ko‘rsatkich 2,34 % ga yetadi; 500 °C da esa mos ravishda 10,8 % dan 12,18 % gacha oshadi. 1000 °C da qoldiq massa 36,7 g dan 38,7 g gacha kamayadi, bu esa atigi 6 % dan kam o‘zgarishni anglatadi. PSda PAN ta’siri yanada yaqqol: 10 % PAN bilan massa yo‘qotilishi 42 % dan 51,2 % gacha ortadi. Shunday qilib, PAN kiritilishi parchalanish va gaz ajralishini kuchaytirib, rivojlangan g‘ovakli tuzilmaning shakllanishiga yordam beradi.



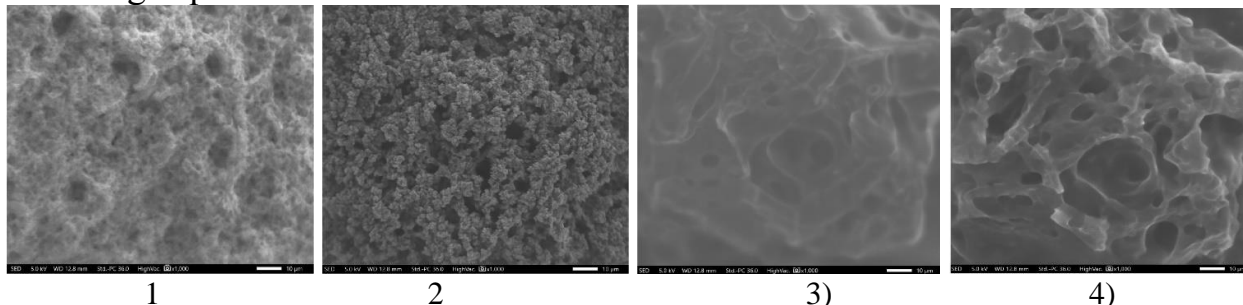
6-rasm. Uglерodli namunalar – FFQ-800 va PS-800 (PANsiz va 5 % PAN qo‘shilgan holatda) uchun sxematik XRD-difraktogrammalar.

Rentgenofazoviy tahlili shuni ko‘rsatdiki, FFQ-600 namunasi $\sim 22^\circ 2\theta$ da keng amorf cho‘qqi bilan xarakterlanadi, 800 °C da (FFQ-800) esa (002) cho‘qqining ($\sim 26^\circ 2\theta$) torayishi va kuchayishi, shuningdek, (100) cho‘qqisining ($\sim 43^\circ 2\theta$) yelkasi paydo bo‘lishi grafitga o‘xshash sohalarning shakllanishini va tuzilmaning tartiblanishini ko‘rsatadi. PS-600 namunasi deyarli aniq cho‘qqilarga ega emas, PS-800 esa $\sim 25^\circ 2\theta$ atrofida xira va keng cho‘qqi ko‘rsatadi, bu aromatik tuzilmalarning qisman shakllanganini, ammo umumiy tuzilmada amorflik saqlanib qolganini bildiradi. PAN qo‘shilishi aromatik fragmentlar shakllanishini kuchaytiradi: PAN qo‘shilgan PS namunasi 800 °C da (002) cho‘qqining paydo bo‘lishini ko‘rsatadi, garchi tuzilma yuqori darajada nuqsonli bo‘lib qolsa ham. FFQ uchun PAN qo‘shilishi defektlilikni oshiradi, biroq yaqqol yaqin tartib va qatlam ichidagi korrelyatsiyani saqlab qoladi. PANdagi azotli guruhlar qatlamlararo masofani kengaytiradi, biroq bir fazali tuzilmani saqlaydi. Demak, PAN qo‘shilishi aromatik kondensatsiya va tartibli sohalarning rivojlanishiga yordam beradi, ayniqsa, termik barqarorligi nisbatan past bo‘lgan PS asosidagi tizimlarda.

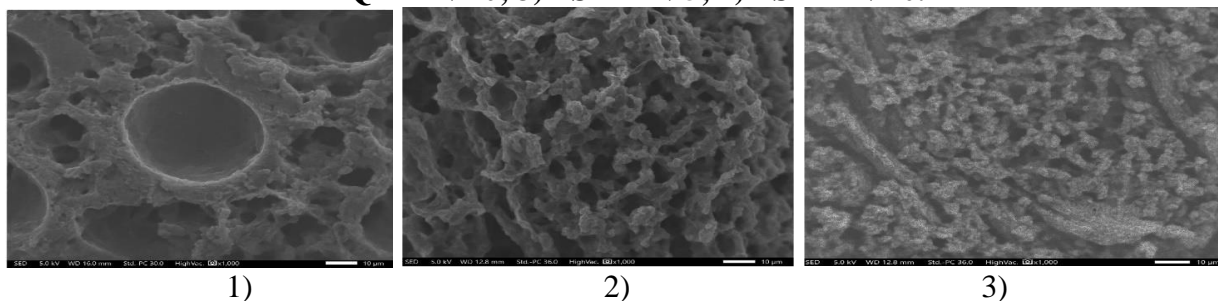
Faollashtirilgan uglерod materiallarini olish uchun PS+PAN va FFQ+PAN aralashmalari NaOH bilan (1:0,1–1:2 nisbatda) ikki bosqichli termik ishlovga tortilgan. Birinchi bosqichda PANning siklizatsiyasi va FFQning issiqlik bog‘lanishini ta‘minlash maqsadida 250-300 °C da havo oqimida stabilizatsiya o‘tkazilgan. Ikkinchi bosqichda inert (azot) muhitda 700-800 °C haroratda karbonizatsiya va ishqoriy faollashtirish amalga oshirilgan. Aksiya davomida NaOH degidratatsiya va gaz fazasidagi reaksiyalar orqali mikrog‘ovaklar hosil bo‘lishiga yordam bergan. Sovutilgandan so‘ng namunalar suv va 0,1 M HCl eritmasi bilan neytral pH ga erishilgunga qadar yuvilib, 105 °C da quritilgan.

FFQ+PAN-5 namunasi zich tuzilma, notekis sirt va alohida mikrog‘ovaklar bilan xarakterlanadi, 10 % PAN qo‘shilganda esa g‘ovaklik sezilarli darajada ortadi,

sirt bo'shroq va hujayraviy ko'rinish oladi, bu azotning kiritilishi hisobiga mikroteksturani rivojlanishini ko'rsatadi. PS asosidagi namunalar uchun PAN ta'siri yanada kuchliroq namoyon bo'ladi: 5 % PAN bilan g'ovaklik past bo'lsa, 10 % da g'ovaklar soni va o'lchami keskin ortadi, yupqa devorlarga ega yengil hujayraviy tuzilma shakllanadi, bu esa piroliz jarayonida yuz beradigan aromatik kondensatsiya bilan bog'liqdir.

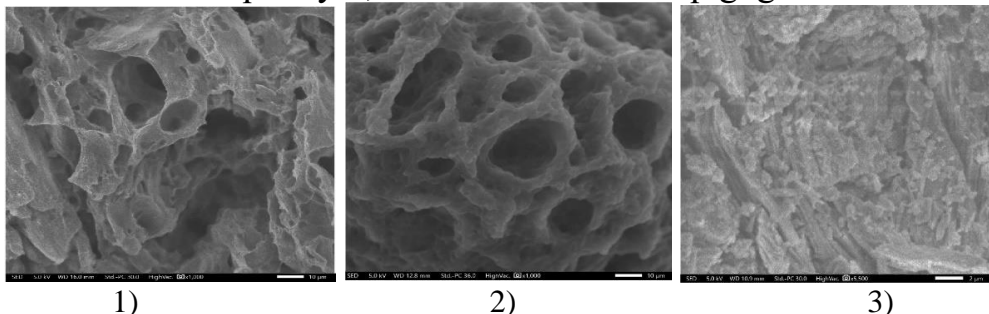


7-rasm. 800 °C da olingan uglerodli namunalar sirt morfologiyasi: 1) FFQ+PAN-5; 2) FFQ+PAN-10; 3) PS+PAN-5; 4) PS+PAN-10.



8-rasm. FFQ+PAN-10 namunalarining turli NaOH nisbatlarida olingan mikrosuratlar: 1) FFQ/NaOH = 1/0,4; 2) FFQ/NaOH = 1/0,8; 3) FFQ/NaOH = 1/1,5.

FFQ+PAN-10 namunalarining mikrosuratlarini tahlili shuni ko'rsatadiki, FFQ/NaOH = 1/0,4 nisbatida yirik va tarmoqlangan g'ovaklar shakllanadi, 1/0,8 nisbatda esa matritsaning optimal parchalanishi hisobiga g'ovaklik yanada bir xilda va rivojlangan holga keladi. Biroq NaOH miqdori 1/1,5 gacha oshirilganda tuzilma yomonlashadi: mayda g'ovaklar yo'qoladi, karkas parchalanishi bilan bog'liq agregatsiya jarayoni yuzaga chiqadi. Tabiiy uglerodlardan farqli o'laroq, past kul miqdoriga (<0,5 %) ega bo'lgan polimer materiallar yuqori dozadagi faollashtiruvchini talab qilmaydi, aksincha NaOH ortiqchiligi g'ovaklikni kamaytiradi.



9-rasm. PS+PAN-10 namunalarining turli NaOH nisbatlarida olingan mikrosuratlar: 1) PS/NaOH = 1/0,4; 2) PS/NaOH = 1/0,8; 3) PS/NaOH = 1/1,5.

PS/NaOH = 1/0,4 nisbatida tuzilma bir xil makro- va mezog'ovaklikka ega bo'lib, karkas yaxshi bog'langan bo'ladi. NaOH miqdori 1/0,8 gacha oshirilganda g'ovaklar kattalashadi va tuzilma buzilmasdan optimal g'ovaklikka erishiladi. Biroq 1/1,5 nisbatda parchalanish boshlanadi: uglerod to'ri buziladi, mikronuqsanlar

paydo bo‘ladi. FFQ+PAN-10 bilan solishtirilganda, PS asosidagi uglerodlar yuqori NaOH tarkibiga nisbatan kamroq barqarorlikka ega, bu ularning past termobarqarorligi va kul miqdori bilan izohlanadi.

Keyinchalik, kimyoviy faollashtirilgan ko‘mir namunalarning faollashtiruvchi modda nisbatlari turlicha bo‘lgan holatlarida ularning teksturaviy xususiyatlarini aniqlash bo‘yicha tadqiqotlar olib borildi.

2-jadval.

PAN qo‘shilgan namunalarning teksturaviy xususiyatlari

Namuna	S_{sol} , m ² /g	V_1 , sm ³ /g	V_2 , sm ³ /g	R, Å	O‘rtacha gidravlik g‘ovak radiusi (V/A)
FFQ+PAN-5	125,62	0,0828	0,1012	63,192	4,3882
FFQ+PAN-10	456,10	0,5357	0,0623	58,376	3,7701
PS+PAN-5	104,01	0,0688	0,0841	64,101	4,3685
PS+PAN-10	512,88	0,6025	0,0701	57,125	3,7121

3-jadval.

Kimyoviy faollashtirilgan namunalarning teksturaviy xususiyatlari

Namuna	S_{sol} , m ² /g	V_1 , sm ³ /g	V_2 , sm ³ /g	R, Å	O‘rtacha gidravlik g‘ovak radiusi (V/A)
APS-0,8	749,7	0,914	0,167	58,606	3,4796
AFFQ-0,8	873,3	1,021	0,119	57,373	3,7711

PAN qo‘shilishi FFQ va PS tizimlarida solishtirma sirt maydoni hamda mikrog‘ovak hajmining sezilarli darajada ortishiga olib keladi. Xususan, FFQ+PAN-10 namunasi uchun sirt maydoni FFQ+PAN-5 ga nisbatan 125,62 m²/g dan 456,10 m²/g gacha oshadi, PS uchun esa bu ko‘rsatkich 104,01 m²/g dan 512,88 m²/g gacha ortadi. Shu bilan birga, mikrog‘ovaklar hajmi 0,5357–0,6025 sm³/g oralig‘iga yetadi, o‘rtacha g‘ovak radiusining kamayishi esa mayda g‘ovakli tuzilmaning shakllanishini ko‘rsatadi. Bu ta‘sir ayniqsa PS asosidagi namunalarda yaqqol namoyon bo‘ladi.

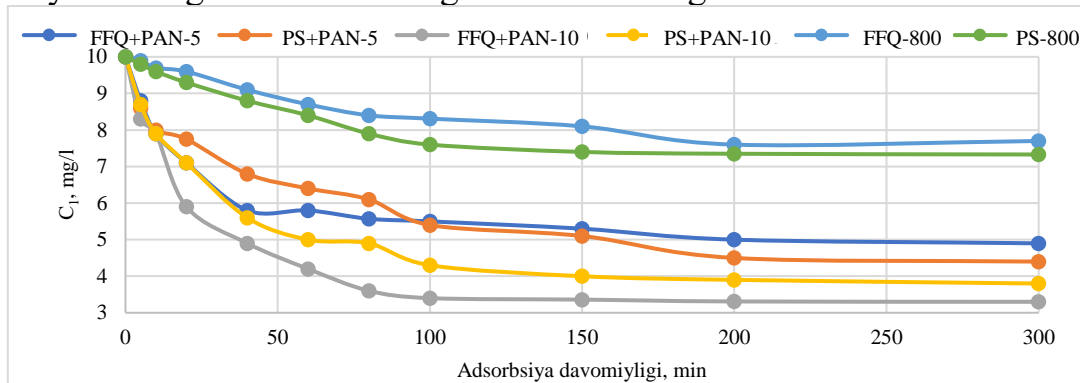
NaOH yordamida kimyoviy faollashtirish orqali g‘ovaklik yanada oshiriladi: APS-0,8 va AFFQ-0,8 namunalarda solishtirma sirt maydoni mos ravishda 749,7 va 873,3 m²/g ni, mikrog‘ovak hajmi esa 0,914 va 1,021 sm³/g ni tashkil etadi. Bu holda asosiy qismni radiusi 4 Å dan kichik bo‘lgan mikrog‘ovaklar tashkil etadi. Taqqoslovchi tahlil shuni ko‘rsatadiki, FFQ PSga nisbatan yuqoriroq darajadagi g‘ovaklikni ta‘minlaydi, bu esa uning yuqori termobarqarorligi va yaxshi karkas shakllantiruvchi xususiyatlari bilan bog‘liqdir.

Dissertatsiyaning “**FFQ va PS asosidagi ko‘mirlarning organik adsorbatlarga nisbatan adsorbsion faolligini tahlil qilish**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida termik va kimyoviy faollashtirilgan ko‘mirlarning adsorbsion xossalari o‘rganish natijalari bayon qilingan.

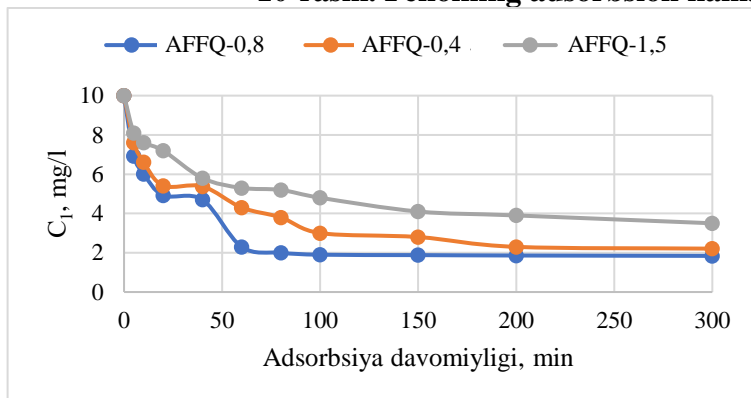
Fenol va uning hosilalari suv muhitining toksik va barqaror ifloslantiruvchilari hisoblanadi, shuning uchun ularning uglerodli sorbentlarga adsorbsiyasi bo‘yicha tadqiqotlar dolzarb ahamiyatga ega. FFQ va PS asosidagi turli teksturaviy xususiyatlarga ega ko‘mirlar yordamida fenolni olib tashlash kinetikasi o‘rganildi. Tajriba uchun 0,05 g sorbent 50 ml fenol eritmasiga (20-100 mg/l) solindi va xona haroratida 150 ayl./daq tezlikda 24 soatgacha aralashtirildi. Namuna olish 5–360 daqiqalar oralig‘ida amalga oshirildi, eritmalar 4000 ayl./daq tezlikda 10 daqiqa

davomida sentrifugalandi va filtrlandi. Fenol konsentratsiyasi 270 nm da spektrofotometrik usulda, kalibrlash egri chizig‘i asosida aniqlandi. Adsorbsion sig‘im boshlang‘ich va qolgan konsentratsiyalar farqi asosida hisoblab chiqildi.

10-rasmda turli adsorbsion materiallar ishtirokida fenol konsentratsiyasining vaqt bo‘yicha o‘zgarish kinetikasi grafiklari keltirilgan.



10-rasm. Fenolning adsorbsion kamayishi kinetikasi.



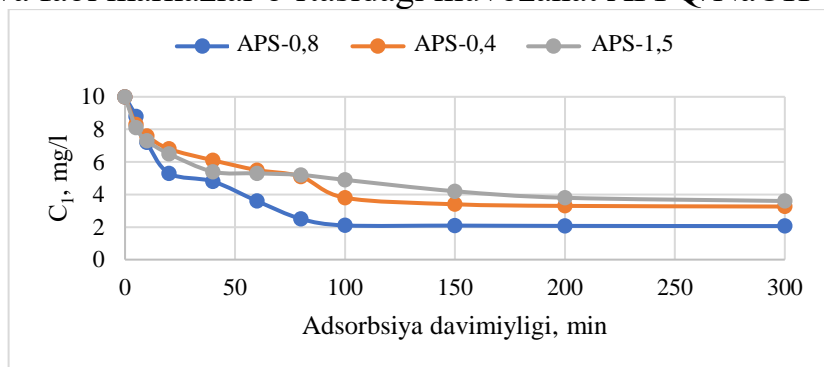
11-rasm. Suvli eritmalaridan fenolning adsorbsion kamayish kinetikasi.

Fenolning adsorbsion kamayish kinetikasini tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, barcha namunalar uchun eng intensiv konsentratsiya pasayishi dastlabki 20-40 daqiqa ichida sodir bo‘ladi. Eng yuqori sorbsiya faolligi FFQ+PAN-10 namunasi uchun qayd etilgan: 40 daqiqa ichida fenol konsentratsiyasi 10,0 mg/l dan 4,9 mg/l gacha, 300-daqiqaga kelib esa 3,3 mg/l gacha kamayadi. PS+PAN-10 uchun qolgan konsentratsiya 300 daqiqada 3,8 mg/l ni tashkil etadi; 60 daqiqadan so‘ng sorbsiya tezligi sekinlashadi, bu esa g‘ovaklarning cheklangan ochiqligi bilan izohlanadi. FFQ+PAN-5 va PS+PAN-5 namunalarida qolgan konsentratsiyalar mos ravishda 4,9 va 4,4 mg/l bo‘lib, bu kamroq g‘ovak hosil bo‘lishi bilan bog‘liq.

PAN modifikatsiyasiz boshlang‘ich ko‘mirlar (FFQ-800 va PS-800) eng past samaradorlikni ko‘rsatdi: fenolning qolgan konsentratsiyasi mos ravishda 7,7 va 7,33 mg/l, bu PAN qo‘shilishining sorbsiya sig‘imiga sezilarli ta‘sirini tasdiqlaydi.

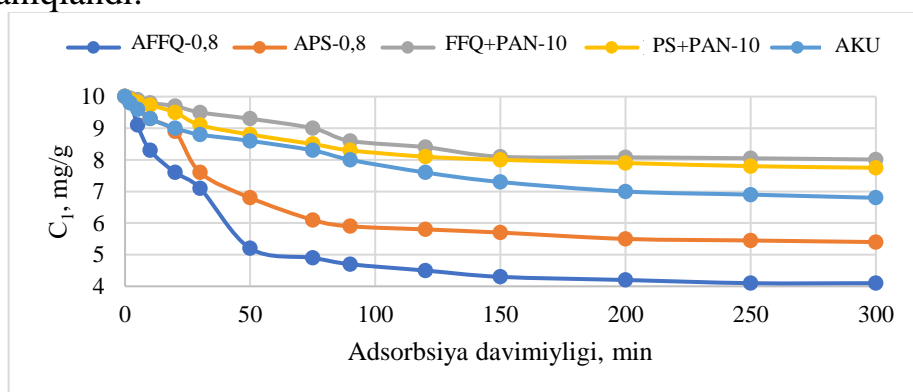
FFQ asosidagi faollashtirilgan namunalar uchun fenolning adsorbsiyasi kinetikasi tahliliga ko‘ra, optimal natijalar FFQ/NaOH = 1/0,8 nisbatida kuzatildi. AFFQ-0,8 namunasi uchun 60 daqiqada fenol konsentratsiyasi 2,3 mg/l gacha, 300 daqiqada esa 1,84 mg/l gacha kamaydi. AFFQ-0,4 namunasi 2,21 mg/l qolgan konsentratsiyani ta‘minladi, bu FFQ-800 (7,7 mg/l) dan ancha samarali, biroq AFFQ-0,8 dan past. NaOH ortiqcha miqdorda (AFFQ-1,5) qo‘llanganda g‘ovakli tuzilma buzilishi sababli sorbsiya tezligi pasayadi va yakunida fenol konsentratsiyasi ~3,5 mg/l atrofida qoladi. Natijada, barcha faollashtirilgan

uglerodlar boshlang'ich materialdan ustun, ammo eng yaxshi natijalar sirt maydoni va faol markazlar o'rtasidagi muvozanat $\text{AFFQ}/\text{NaOH} = 1/0,8$ nisbatida erishiladi.



12-rasm. Suvli eritmalaridan fenolning adsorbsion kamayish kinetikasi ($C_0 = 10 \text{ mg/l}$).

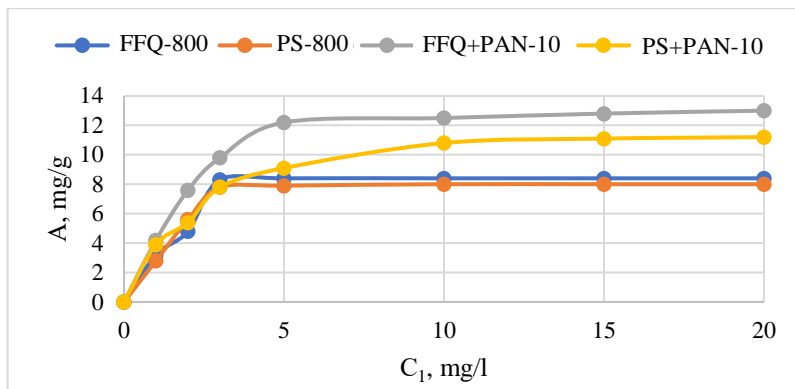
Turli darajadagi ishqoriy faollashtirish orqali olingan PS asosidagi faollashtirilgan ko'mirlar fenolni adsorbsiyalashda sezilarli farqlarni ko'rsatdi. Eng yaxshi natijalar APS-0,8 namunasi uchun qayd etildi: 60 daqiqada fenol konsentratsiyasi 3,6 mg/l gacha, 300 daqiqada esa 2,06 mg/l gacha kamaydi. NaOH nisbati kamroq bo'lgan holatda (APS-0,4) qolgan konsentratsiya 3,26 mg/l ni tashkil etdi, ortiqcha NaOH (APS-1,5) qo'llanilganda esa bu ko'rsatkich 3,6 mg/l atrofida saqlanib qoldi. Shunday qilib, $\text{PS}/\text{NaOH} = 1/0,8$ nisbati optimal bo'lganligi aniqlandi.



13-rasm. Suvli eritmalaridan sefazolinning adsorbsion kamayish kinetikasi ($C_0 = 10 \text{ mg/l}$, xona haroratida).

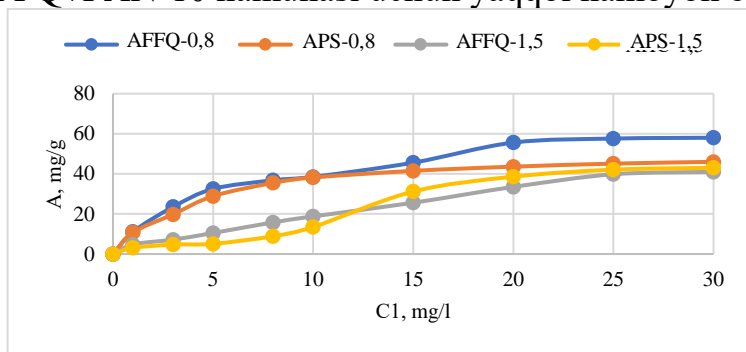
10% PAN qo'shilishi solishtirma sirt yuzasining ortishi va faol markazlar sonining ko'payishiga olib keladi. Eng yaxshi natijalar NaOH ishtirokida 1:0,8 nisbatda faollashtirishda kuzatildi; ishqor ortiqchligi esa uglerod matritsasining buzilishi hisobiga adsorbsion samaradorlikni kamaytiradi. Sefazolin adsorbsiyasini o'rganish uchun NH_2N bilan fotometrik usul ($\lambda = 565 \text{ nm}$) qo'llanildi. 10 mg/l konsentratsiyadagi sefazolin eritmalariga 0,5% NH_2N eritmasi qo'shib, keyin qizdirildi. Adsorbsion sinovlar 0,05 g sorbent va 50 ml eritma suspenziyasida 25°C da olib borildi. Filtrlashdan so'ng qolgan konsentratsiya spektrofotometrik usulda aniqlandi.

Natijalar tahlili shuni ko'rsatadiki, sefazolini adsorbsiyalash bo'yicha eng yuqori tezlik va chuqurlik AFFQ-0,8 namunasi tomonidan namoyon etildi: 50 daqiqada konsentratsiya 10 mg/l dan 5,2 mg/l gacha, 300 daqiqada esa $\sim 4,1 \text{ mg/l}$ gacha kamaydi. APS-0,8 namunasi bu qiymatni $\sim 5,4 \text{ mg/l}$ gacha tushirdi. Modifikatsiyalanmagan FFQ+PAN-10 va PS+PAN-10 namunalarining sorbsiya faolligi past bo'lib, qolgan konsentratsiya 7,5–8 mg/l dan yuqori saqlanib qoldi. Tijoratda qo'llaniladigan faollashtirilgan ko'mir (AKU) oraliq samaradorlik ko'rsatdi, lekin AFFQ-0,8 dan past bo'ldi.



14-rasm. Tadqiq qilingan namunalarda fenolning xona haroratida adsorbsiyasi izotermalari.

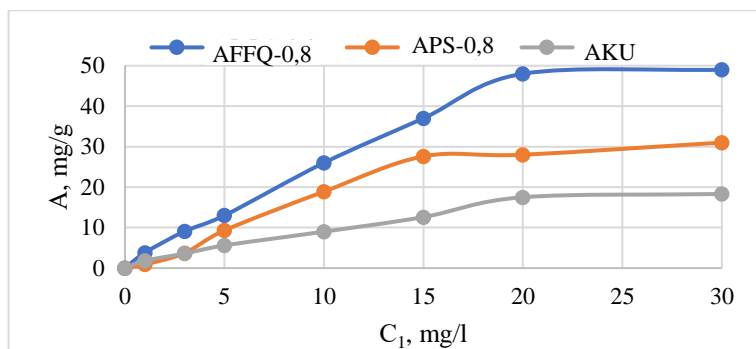
Izotermalar shuni ko'rsatadiki, termik faollashtirilgan FFQ-800 va PS-800 namunalarning maksimal adsorbsion sig'imi taxminan 8,2 mg/g ni tashkil etadi. 10% PAN qo'shilishi bilan sorbsiya qobiliyati sezilarli darajada oshadi: FFQ+PAN-10 namunasi uchun bu ko'rsatkich 13 mg/g dan ortiq, PS+PAN-10 uchun esa ~11 mg/g ga yetadi. Bu o'sish solishtirma sirt yuzasining kengayishi hamda qo'shimcha funksional guruhlarining shakllanishi bilan izohlanadi. Modifikatsiyalangan namunalarning izotermalari Langmuir modeli shakliga ega bo'lib, past konsentratsiyalarda tez to'yinish tendensiyasini ko'rsatadi, ayniqsa bu FFQ+PAN-10 namunasi uchun yaqqol namoyon bo'lgan.



15-rasm. Tadqiq qilingan namunalarda fenolning xona haroratida adsorbsiyasi izotermalari.

NaOH bilan faollashtirilgan sorbentlarda fenolning adsorbsiyasi izotermalari ancha yuqori sig'imni ko'rsatmoqda: AFFQ-0,8 namunasi uchun bu qiymat ~58 mg/g gacha yetadi, bu esa modifikatsiya qilinmagan namunalarning (taxminan 13 mg/g) bilan solishtirganda sezilarli ustunlikni anglatadi. Ushbu o'sish mikroqovaklikning rivojlanishi va kislorod tutuvchi funksional guruhlar sonining ortishi bilan bog'liq. Izotermalar Jil-Tomas tasnifi bo'yicha L-turga kiradi, bu esa adsorbsiyaning yuqori affinigacha ega bo'lgan, monoqavatli shaklda kechishini anglatadi. NaOH ning 1:0,8 nisbatida eng yuqori adsorbsion faollik kuzatilgan bo'lsa, ortiqcha ishqor (1:1,5) ta'sirida tuzilmaning yemirilishi natijasida samaradorlik pasaygan.

Sefazolinning aktivlashtirilgan sorbentlar – AFFQ-0,8 va APS-0,8 – ustida adsorbsiyasi bo'yicha izotermalar, sanoat faol ko'miriga (AKU) nisbatan ancha yuqori sorbsiya sig'imiga ega ekanligini ko'rsatmoqda. Maksimal adsorbsion sig'im AFFQ-0,8 uchun taxminan 49 mg/g ni, APS-0,8 uchun esa 31 mg/g ni tashkil etadi, bu ko'rsatkich sanoat ko'miri (AKU) uchun 19 mg/g dan oshmaydi. Ushbu natijalar polimer chiqindilar asosida ishqoriy faollashtirish yo'li bilan olingan uglerodli sorbentlarning antibiotiklarga nisbatan yuqori samaradorligini tasdiqlaydi.



16-rasm. Tadqiq qilingan namunalarda sefazolinning xona haroratida adsorbsiyasi izotermalari.

Sefazolinning aktivlashtirilgan sorbentlar — AFFQ-0,8 va APS-0,8 — ustida adsorbsiyasi bo'yicha izotermalar, sanoat faol ko'miriga (AKU) nisbatan ancha yuqori sorbsiya sig'imiga ega ekanligini ko'rsatmoqda. Maksimal adsorbsion sig'im AFFQ-0,8 uchun taxminan 49 mg/g ni, APS-0,8 uchun esa 31 mg/g ni tashkil etadi, bu ko'rsatkich sanoat ko'miri (AKU) uchun 19 mg/g dan oshmaydi. Ushbu natijalar polimer chiqindilar asosida ishqoriy faollashtirish yo'li bilan olingan uglerodli sorbentlarning antibiotiklarga nisbatan yuqori samaradorligini tasdiqlaydi.

AFFQ-0,8 va APS-0,8 namunalarning izotermalari S-shaklga ega bo'lib, bu past boshlang'ich kontsentratsiyalarda faol markazlarning chegaralangan mavjudligini va C₁ ortishi bilan g'ovaklarning faol to'ldirilishini anglatadi. AKU uchun esa izoterma profili nisbatan tekis bo'lib, bu mikro'ovaklarning kamligi va sefazolin bilan kuchsiz o'zaro ta'sir mavjudligini bildiradi.

Lengmyur tenglamasi parametrlarining tahlili shuni ko'rsatadiki, eng yuqori chegaraviy sig'im (A₀) ishqoriy faollashtirilgan namunalarda kuzatilgan: AFFQ-0,8 uchun 0,23 mmol/g, APS-0,8 uchun 0,19 mmol/g bo'lib, bu yuqori mikro'ovaklilik ($\Sigma V = 0,132$ va $0,118 \text{ sm}^3/\text{g}$) hamda fizik-kimyoviy adsorbsiyaga yordam beruvchi polyar guruhlar mavjudligi bilan bog'liq. FFQ-800 va PS-800 namunalarda PAN bo'lmagani sababli A₀ qiymatlari minimal (0,03 va 0,02 mmol/g) bo'lgan. PAN qo'shilishi orqali, xususan FFQ+PAN-10 namunasi uchun, g'ovak hosil bo'lishi evaziga sig'im 0,08–0,09 mmol/g gacha oshgan (K = 11,8).

Eng yuqori K qiymatlari va eng salbiy Gibbs energiyasi (G) qiymatlari AFFQ-0,8 (K = 38,6; G = -11,3 kJ/mol) va FFQ+PAN-10 (G = -18,5 kJ/mol) uchun qayd etilgan bo'lib, bu vodorodli va π - π o'zaro ta'sirlar ishtirokidagi adsorbsiyani tasdiqlaydi. Sefazolinning adsorbsiyasi bo'yicha Lengmyur tenglamasi parametrlari tahlili shuni ko'rsatadiki, maksimal adsorbsion sig'im AFFQ-0,8 (0,16 mmol/g) va APS-0,8 (0,13 mmol/g) uchun qayd etilgan bo'lib, bu NaOH yordamida ishqoriy faollashtirish samaradorligini ko'rsatadi. Muvozanat konstantalari (K = 41,38 va 39,99) yuzaning sefazolonga yuqori affinligini bildiradi, Gibbs energiyasining qiymatlari (-8,89 va -8,93 kJ/mol) esa vodorodli va donor-akseptorli o'zaro ta'sirlar bilan kechuvchi fizik adsorbsiyaga ishora qiladi. Sanoat faol ko'mirida (AKU) A₀ (0,09 mmol/g) va K (21,13) qiymatlari past bo'lib, bu mikro'ovaklikning yetarli emasligi va yuzaning kamroq selektivligi bilan izohlanadi.

XULOSA

1. FFQ qatroni bosqichma-bosqich parchalanuvchi xususiyatga ega bo'lib, 700 °C da 63,3% gacha uglerod qoldig'i hosil qilgan, bu esa PS uchun 58,6% ni tashkil qilgan bir bosqichli parchalanuv bilan solishtirganda, FFQning termobarqaror uglerod materiallari olish uchun xomashyo sifatida afzal ekanligini

ko'rsatadi va 1000 °C da mos ravishda 36,7% va 42% massaning yo'qolishi aniqlandi.

2. Rentgenofazaviy tahlil natijalariga ko'ra, FFQ-800 namunasi uchun $2\theta \approx 26^\circ$ da (002) va 43° da (100) cho'qqilarning toraygan va intensiv ko'rinishi qisman grafitlanish va notartibli tuzilma hosil bo'lishini ifodalaydi. d_{002} yo'nalishi bo'yicha kristallit o'lchami FFQ-800 uchun $\sim 1,9$ nm, PS-800 uchun esa $\sim 1,1$ nm deb topilgan. 800 °C da termik ishlodan so'ng olingan namunalarda IQ-spektrlarida C-H ($2800-3000 \text{ cm}^{-1}$) va C=O ($\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$) to'lqinlarining yo'qolishi uchraydi, bu esa uchuvchan fragmentlarning yo'qolishi va aromatik uglerod hosil bo'lishini tasdiqlaydi.

3. FFQ-700 namunasi zich va bir jinsli tuzilma hamda mayda g'ovaklar bilan tavsiflanadi, PS asosidagi termik faollashtirilgan ko'mirlar esa bo'sh, segmental morfologiyaga, yaqqol ifodalangan makrog'ovaklilik va yoriqlarga ega. Eng yuqori solishtirma sirt maydoni va g'ovak hajmi 850 °C da kuzatilgan: FFQ uchun mos ravishda $94,12 \text{ m}^2/\text{g}$ va $0,1585 \text{ sm}^3/\text{g}$, PS uchun esa $82,24 \text{ m}^2/\text{g}$ va $0,1923 \text{ sm}^3/\text{g}$ ni tashkil etgan. O'rtacha g'ovak radiusi FFQ uchun $6,47 \text{ \AA}$, PS uchun $5,47 \text{ \AA}$ bo'lib, bu tuzilmada mezog'ovaklarning shakllanishini tasdiqlaydi.

4. PAN qo'shilishi uglerodli tuzilmaning tartiblilik darajasini oshishiga xizmat qiladi va FFQ+PAN-800 namunalarida (002) cho'qqisining ($\sim 26^\circ 2\theta$) torayishi hamda intensivligining oshishi, shuningdek, $\sim 43^\circ$ atrofida yelka hosil bo'lishi kuzatilib, bu qisman grafitlanish va tartibli zarralar yig'ilishini ko'rsatadi. PS+PAN-800 namunalarida (002) cho'qqisi keng va sust ifodalangan bo'lib, bu past termobarqarorlik tufayli yuzaga kelgan amorf tuzilmani anglatadi. IQ-spektral tahlillar natijalariga ko'ra, 800 °C da C-H ($2800-3000 \text{ cm}^{-1}$) va C=O ($\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$) tasmasi yo'qoladi, bu organik qoldiqlarning yo'qolganini bildiradi; modifikatsiyalangan namunalarda saqlanib qolgan sust C=N va N-H tasmalari esa tuzilma tarkibiga azotning kiritilganini tasdiqlaydi.

5. FFQ-800 va PS-800 namunalarida fenol bo'yicha maksimal adsorbsion sig'im atigi $0,03$ va $0,02 \text{ mmol/g}$ ni tashkil etgan bo'lsa, 10% PAN qo'shilishi bu ko'rsatkichni FFQ+PAN-10 uchun $0,08 \text{ mmol/g}$, PS+PAN-10 uchun esa $0,09 \text{ mmol/g}$ gacha oshishiga olib kelgan bo'lib, bu g'ovaklik tuzilmasining yaxshilanishi va qutbli guruhlarning shakllanishi bilan izohlanadi. Eng yuqori adsorbsion sig'im AFFQ-0,8 namunasi uchun qayd etilib, $A_0 = 0,23 \text{ mmol/g}$, muvozanat konstantasi $K = 38,6$ va umumiy g'ovak hajmi $V = 0,132 \text{ sm}^3/\text{g}$ ni tashkil etdi, bu esa yaxshi rivojlangan mikrostrukturaga va faol markazlar zichligining yuqoriligiga dalolat beradi.

6. Sefazolinni adsorbsiyalash bo'yicha eng yuqori ko'rsatkichlar AFFS-0,8 namunasida kuzatilib, $A_0 = 0,16 \text{ mmol/g}$, $K = 41,38$, $V = 0,110 \text{ sm}^3/\text{g}$ bo'lib, u yaxshi rivojlangan mikrostruktura va antibiotik molekulariga yuqori affinigacha ega ekani bilan ajralib turadi. Yaqin ko'rsatkichlar APS-0,8 namunasi tomonidan namoyon etilib, u ham adsorbsion sig'imi jihatidan import qilingan aktivlangan ko'mirdan ustun bo'lgan. Kimyoviy faollashtirilgan namunalarda "KHANTEX GROUP" MChJ korxonasida sanoat sinovlaridan muvaffaqiyatli o'tib, fenol birikmalari konsentratsiyasini 22 mg/l dan $0,8 \text{ mg/l}$ gacha, bo'yoqlarni esa 29 mg/l dan $<0,2 \text{ mg/l}$ gacha kamaytirishga erishilgan bo'lib, bu ularning to'qimachilik sanoati oqava suvlarini tozalashda amaliy jihatdan qo'llashga yaroqliligini tasdiqlaydi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
DSc.03/29.08.2023.К/Т.66.02 ПРИ НАМАНГАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ХУДАЙБЕРДИЕВ НОСИРЖОН ЭРГАШЕВИЧ

**КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ УГОЛЬНЫХ
АДСОРБЕНТОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТА И
ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ СМОЛЫ**

02.00.11 – Коллоидная и мембранная химия

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) по химии в аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан В2025.2.PhD/K963 зарегистрирован под номером.

Диссертация выполнена в Наманганский государственный технический университет.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.namdtu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Эргашев Ойбек Каримович
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Салиханова Дилноза Саидакбаровна
доктор технических наук, профессор

Абдулхаев Толибжон Долимжонович
доктор химических наук, доцент

Ведущая организация:

Фарганский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «12» август 2025 г. в «11⁰⁰» часов на заседании Научного совета DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 при Наманганский государственный технический университет по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Косонсой, 7, Тел: (+99869) 234-14-85, Факс: (+99869) 234-14-85; e-mail: info@namdtu.uz, Наманганский государственный технический университет, 6-здание, 1-этаж, ауд. 303).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Наманганский государственный технический университет за № «43», с которой можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре 160115, г. Наманган, ул. Косонсой, 7. Тел: (+99869) 234-14-85, Факс: (+99869) 234-14-85).

Автореферат диссертации разослан «29» июля 2025 года.
(Реестр за № 21 от «29» июля 2025 года).

Шамшидинов И.Т.

Заместитель председателя научного
совета по присуждению
ученой степени, д.т.н., профессор

Маллабаев О.Т.

Ученый секретарь научного
совета по присуждению
ученой степени, д.х.н.ф, доцент

Шеркузиев Д.Ш.

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
учёной степени, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора (PhD) философии)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире одной из актуальных проблем водоочистки является удаление устойчивых органических загрязнителей, включая фенолы и фармацевтические соединения, из сточных вод, образующихся в результате бытовой и промышленной деятельности. Повышенная устойчивость этих соединений к биодеструкции требует разработки эффективных физико-химических методов очистки, среди которых адсорбция занимает ведущее место благодаря своей универсальности. В связи с этим особую значимость приобретает исследование процессов получения углеродных адсорбентов из полимерных отходов с использованием термической и химической активации с целью оптимизации пористой структуры, состава поверхности и сорбционных характеристик.

В мире ведутся научные и прикладные исследования, направленные на разработку эффективных сорбционных материалов с высокой избирательностью и сорбционной ёмкостью по отношению к устойчивым органическим загрязнителям. В этой связи особое внимание уделяется получению и исследованию углеродных адсорбентов на основе вторичных полимерных отходов с применением термической и химической активации, а также модификации азот- и серосодержащими добавками, изучению влияния условий активации и состава модификаторов на структуру и пористость углеродной матрицы, а также разработка экологически обоснованных и ресурсосберегающих технологий переработки полимерного сырья в эффективные сорбенты.

В Республике достигнуты научные и практические результаты по получению новых адсорбентов на основе местного сырья и промышленных отходов. В третьем направлении стратегии развития Нового Узбекистана, направленной на дальнейшее развитие Республики Узбекистан на 2022-2026 годы определены задачи в направлениях «Обеспечение устойчивости национальной экономики и увеличение промышленности в общей внутренней продукции, увеличение объема производства промышленности продукции в 1,4 раза...»². В этом аспекте большое значение имеют научные исследования, направленные на создание высокоэффективных адсорбционных материалов и установление связи между их пористой структурой, коллоидно-химическими и адсорбционными характеристиками.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит осуществлению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «Стратегия действий по приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3236 от 23 августа 2017 года «О программе ускоренного развития химической

² Указ Президента Республики Узбекистан УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года.

промышленности на 2017-2021 годы», № ПП-3983 от 25 октября 2018 года «О мерах по ускоренному развитию химической промышленности Республики Узбекистан», а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике VII. «Химические технологии и нанотехнологии».

Степень изученности проблемы. В мировой научной практике ведутся активные исследования, направленные на разработку эффективных углеродных сорбентов для очистки сточных вод от устойчивых органических загрязнителей. Основы формирования пористой структуры, термической и химической активации углеродных материалов, а также влияние природы сырья и условий модификации были заложены в работах научных школ П.Ребиндера, Г.Цвика, Р.Поули, J.M. Stencel, F. Rodríguez-Reinoso, A. Linares-Solano, J. Hayashi, L. Mochidzuki, M. Sevilla и др.

В Узбекистане под руководством К.С. Ахмедова сформировалась научная школа, ориентированная на коллоидно-химические исследования структуры и свойств сорбентов различного происхождения. Представители этой школы Э.А.Арипов, Ф.Л.Глекель, С.С.Хамраев, С.Н.Аминов, А.А.Агзамходжаев, У.К.Ахмедов, Г.У.Рахматкариев, С.З.Муминов, Б.Н.Хамидов, В.П.Гуро, Г.Р.Нарметова, С.А.Абдурахимов, И.К.Сатаев, О.К.Бейсенбаев, И.Д.Эшметов, О.К. Эргашев, Ш.А.Кулдашева, Д.С.Салиханова А.Б.Абдикамалова, Д.Ж.Жумаева и др. и др. внесли значительный вклад в развитие научных основ адсорбции, в том числе при очистке водных сред.

Анализ литературных источников показывает, что несмотря на достигнутые успехи в области создания углеродных адсорбентов, вопросы влияния состава и структуры полимерных матриц, условий термической и химической активации, а также внедрения гетероатомных модификаторов на формирование микропористости, функциональных групп и адсорбционной активности материалов по отношению к фармацевтическим соединениям остаются недостаточно изученными.

Связь исследования с научно-исследовательскими планами научно-исследовательского учреждения, в котором была выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Наманганским инженерно-технологическим института по проекту «Производство строительных материалов с использованием отходов термореактивных полимеров (БМС) в качестве наполнителя» на 2023-2024 годы.

Целью исследования является разработка коллоидно-химических основ создания угольных адсорбентов из вторичных термопласта и термореактивной смолы.

Задачи исследования:

проведение термического анализа полимерных отходов фенолформальдегидной смолы (ФФС) и полистирола (ПС), определить

оптимальные условия их карбонизации с учётом термостойкости, выхода углерода и характера термодеструкции;

изучение влияния содержания ПАН на выход углерода, микроструктуру и степень упорядоченности получаемых углеродов на основе ФФС и ПС;

исследование изменения морфологии, пористой структуры и текстурных характеристик при химической активации NaOH, определение оптимальных условий активации;

оценка влияния условий активации на кристалличность, степень дефектности и функциональный состав углеродных материалов на основе данных рентгенофазового и ИК-спектрального анализа;

изучение кинетики и изотермы адсорбции органических загрязнителей (фенола, его производных и цефазолина) на синтезированных адсорбентах, определить параметры моделей Ленгмюра;

установление взаимосвязи между структурными и текстурными характеристиками углеродных материалов и их сорбционной активностью, обосновать эффективность выбранных путей активации.

Объектами исследования являются углеродные материалы, полученные термической и химической обработкой отходов ПС и ФФС, в том числе с добавками ПАН и при активации гидроксидом натрия.

Предметом исследования являются влияние природы полимерного сырья, условий карбонизации, состава модифицирующих добавок и степени химической активации на структуру, текстурные характеристики и сорбционную активность полученных углеродных адсорбентов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы широко использовались современные и традиционные методы определения физико-химических (ИК-спектроскопический, рентгенофазовый, микроскопический, термический) и коллоидно-химических (адсорбционные, калориметрические, титриметрические) характеристик дисперсных систем.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что добавление 10 мас. % ПАН к ФФС и ПС не приводит к снижению выхода углеродного остатка при 800 °С по сравнению с немодифицированными системами, что связано с ароматической стабилизацией и внедрением азотсодержащих структур в углеродный каркас;

выявлено, что щелочная активация с использованием NaOH в соотношении 1:0,8 обеспечивает наибольшие значения удельной поверхности: до 132 м²/г для АФФС-0,8 и 118 м²/г для АПС-0,8, что обусловлено оптимальным уровнем разрушения каркаса и формированием микропористой структуры;

обосновано, что образцы ФФС+ПАН-10 и ПС+ПАН-10 достигают удельной поверхности 94,12 м²/г и 82,24 м²/г соответственно, при этом объём мезопор увеличивается до 0,1585 (ФФС) и 0,1923 см³/г (ПС), что связано с эффективной термоструктуризацией и образованием микродефектов;

доказано, что при использовании модифицированных сорбентов АФФС-0,8 и АПС-0,8 достигается максимальная сорбционная ёмкость по фенолу – до 58 и 31 мг/г соответственно, что в 4-7 раз превышает показатели

немодифицированных углей (ФФС-800 13 мг/г; ПС-800 8,2 мг/г), что объясняется высокой плотностью микропор и наличием функциональных групп;

установлено, что адсорбция цефазолина на образце АФФС-0,8 достигает 49 мг/г, в то время как на коммерческом активированном угле – лишь 19 мг/г, что связано с высокой аффинностью полярной поверхности, насыщенной функциональными группами, к молекулам антибиотика;

установлено, что наилучшие параметры уравнения Ленгмюра получены для АФФС-0,8: $A_0 = 0,23$ ммоль/г, $K = 38,6$ и $\Delta G = -11,3$ кДж/моль по фенолу, и $A_0 = 0,16$ ммоль/г, $K = 41,38$ по цефазолину, что указывает на преобладание физико-химической адсорбции с участием водородных и π - π взаимодействий.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны оптимальные условия получения углеродных адсорбентов из отходов полистирола и фенолформальдегидной смолы с использованием модификаторов (ПАН) и щелочной активации (NaOH);

разработаны научные основы использования активированных углей для адсорбционной очистки сточных вод от органических соединений, т.к. фенолы, антибиотики и красители.

Достоверность результатов исследования. Научные исследования проводились с использованием современных физико-химических и коллоидно-химических, опытные испытания проводились в лабораторных и производственных условиях и подтверждены актами испытаний ООО «KHANTEX GROUP».

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования обосновывается разработкой методологической основы создания активированных углей на основе местного сырья и промышленных отходов, установлением зависимости их состава, условий получения и функциональных свойств, т.к. адсорбционная активность по органическим веществам, которые послужат базой для целенаправленного проведения процесса получения угольных адсорбентов.

Практическая значимость результатов исследований служит для разработки технологии получения и применения новых адсорбентов на основе полимерных отходов, обладающих высокими адсорбционными характеристиками при очистке водных сред от фармацевтических препаратов, а также в учебном процессе подготовки магистров и бакалавров в образовательных учреждениях в сфере химии, химической и фармацевтической технологии.

Внедрение результатов исследования. На основании научных результатов по получению адсорбентов на основе полимерных отходов:

термохимически активированный угольный адсорбент (АПС-0,8) с 0,8% NaOH при 800 °С на основе полистирола и полиакрилонитрила для очистки текстильных сточных вод, загрязненных фенольными соединениями и фенольными красителями включен «в перечень перспективных разработок для реализации в 2026-2030 годах» на практике ООО «KHANTEX GROUP» (Справка ООО «KHANTEX GROUP» №88 от 15 май 2025 г.). В результате концентрация фенольных соединений снижена с 22 мг/л до 0,8 мг/л,

красителей с 29 мг/л до менее 0,2 мг/л, а общего органического вещества со 128 мг/л до 1,8 мг/л, что представляет возможность обеспечить эффективное удаление устойчивых органических загрязнителей в соответствии с технологическими требованиями;

способ получения термохимически активированного угля АФФС-0,8 на основе феноло-формальдегидной смолы и полиакрилонитрила для очистки общих сточных вод от фенольных соединений и остатков органических веществ включен «в перечень перспективных разработок для реализации в 2026-2030 годах» на практике ООО «KHANTEX GROUP» (Справка ООО «KHANTEX GROUP» №88 от 15май 2025 г.). В результате концентрация фенольных соединений была снижена с 2,2 мг/л до менее 0,2 мг/л, а общее содержание органических веществ с 36,5 мг/л до 9,2 мг/л, что позволяет достичь высокой эффективности в соответствии с требованиями глубокой очистки сточных вод.

Апробация результатов исследования. Основные результаты данного исследования обсуждались на 2 международных и 10 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликование результатов исследования. По теме и материалам диссертации опубликовано 17 научных работ: 1 научных статей республиканских и 4 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объём диссертации составляет 117 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность работы и востребованность проведенного исследования, характеризуются цель и задачи, излагается соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов исследования, опытно-промышленные испытания, сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Сорбционные процессы и современные адсорбенты. Полимерные отходы для создания сорбционных материалов для очистки сточных вод»** проанализированы вопросы переработки синтетических полимеров, в частности фенолформальдегидной смолы и полистирола, для получения углеродных адсорбентов. Рассмотрены актуальные направления в области физико-химической очистки сточных вод от устойчивых органических загрязнителей, включая фенольные соединения, красители и антибиотики.

Обобщены литературные данные о термической и химической активации полимерных материалов, а также влиянии модифицирующих добавок, таких как полиакрилонитрил, на структуру, пористость и сорбционные свойства

полученных углеродных сорбентов. Проведённый анализ позволил обосновать выбор подхода к синтезу эффективных адсорбентов на основе вторичных полимеров и сформулировать цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе диссертации «**Выбор объектов для создания угольных адсорбентов и исследование их термической обработки**» представлена результаты исследования основных характеристик отходов полистирола и фенолформальдегидной смолы.

Полистирол (ПС) и фенолформальдегидные смолы (ФФС) относятся к числу наиболее распространённых синтетических полимеров, находящих широкое применение в строительстве, упаковочной, электротехнической и мебельной промышленности. В качестве исходных объектов были использованы вторичные ФФС и ПС, приобретенные у ООО «Термозон» (Узбекистан). ФФС представляли собой гранулированный измельчённый пресс-материал чёрного цвета, содержащий сажу в качестве наполнителя, типичной формы литников. ПС был представлен в виде двух видов отходов: вспенённые плиты белого цвета толщиной 20-30 мм.

ФФС обладает большей плотностью (1,30-1,35 г/см³) по сравнению с ПС (1,03-1,06 г/см³), что отражает её более плотную ароматическую и сшитую структуру. Температура термического разложения ФФС (~300-350 °С) также выше, чем у ПС (~280-320 °С), что подтверждает её более высокую термическую стабильность. При этом ФФС, как терморезистивный полимер, не имеет определённой температуры плавления, в отличие от ПС, который размягчается при температуре около 100 °С.

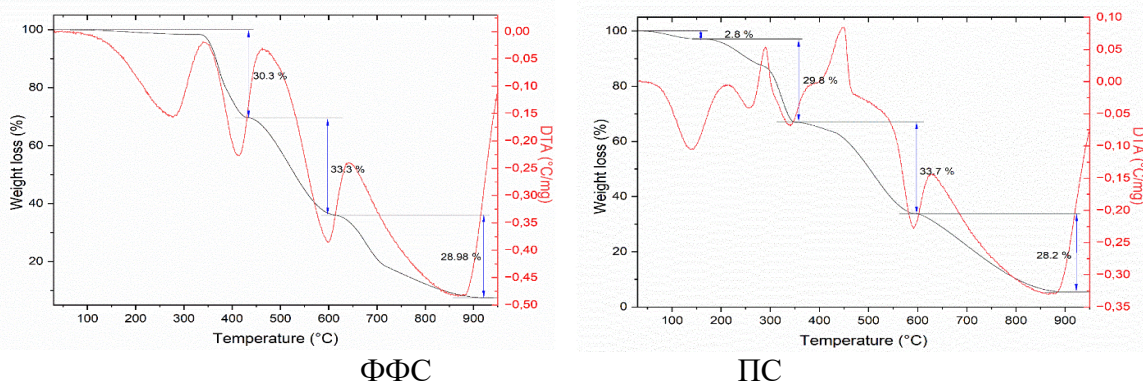


Рис. 1. Комплексный термический анализ образцов полимеров.

На представленной термограмме ПС отображены кривые ТГ и ДСК, полученные в инертной атмосфере. На кривой ТГ наблюдается одностадийная потеря массы, начинающаяся примерно при 347 °С и завершающаяся около 463 °С, с максимумом скорости разложения на ДТГ-кривой при 421 °С. Общая потеря массы при 600°С составляет около 65%, а при 900°С 92,6 %, что свидетельствует о почти полном термическом разрушении органической матрицы полимера и формировании незначительного количества твёрдого остатка. Это характерно для ПС, структура которого склонна к деполимеризации с образованием летучих продуктов, таких как мономерный стирол, бензол и другие ароматические соединения.

Результаты исследования температуры обработки на изменение массы изучаемых объектов в инертной атмосфере представлены на рис. 2.

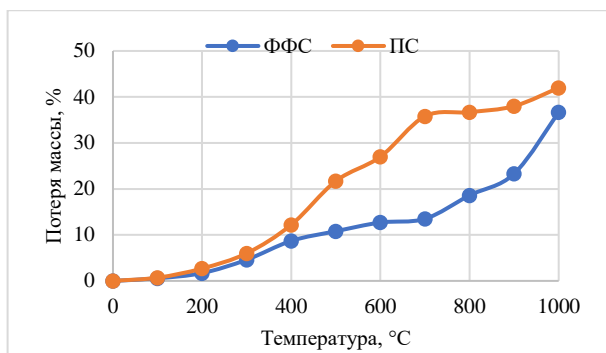


Рис. 2. Уменьшение массы образцов при термической обработке.

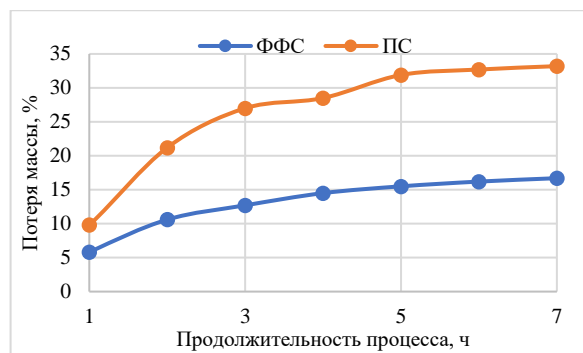


Рис. 3. Изменение массы образцов в зависимости от продолжительности термической обработки при 600 °C.

Анализ графика (рис. 2) показал, что при нагревании в инертной атмосфере ПС начинает интенсивно разрушаться уже с 400 °C, тогда как у ФФС деструкция проходит более равномерно. При 500 °C потери массы ПС достигают 21,7%, а ФФС лишь 10,8%. К 1000 °C суммарные потери массы составляют 42% для ПС и 36,7% для ФФС. Установлено, что ФФС характеризуется более стабильной термодеструкцией и высоким потенциалом для получения углеродного остатка.

На рис. 3 показана динамика потери массы ФФС и ПС при 600 °C в течение 7 часов. ПС демонстрирует быструю потерю массы за первые 3 часа до 27%, с последующей стабилизацией (до 33,2%). У ФФС разложение протекает равномерно: за 3 часа потери составляют 12,7%, к концу процесса 16,7%. Это связано с большей термостабильностью ФФС и постепенным углеродизационным превращением его сетчатой структуры.

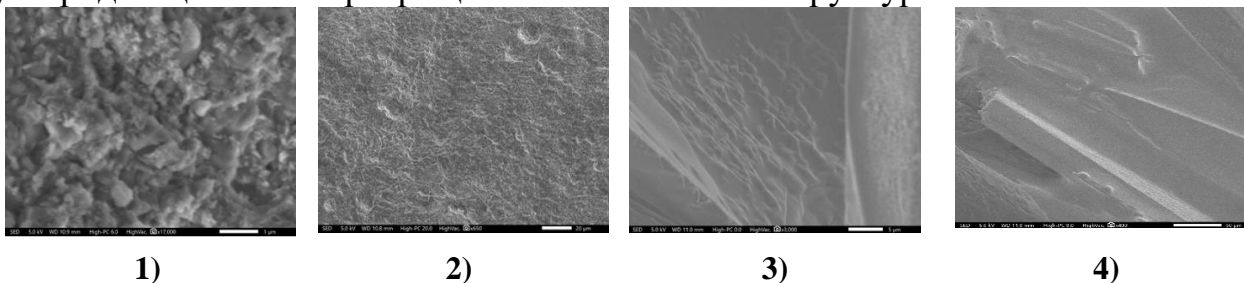


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки образцов углей на основе: 1 и 2 - ПС; 3 и 4 - ФФС.

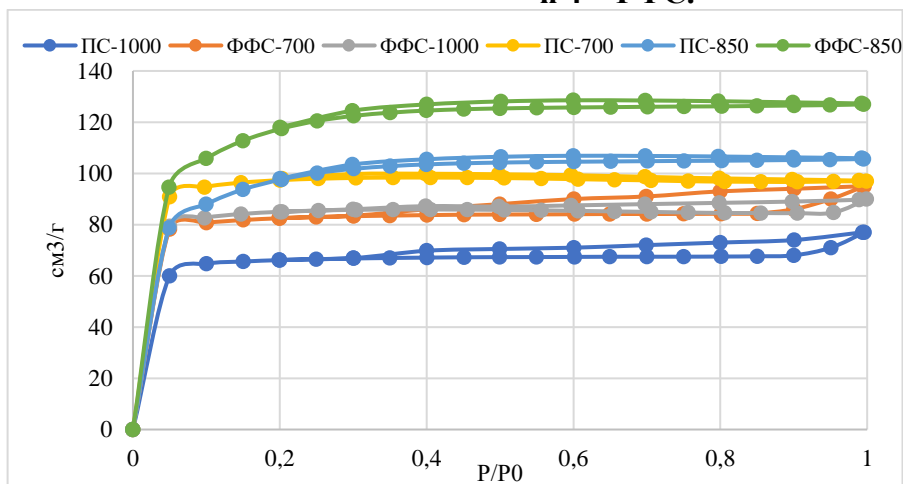


Рис. 5. Изотермы адсорбции-десорбции азота на образцах (сверху вниз): 1) ФФС-850; 2) ПС-850; 3) ПС-700; 4) ФФС-1000; 5) ФФС-700; 6) ПС-1000.

Микрофотографии углеродных остатков после пиролиза при 700 °C показали, что ФФС образует массивную, однородную структуру с мелкой

трещиноватостью и микропорами, тогда как ПС формирует рыхлый, высокопористый каркас с крупными полостями и многочисленными трещинами. ФФС после пиролиза сохраняет монолитную углеродную матрицу с признаками стеклоуглерода и равномерной пористостью, тогда как ПС характеризуется хаотичной, разрозненной структурой с низкой степенью углекислотности. Оба материала имеют аморфную природу, но углерод из ФФС отличается большей стабильностью и целостностью.

Изотермы адсорбции-десорбции азота, представленные на рис. 5., соответствуют мезопористым и макропористым структурам и по форме относятся к типу IV по классификации IUPAC, с выраженным капиллярным конденсационным участком при $P/P_0 > 0,4$.

Таблица 1.

Текстурные характеристики образцов угля

Образец	$S_{уд}$, м ² /г	V_1 , см ³ /г	V_2 , см ³ /г	R, Å	Average pore hydraulic radius (V/A)
ФФС-700	52,33	0,0902	0,0137	80,603	6,226
ФФС-850	94,12	0,1293	0,0162	64,169	3,592
ФФС-1000	63,10	0,1102	0,0145	77,256	5,412
ПС-700	65,26	0,1122	0,0173	80,607	3,578
ПС-850	82,24	0,1229	0,0142	64,186	3,656
ПС-1000	51,83	0,0831	0,0161	81,922	5,422

Анализ текстурных характеристик показал, что для ФФС и ПС максимальные значения удельной поверхности и объёма пор достигаются при 850 °С. Для ФФС поверхность составляет 94,12 м²/г, объём пор 0,1293 см³/г с преобладанием мезопор (0,1131 см³/г). При 700 °С и 1000 °С наблюдается снижение этих параметров из-за недостаточной дегградации или спекания структуры. ПС при 850 °С имеет удельную поверхность 82,24 м²/г и объём пор 0,1229 см³/г, с аналогичной тенденцией снижения при других температурах. Таким образом, 850 °С является оптимальной температурой для формирования развитой мезопористой структуры в обеих системах.

В третьей главе «Исследование влияния азотсодержащих модификаторов на структуру, состав и пористость углеродных адсорбентов» представлены результаты исследования влияния различных факторов на пористую структуру активированных углей на основе ФФС и ПС.

Выбор отходов ПАН и гидроксида натрия обусловлен необходимостью целенаправленного формирования пористой структуры углеродных адсорбентов. Добавление ПАН способствует развитию пористости за счёт выделения газообразных продуктов при термической обработке: нитрильные и другие азотсодержащие группы сохраняются в структуре до высоких температур и разлагаются только в области графитизации, что приводит к образованию дополнительных микропор и повышению удельной поверхности. Несмотря на некоторое снижение выхода углерода, введение ПАН позволяет значительно улучшить текстурные характеристики материала. Гидроксид натрия выбран как химический активатор благодаря его способности разрушать полимерную матрицу, инициировать дегидратацию и создавать микродефекты, способствующие формированию развитой

микропористой структуры и увеличению сорбционной ёмкости углеродных адсорбентов.

Для изучения влияния ПАН на выход углеродного остатка была разработана методика сравнительного анализа карбонизации смесей с различным содержанием ПАН (0-20 мас.%). Исходные компоненты (ФФС или ПС) измельчались, перемешивались, высушивались при 105 °С и подвергались термообработке в инертной атмосфере: стабилизация при 250 °С и карбонизация при 700 °С. После охлаждения образцы взвешивались, а выход углерода рассчитывался как отношение массы остатка к исходной массе. Построение зависимостей выхода от содержания ПАН позволило оценить его роль как порообразующего и модифицирующего компонента.

Добавление ПАН увеличивает потери массы при термообработке ФФС и ПС. Для ФФС при 200 °С потеря массы возрастает с 1,7% (без ПАН) до 2,34% (при 10% ПАН), при 500 °С с 10,8% до 12,18%. При 1000 °С масса снижается с 36,7 г до 38,7 г, прирост составляет менее 6%. Для ПС влияние ПАН выражено сильнее: потери массы увеличиваются с 42% до 51,2% при содержании 10% ПАН. Таким образом, введение ПАН усиливает деградацию и газовыделение, способствуя формированию более развитой пористой структуры.

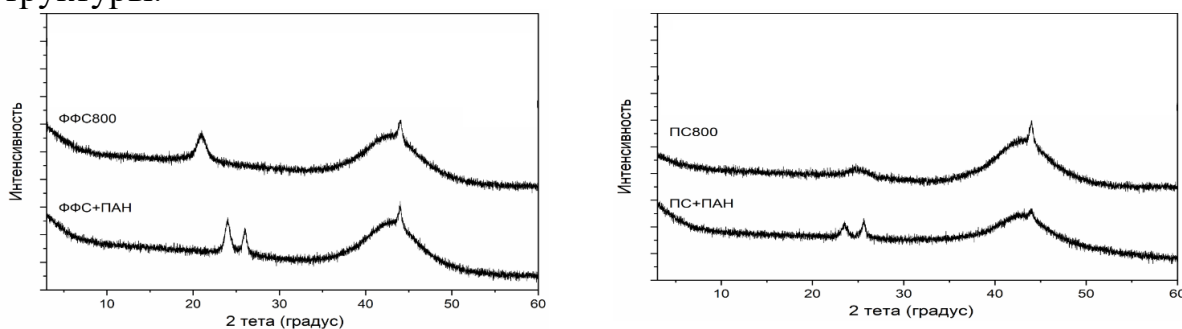


Рис. 6. Схематические XRD-дифрактограммы углеродных образцов - ФФС-800 и ПС-800 (без и с добавлением 5% ПАН).

Рентгенофазовый анализ показал, что ФФС-600 характеризуется широким аморфным пиком $\sim 22^\circ 2\theta$, а при 800 °С (ФФС-800) формируются графитоподобные области с сужением и усилением пика (002) ($\sim 26^\circ 2\theta$) и появлением плеча (100) ($\sim 43^\circ 2\theta$), что отражает рост упорядоченности. ПС-600 почти не имеет выраженных пиков, а ПС-800 демонстрирует слабый, размытый пик $\sim 25^\circ 2\theta$, свидетельствующий о частичной ароматизации, но сохраняющейся аморфной структуре. Введение ПАН усиливает формирование ароматических фрагментов: у ПС с ПАН при 800 °С появляется пик (002), хотя структура остаётся высокодефектной. Для ФФС добавка ПАН увеличивает дефектность, но сохраняет более выраженный ближний порядок и внутриплоскостную корреляцию. Азотсодержащие группы ПАН расширяют межслоевые расстояния, но сохраняют однофазную структуру. Таким образом, ПАН способствует ароматической конденсации и развитию упорядоченности, особенно в менее термостойких системах на основе ПС.

Для получения активированных углеродных материалов смеси ПС+ПАН и ФФС+ПАН с NaOH (в соотношении 1:0,1–1:2) подвергали двухстадийной термической обработке. На первой стадии проводили стабилизацию при 250-

300 °С в токе воздуха для циклизации ПАН и термосшивки ФФС. На второй стадии осуществляли карбонизацию и щелочную активацию при 700-800 °С в атмосфере азота. В ходе активации NaOH способствовал формированию микропор через дегидратацию и газофазные процессы. После охлаждения образцы промывали водой и 0,1 М HCl до нейтрального pH и сушили при 105 °С.

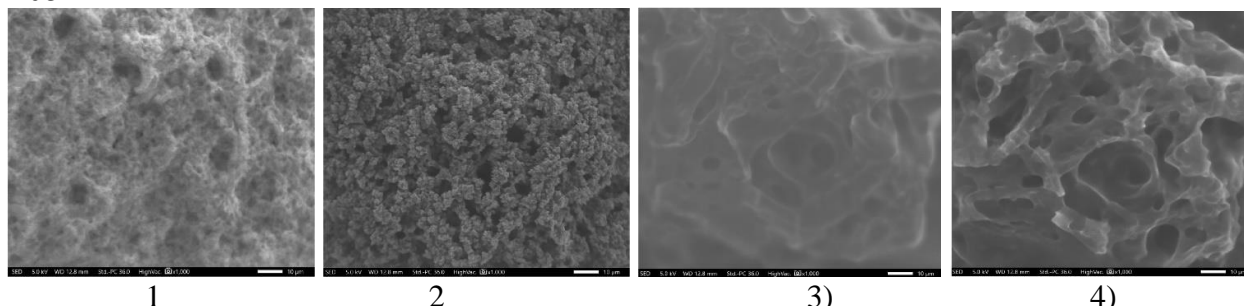


Рис. 7. Морфология поверхности углей, полученных при 800°С: 1) ФФС+ПАН-5; 2) ФФС+ПАН-10; 3) ПС+ПАН-5; 4) ПС+ПАН-10.

Образец ФФС+ПАН-5 характеризуется плотной структурой с неровной поверхностью и отдельными микропорами, тогда как при 10% ПАН пористость значительно возрастает, поверхность становится более рыхлой и ячеистой, что свидетельствует о развитии микротекстуры за счёт внедрения азота. Для ПС эффект ПАН выражен сильнее: при 5% пористость мала, но при 10% наблюдается резкое увеличение количества и размеров пор, образование лёгкой ячеистой структуры с тонкими стенками, что связано с ароматической конденсацией при пиролизе.

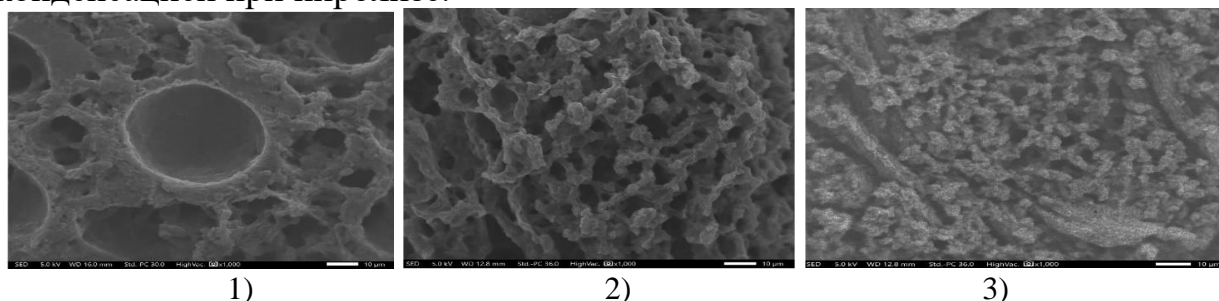


Рис. 8. Микроснимки образцов ФФС+ПАН-10 при разных соотношениях с NaOH: 1) ФФС/NaOH=1/0,4; 2) ФФС/NaOH=1/0,8; 3) ФФС/NaOH=1/1,5.

Анализ микрофотографий ФФС+ПАН-10 показывает, что при соотношении ФФС/NaOH = 1/0,4 формируются крупные разветвлённые поры, а при 1/0,8 пористость становится более равномерной и развитой за счёт оптимальной деградации матрицы. При дальнейшем увеличении NaOH до 1/1,5 структура ухудшается: мелкие поры исчезают, наблюдается агрегация, связанная с разрушением каркаса. В отличие от природных углеродов, полимерные материалы с низкой зольностью (<0,5%) не требуют высоких доз активатора, так как избыток NaOH снижает пористость.

При ПС/NaOH = 1/0,4 структура характеризуется равномерной макро- и мезопористостью с хорошей связностью каркаса. При увеличении NaOH до 1/0,8 размеры пор увеличиваются, пористость оптимизируется без разрушения структуры. Однако при 1/1,5 начинается деградация: углеродная сетка разрушается, появляются микродефекты. По сравнению с ФФС+ПАН-10,

углероды на основе ПС менее устойчивы к высокому содержанию NaOH из-за их низкой термостойкости и зольности.

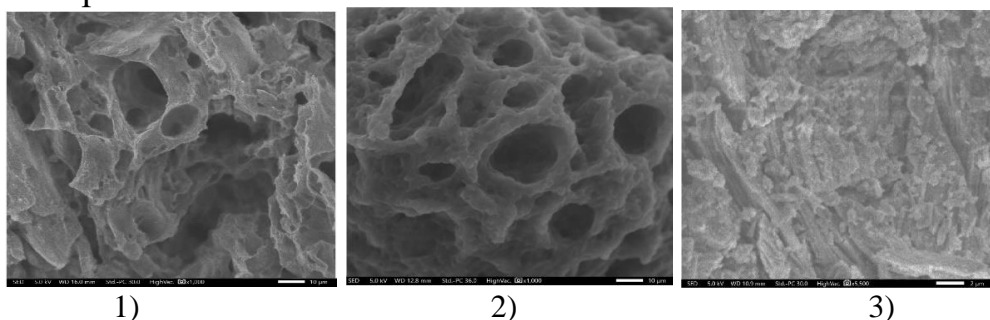


Рис. 9. Микроснимки образцов ПС+ПАН-10 при разных соотношениях с NaOH: 1) ПС/NaOH=1/0,4; 2) ПС/NaOH=1/0,8; 3) ПС/NaOH=1/1,5.

Далее были проведены процессы по установлению текстурных характеристик химически активированных углей с различными соотношениями активирующего агента.

Таблица 2.

Текстурные характеристики образцов с ПАН

Образец	$S_{уд}$, м ² /г	V_1 , см ³ /г	V_2 , см ³ /г	R , Å	Average pore hydraulic radius (V/A)
ФФС+ПАН-5	125,62	0,0828	0,1012	63,192	4,3882
ФФС+ПАН-10	456,10	0,5357	0,0623	58,376	3,7701
ПС+ПАН-5	104,01	0,0688	0,0841	64,101	4,3685
ПС+ПАН-10	512,88	0,6025	0,0701	57,125	3,7121

Таблица 3.

Текстурные характеристики химически активированных образцов

Образец	$S_{уд}$, м ² /г	V_1 , см ³ /г	V_2 , см ³ /г	R , Å	Average pore hydraulic radius (V/A)
АПС-0,8	749,7	0,914	0,167	58,606	3,4796
АФФС-0,8	873,3	1,021	0,119	57,373	3,7711

Добавление ПАН к ФФС и ПС существенно увеличивает удельную поверхность и объём микропор. Для ФФС+ПАН-10 $S_{уд}$ возрастает до 456,10 м²/г против 125,62 м²/г для ФФС+ПАН-5, а для ПС — с 104,01 до 512,88 м²/г. При этом объём микропор достигает 0,5357–0,6025 см³/г, а средний радиус пор уменьшается, что свидетельствует о формировании мелкопористой структуры. Особенно выраженный эффект наблюдается у ПС.

Активация NaOH дополнительно увеличивает пористость: для АПС-0,8 и АФФС-0,8 $S_{уд}$ составляет 749,7 и 873,3 м²/г, объём микропор — 0,914 и 1,021 см³/г соответственно, с доминированием мелких пор радиусом менее 4 Å. Сравнительный анализ показал, что ФФС обеспечивает более высокую пористость, чем ПС, благодаря лучшей термостабильности и каркасообразующей способности.

В четвертой главе «Анализ адсорбционной активности углей на основе фенолформальдегидной смолы и полистирола по отношению к органическим адсорбатам» приводятся результаты исследования адсорбционных характеристик термически- и химически активированных углей.

Фенол и его производные токсичные и устойчивые загрязнители водной среды, что обуславливает актуальность изучения их адсорбции на углеродных сорбентах. Изучена кинетика удаления фенола углями на основе ФФС и ПС с различными текстурными характеристиками. Для эксперимента 0,05 г сорбента добавляли в 50 мл раствора фенола (20-100 мг/л) и выдерживали при 150 об/мин при комнатной температуре до 24 ч. Отбор проб производили через 5–360 минут, растворы центрифугировали (4000 об/мин, 10 мин) и фильтровали. Концентрацию фенола определяли спектрофотометрически при 270 нм, используя калибровочную кривую. Адсорбционная способность рассчитывалась по разности начальной и остаточной концентраций.

На рис. 10 представлены графики кинетики изменения концентрации фенола в системах с различными адсорбционными материалами.

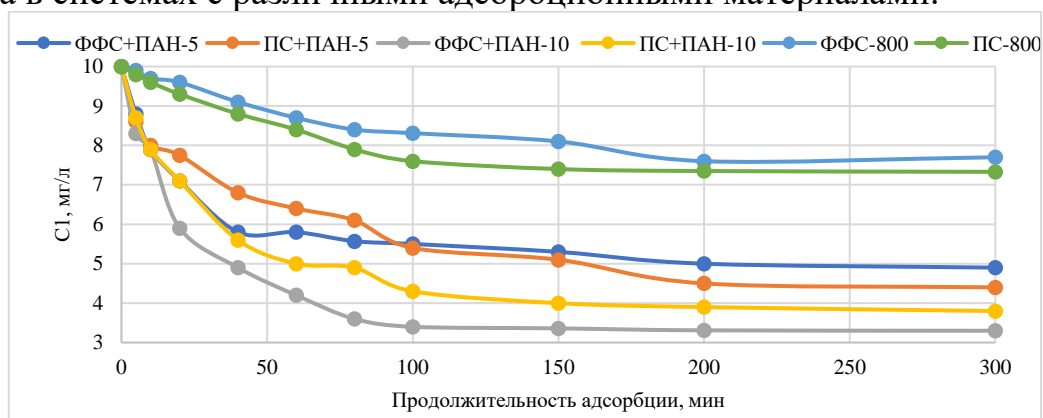


Рис. 10. Кинетика адсорбционного снижения фенола.

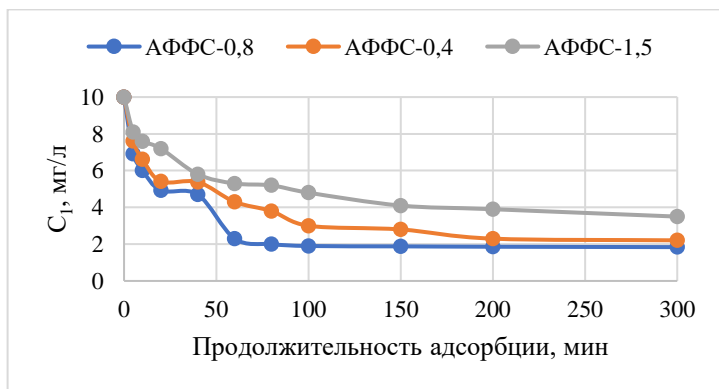


Рис. 11. Кинетика адсорбционного снижения фенола из водных растворов.

Наиболее интенсивное снижение концентрации фенола отмечено в первые 20-40 минут адсорбции для всех образцов. Максимальная сорбционная активность зафиксирована у ФФС+ПАН-10: за 40 минут концентрация снижается с 10,0 до 4,9 мг/л, а к 300-й минуте до 3,3 мг/л. У ПС+ПАН-10 остаточная концентрация достигает 3,8 мг/л за 300 минут; темп сорбции после 60 минут замедляется из-за ограниченной доступности пор. Для ФФС+ПАН-5 и ПС+ПАН-5 остаточные концентрации составляют 4,9 и 4,4 мг/л соответственно, что связано с меньшим эффектом порообразования. Исходные угли без ПАН (ФФС-800 и ПС-800) демонстрируют наименьшую эффективность: остаточная концентрация фенола 7,7 и 7,33 мг/л соответственно, что подтверждает значимость модификации ПАН для повышения сорбционной ёмкости.

Анализ кинетики адсорбции фенола на активированных образцах ФФС показал, что оптимальные свойства достигаются при соотношении ФФС/NaOH = 1/0,8. У АФФС-0,8 через 60 минут концентрация фенола снижается до 2,3 мг/л, а к 300-й минуте – до 1,84 мг/л. АФФС-0,4 обеспечивает остаточную концентрацию 2,21 мг/л, что лучше, чем у необработанного ФФС-800 (7,7 мг/л), но хуже, чем у АФФС-0,8. При избыточной активации (АФФС-1,5) скорость сорбции снижается: к концу эксперимента концентрация фенола остаётся около 3,5 мг/л, что связано с разрушением пористой структуры. Все активированные угли превосходят исходный материал, однако наилучшее сочетание удельной поверхности и доступных центров достигается при оптимальной дозировке NaOH 1/0,8.

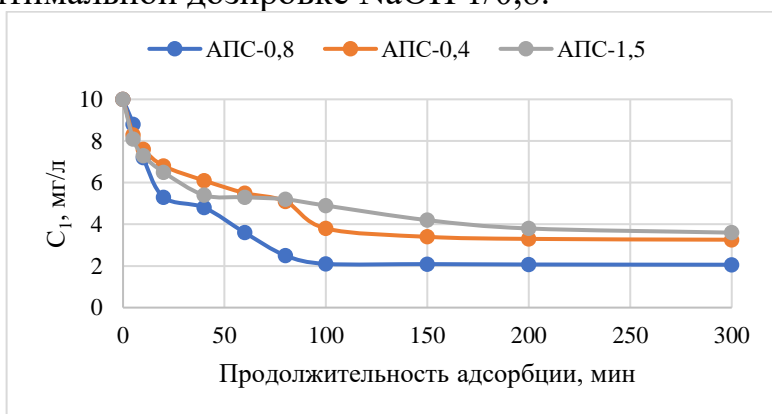


Рис. 12. Кинетика адсорбционного снижения фенола из водных растворов ($C_0=10$ мг/л).

Активированные угли на основе ПС при разной степени щелочной активации демонстрируют различия в адсорбции фенола. АПС-0,8 показал лучшие результаты: через 60 минут концентрация фенола снизилась до 3,6 мг/л, а через 300 минут — до 2,06 мг/л. При меньшем содержании NaOH (АПС-0,4) остаточная концентрация составила 3,26 мг/л, а при избытке NaOH (АПС-1,5) 3,6 мг/л. Оптимальным оказалось соотношение ПС/NaOH = 1/0,8.

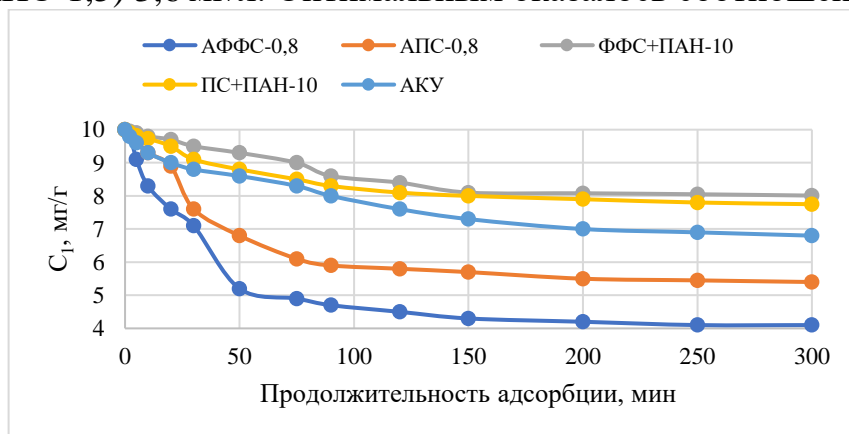


Рис. 13. Кинетика адсорбционного снижения цефазолина из водных растворов ($C_0=10$ мг/л) при комнатной температуре.

Введение 10% ПАН увеличивает удельную поверхность и число активных центров. Наилучшие характеристики достигнуты при активации NaOH в соотношении 1/0,8; избыток щёлочи снижает эффективность из-за разрушения структуры. Для изучения адсорбции цефазолина использован фотометрический метод с нингидрином ($\lambda = 565$ нм). Растворы цефазолина (10 мг/л) обрабатывали 0,5% раствором нингидрина с последующим нагревом. Для адсорбционных испытаний использовали суспензию 50 мл раствора с

0,05 г сорбента, выдержанную при 25 °С. После фильтрации остаточная концентрация определялась спектрофотометрически.

Анализ данных показал, что наибольшую скорость и глубину адсорбции цефазолина обеспечивает образец АФФС-0,8: за 50 минут концентрация снижается с 10 до 5,2 мг/л, а через 300 минут до ~4,1 мг/л. Образец АПС-0,8 снижает концентрацию до ~5,4 мг/л. Немодифицированные материалы (ФФС+ПАН-10 и ПС+ПАН-10) демонстрируют слабую сорбционную активность: остаточная концентрация остаётся выше 7,5–8 мг/л. Коммерческий АКУ показывает промежуточные результаты, уступая АФФС-0,8.

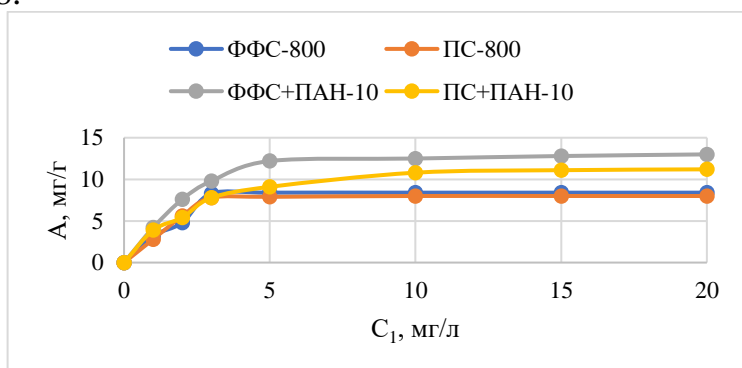


Рис. 14. Изотермы адсорбции фенола на изучаемых образцах при комнатной температуре.

Изотермы показывают, что термоактивированные ФФС-800 и ПС-800 имеют предельную адсорбцию около 8,2 мг/г. Добавление 10% ПАН увеличивает сорбционную способность: для ФФС+ПАН-10 — до более 13 мг/г, для ПС+ПАН-10 — до ~11 мг/г. Рост объясняется увеличением удельной поверхности и образованием дополнительных функциональных групп. Изотермы модифицированных образцов имеют форму Ленгмюра, с быстрым насыщением при низких концентрациях, особенно выраженным у ФФС+ПАН-10.

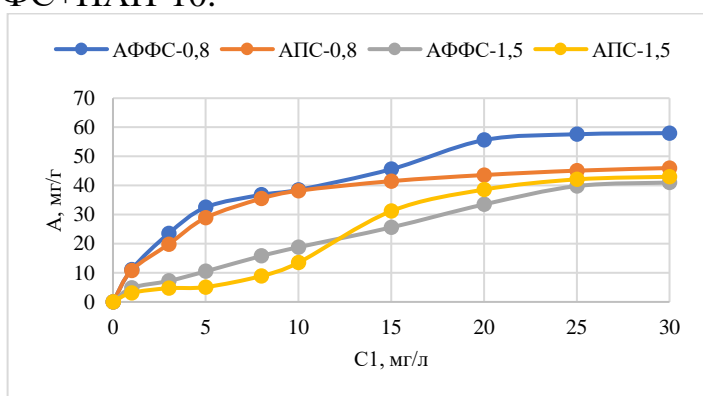


Рис. 15. Изотермы адсорбции фенола на изучаемых образцах при комнатной температуре.

Изотермы адсорбции фенола на NaOH-активированных сорбентах показывают значительно более высокую ёмкость: для АФФС-0,8 — до ~58 мг/г против ~13 мг/г для немодифицированных образцов. Рост связан с развитием микропористости и увеличением кислородсодержащих групп. Изотермы относятся к типу L (Жиль-Томас), характерному для монослойной адсорбции с высокой аффинностью. При соотношении NaOH 1/0,8 достигается максимум, тогда как избыток щёлочи (1/1,5) снижает эффективность из-за разрушения структуры.

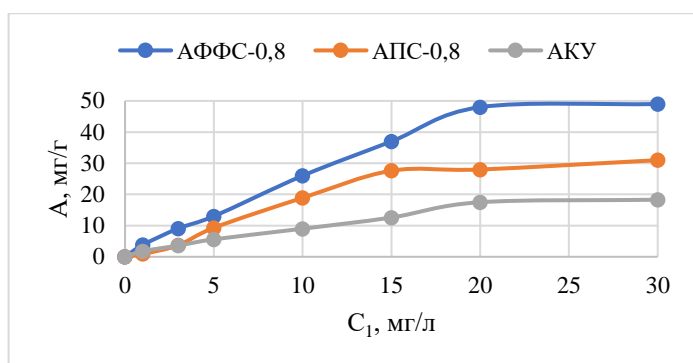


Рис. 16. Изотермы адсорбции цефазолина на изучаемых образцах при комнатной температуре.

Изотермы адсорбции цефазолина на активированных сорбентах АФФС-0,8 и АПС-0,8 демонстрируют заметно более высокую сорбционную ёмкость по сравнению с промышленным активированным углём (АКУ). Наибольшее значение адсорбции достигается для АФФС-0,8 и составляет ~49 мг/г, в то время как для АПС-0,8 – ~31 мг/г, а для АКУ – не превышает ~19 мг/г. Это указывает на высокую эффективность углеродных адсорбентов, полученных из полимерных отходов с использованием щелочной активации, по отношению к антибиотикам.

Форма изотерм АФФС-0,8 и АПС-0,8 имеет S-образный характер, характерный для систем с ограниченной доступностью активных центров при низких концентрациях и более активным заполнением пор при росте C_1 . Для АКУ наблюдается более пологий профиль, что указывает на меньшее количество доступных микропор и слабое взаимодействие с цефазолином.

Анализ параметров уравнения Ленгмюра показывает, что наибольшая предельная ёмкость (A_0) наблюдается у щелочно-активированных образцов: АФФС-0,8 (0,23 ммоль/г) и АПС-0,8 (0,19 ммоль/г), что связано с высокой микропористостью ($\Sigma V = 0,132$ и $0,118$ см³/г) и наличием полярных групп, способствующих физико-химической адсорбции. ФФС-800 и ПС-800 без ПАН характеризуются минимальным A_0 (0,03 и 0,02 ммоль/г) из-за слабой пористости. Добавление ПАН увеличивает ёмкость до 0,08–0,09 ммоль/г за счёт порообразования, особенно для ФФС+ПАН-10 ($K = 11,8$). Наивысшие значения K и наиболее отрицательные значения энергии Гиббса (G) зарегистрированы для АФФС-0,8 ($K = 38,6$, $G = -11,3$ кДж/моль) и ФФС+ПАН-10 ($G = -18,5$ кДж/моль), что указывает на вклад водородных и π - π взаимодействий в процесс адсорбции.

Анализ параметров уравнения Ленгмюра по адсорбции цефазолина показывает, что максимальная адсорбционная ёмкость достигается для АФФС-0,8 (0,16 ммоль/г) и АПС-0,8 (0,13 ммоль/г), что подтверждает эффективность щелочной активации NaOH. Константы равновесия ($K = 41,38$ и $39,99$) указывают на высокую аффинность поверхности к цефазолину, а значения энергии Гиббса ($-8,89$ и $-8,93$ кДж/моль) на физическую природу сорбции с участием водородных и донорно-акцепторных взаимодействий. Для АКУ зарегистрированы более низкие значения A_0 (0,09 ммоль/г) и K (21,13), что связано с ограниченной микропористостью и менее специфичной поверхностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что ФФС демонстрирует ступенчатое разложение с высоким выходом углерода (до 63,3% при 700 °С), тогда как ПС разлагается одностадийно с меньшим остатком (58,6% при 700 °С), а при 1000 °С потери

массы достигают 36,7 и 42%, что подтверждает лучшую пригодность ФФС в качестве сырья для получения термостабильных углеродных материалов.

2. Рентгенофазовый анализ показал, что для образца ФФС-800 наблюдается интенсивный и суженный пик (002) при $2\theta \approx 26^\circ$ и 43° (100), свидетельствующее о частичной графитизации и формировании неупорядоченной структуры. Размер кристаллитов по плоскости (002) составляет $\sim 1,9$ нм для ФФС-800 и $\sim 1,1$ нм для ПС-800. ИК-спектры образцов после термообработки при 800°C демонстрируют исчезновение полос С-Н ($2800\text{-}3000\text{ см}^{-1}$) и С=О ($\sim 1700\text{ см}^{-1}$), указывая на удаление летучих фрагментов и образование ароматического углерода.

3. ФФС-700 характеризуются плотной и однородной структурой с мелкими порами, в то время как термоактивированные угли из ПС обладают рыхлой, фрагментированной морфологией с выраженной макропористостью и трещиноватостью. Наиболее высокие значения удельной поверхности и объёма пор достигнуты при температуре 850°C : для ФФС – $94,12\text{ м}^2/\text{г}$ и $0,1585\text{ см}^3/\text{г}$, соответственно; для ПС – $82,24\text{ м}^2/\text{г}$ и $0,1923\text{ см}^3/\text{г}$. Средний радиус пор составляет $6,47\text{ \AA}$ (ФФС) и $5,47\text{ \AA}$ (ПС), что подтверждает формирование мезопористой структуры.

4. Введение ПАН способствует повышению степени упорядоченности углеродной структуры и у ФФС+ПАН-800 наблюдаются сужение и рост интенсивности пика (002) ($\sim 26^\circ 2\theta$), а также появление плеча около 43° , что указывает на частичную графитизацию и формирование упорядоченной упаковки. В ПС+ПАН-800 пик (002) остаётся широким и маловыраженным, что отражает аморфную структуру, обусловленную низкой термостойкостью. По данным ИК-спектроскопии, при 800°C исчезают полосы С-Н ($2800\text{-}3000\text{ см}^{-1}$) и С=О ($\sim 1700\text{ см}^{-1}$), характерные для органических остатков, а слабые полосы С=N и N-H, сохранившиеся в модифицированных образцах, подтверждают внедрение азота в структуру углеродной фазы.

5. Предельная сорбционная ёмкость по фенолу у термоактивированных углей ФФС-800 и ПС-800 составляет всего $0,03$ и $0,02$ ммоль/г соответственно. Введение 10% ПАН приводит к увеличению A_0 до $0,08$ (ФФС+ПАН-10) и $0,09$ ммоль/г (ПС+ПАН-10), что обусловлено улучшением пористой структуры и формированием полярных групп. Наиболее высокие значения адсорбционной способности получены для образца АФФС-0,8: $A_0 = 0,23$ ммоль/г, константа равновесия $K = 38,6$ и суммарный объём пор $V = 0,132\text{ см}^3/\text{г}$, что свидетельствует о развитой микропористой структуре и высокой плотности активных центров.

6. Наилучшие характеристики по адсорбции цефазолина показал образец АФФС-0,8 ($A_0 = 0,16$ ммоль/г, $K = 41,38$, $V = 0,110\text{ см}^3/\text{г}$), обладающий развитой микропористостью и высокой аффинностью к молекулам антибиотика. Близкие значения продемонстрировал АПС-0,8 ($A_0 = 0,13$ ммоль/г), который также превзошёл импортный активированный уголь по сорбционной ёмкости. Химически активированные образцы прошли промышленные испытания на предприятии ООО «KHANTECH GROUP», обеспечив снижение концентрации фенолов с 22 до $0,8$ мг/л и красителей — с 29 до $<0,2$ мг/л, что подтверждает его практическую пригодность для очистки сточных вод текстильной промышленности.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 ON AWARDING
SCIENTIFIC DEGREES AT NAMANGAN STATE TECHNICAL
UNIVERSITY**

NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY

KHUDAYBERDIEV NOSIRJON

**COLLOID-CHEMICAL PRINCIPLES FOR THE DEVELOPMENT OF
CARBON ADSORBENTS FROM SECONDARY THERMOPLASTICS AND
THERMOSETTING RESIN**

02.00.11 – Colloid and membrane chemistry

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

Namangan-2025

The topic of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation is registered under number B2025.2.PhD/K963 at the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan.

The dissertation was completed at the Namangan state technical university.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the web page of the Scientific Council (www.namdtu.uz) and on the information education portal "ZiyoNet" at (www.ziyo.net).

Research supervisor:

Ergashev Oybek

doctor of chemical sciences, professor

Official opponents:

Salikhanova Dilnoza

doctor of technical sciences, professor

Abdulkhayev Tolibjon

doctor of chemical sciences, docent

Leading organization:

Fergana State Technical University

The defense of the dissertation will take place on «12» august 2025 at 11⁰⁰ at the meeting of Scientific council DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 at the Namangan state technical university and Research Center at the following address: 7, Kasansay Street, Namangan District, 160115, Namangan, Phone: (+99 869) 234-14-85, fax: (+99 869) 234-14-85, e-mail: info@namdtu.uz, Namangan State Technical University, Building 6, 1st floor, room № 303).

The dissertation has been registered at the Informasion-resource Center of the Namangan state technical university (registration number № 43). (Address: 7., Kasansay Street 160115, Namangan) Tel.: (+99869) 234-14-85; fax: (+99869) 234-14-85)

The abstract of dissertation is distributed on “29th” July, 2025 year
(Protokol at the register № 21 of “29th” July, 2025 year)

I. Shamshidinov

Deputy of chairman of the scientific award council scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

O. Mallabayev

Scientific secretary of the scientific award council scientific degrees, doctor of philosophy in chemical sciences, docent

D. Sherkuziyev

Chairman of the scientific seminar at the scientific council for awarding scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to develop colloid-chemical principles for the creation of carbon adsorbents derived from secondary thermoplastic and thermosetting resin materials.

The subject of the research is the influence of the nature of polymer raw materials, carbonization conditions, the composition of modifying additives, and the degree of chemical activation on the structure, textural properties, and sorption activity of the obtained carbon adsorbents.

The scientific novelty of the research is as follows:

it was established that the addition of 10 wt.% of polyacrylonitrile (PAN) to phenol-formaldehyde resin (PFR) and polystyrene (PS) leads to an increase in the carbon yield at 800 °C by 2-9% compared to unmodified systems, due to aromatic stabilization and the incorporation of nitrogen-containing structures into the carbon matrix;

it was revealed that alkaline activation with NaOH at a 1:0.8 ratio provides the highest specific surface area values: up to 132 m²/g for AFFR-0.8 and 118 m²/g for APS-0.8, due to the optimal degradation of the carbon framework and the formation of a microporous structure;

it was substantiated that the modified samples PFR+PAN-10 and PS+PAN-10 reach specific surface areas of 94.12 m²/g and 82.24 m²/g, respectively, with mesopore volumes increasing to 0.1585 cm³/g (PFR) and 0.1923 cm³/g (PS), attributed to effective thermal restructuring and the formation of microdefects;

it was demonstrated that the modified sorbents AFFR-0.8 and APS-0.8 exhibit maximum sorption capacities for phenol up to 58 mg/g and 31 mg/g, respectively—surpassing those of unmodified carbons (PFR-800: 13 mg/g; PS-800: 8.2 mg/g) by 4-7 times, which is attributed to the high micropore density and the presence of functional groups;

It was determined that cefazolin adsorption on AFFR-0.8 reaches 49 mg/g, while commercial activated carbon achieves only 19 mg/g, due to the high affinity of the polar surface enriched with functional groups for antibiotic molecules;

The optimal Langmuir parameters were recorded for AFFR-0.8: $A_0 = 0.23$ mmol/g, $K = 38.6$, and $\Delta G = -11.3$ kJ/mol for phenol, and $A_0 = 0.16$ mmol/g, $K = 41.38$ for cefazolin, indicating the predominance of physicochemical adsorption involving hydrogen bonding and π - π interactions

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained on the preparation of carbon adsorbents from polymer waste:

the thermochemically activated carbon adsorbent APS-0.8, synthesized from polystyrene and polyacrylonitrile using 0.8% NaOH at 800 °C, has been included in the “List of Prospective Developments for Implementation in 2026-2030” at LLC “KHANTEX GROUP” (Reference No.88, May 15, 2025). As a result of its application for treating textile wastewater contaminated with phenolic compounds and dyes, the concentration of phenolic compounds was reduced from 22 mg/L to 0.8 mg/L, dyes from 29 mg/L to <0.2 mg/L, and total organic matter from 128 mg/L to 1.8 mg/L, meeting the technological requirements for the removal of persistent

organic pollutants;

the method of producing thermochemically activated carbon AFFS-0.8 from phenol-formaldehyde resin and polyacrylonitrile for the purification of general industrial wastewater from phenolic compounds and residual organics was also included in the “List of Prospective Developments for Implementation in 2026-2030” at LLC "KHANTEX GROUP" (Reference No.88, May 15, 2025)As a result, the phenol concentration was reduced from 2.2 mg/L to <0.2 mg/L and total organic matter from 36.5 mg/L to 9.2 mg/L, enabling high-efficiency deep purification of wastewater.

Dissertation structure and volume. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used literature, notations and appendices. The length of the dissertation was 117 pages.

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

I бўлим (I часть; part I)

1. Ergashev O.K., Khudayberdiev N.E. Study of the Main Characteristics of Polystyrene and Phenol-Formaldehyde Resin Waste // Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology. 2025. Vol. 10. Issue 1. Pp. 168-173.
2. Abdumalikov A. A., Khudoiberdiev N. E., Matmusaev A. K., Ochilov G. M., Ergashev O. K. Polymer Waste for the Creation of Sorption Materials for Wastewater Treatment // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 12, № 3. – P. 23173–23176.
3. Очилов Г.М., Бахронов Х.Н., Эргашев О.К., Холиков К.А., Худайбердиев Н.Э., Абдумаликов А.А., Матмусаев А.К. Установление адсорбционной активности образцов углей на основе полимерных отходов по отношению к ионам Cu^{2+} // Научный вестник Кокандского ГПИ. 2025. № 1. С. 283–290.
4. Аскарлова Д.О., Холиков К, Худайбердиев Н.Э., Хайдаров Д.М., Абдикамалова А.Б., Эргашев О.К., Эшметов И.Д. Испытание угольных адсорбентов на основе растительного отхода для очистки соевого масла и глицерина // Научно-технический журнал «Машиностроение». 2024. № 2 (Спецвыпуск). С. 29–35.
5. Ergashev O., Abdikamalova A., Bakhronov Kh., Askarova D., Khudayberdiev N.E., Mekhmonkhonov M., Xolikov K. Thermodynamics of Congo red dye adsorption processes on mineral and carbon adsorbents // Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology. 2024. Vol. 9. Issue 4. P. 228–234.

II бўлим (II часть; part II)

6. Ergashev O., Xudayberdiyev N. Colloid-Chemical Fundamentals of Producing Carbon Adsorbents from Secondary Thermoplastics and Thermosetting Resins // International Congress on Biological, Physical and Chemical Studies. – 2025. – Vol. 12. – Pp. 11–15.
7. Худайбердиев Н.Э., Эргашев О.К. Эффективные сорбенты из полимерных отходов – инновационное решение для очистки сточных вод // International Conference on Adaptive Learning Technologies. – 2025. – Vol. 17. – С. 14-17.
8. Asqarova D.O., Khudayberdiev N.E., Abdikamalova A.B., Xoliqov K., Xaydarov D.M. Qo'ng'ir ko'mir namunalarining yodga nisbatan faolligini aniqlash // Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari «Kimyo fanining muammolari, sanoat sohalariga tatbiqi va yashil texnologiyalar». – Namangan, 18–19 aprel 2025. – 879–881 b.

9. Д.О.Аскарова, Худайбердиев Н.Э., А.Б.Абдикамалова, О.К.Эргашев Термический анализ образцов углей // *Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari «Kimyo fanining muammolari, sanoat sohalariga tatbiqi va yashil texnologiyalar»*. – Namangan, 18–19 aprel 2025. 904-905 b.

10. Askarova D.O. Abdikamalova A.B., Seytnazarova O., Khaydarov D., Najimova N. Changes in ash content and dispersion of coals during chemical activation // *Материалы международной конференции «Современное научно-технологическое и образовательное сотрудничество в области химических и пищевых технологий в целях устойчивого развития»*. Нукус, 18–19 марта 2025 г. – С. 50-53.

11. Очилов Г.М., Эргашев О.К., Н.Э.Худайбердиев, Абдумаликов А.А., Матмусаев А.К. Анализ проблем загрязнений воды *Материалы международной научно-технической конференции*. г. Термез, 7–8 февраля 2025 г. – С. 118-119.

12. Очилов Г.М., Эргашев О.К., Н.Э.Худайбердиев, Абдумаликов А.А., Матмусаев А.К. Перспективы переработки полимерных отходов в адсорбционные материалы *Материалы международной научно-технической конференции*. г. Термез, 7–8 февраля 2025 г. – С. 120-121.

13. Аскарова Д.О., Н.Э.Худайбердиев, Холиков К.А., Бахронов Х.Н., Эргашев О.К. Адсорбционная активность углей на основе полимерных отходов по отношению к Cu^{2+} из водных растворов *Материалы международной научно-технической конференции*. г. Термез, 7–8 февраля 2025 г. – С. 283-284.

14. Эргашев О.К., Н.Э.Худайбердиев Полимерные отходы для создания сорбционных материалов // *Материалы I международной научно-технической конференции «Материалы I международной научно-технической конференции «Роль коллоидной химии в сфере нефтегазопереработки, химической технологии и экологии»* Ташкент, 10-11 октября 2024 г. – С. 156-157.

15. Очилов Г.М., Эргашев О.К., Худайбердиев Н.Э., Абдумаликов А.А., Матмусаев А.К. Загрязнение и очистка воды – проблемы современной прикладной коллоидной химии // *Материалы I международной научно-технической конференции «Роль коллоидной химии в сфере нефтегазопереработки, химической технологии и экологии»* Ташкент, 10-11 октября 2024 г. – С. 185-186.

16. Очилов Г.М., Эргашев О.К., Худайбердиев Н.Э., Абдумаликов А.А., Матмусаев А.К. Полимерные отходы как сырьё для сорбентов // *Материалы I международной научно-технической конференции «Роль коллоидной химии в сфере нефтегазопереработки, химической технологии и экологии»* Ташкент, 10-11 октября 2024 г. – С. 187-188.

17. Д.О.Аскарова, К.Холиков, А.Б.Абдикамалова, О.К.Эргашев, Х.Н.Бахронов Изменение массы угля при термической и химической активации // *Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari «Kimyo fanining muammolari, sanoat sohalariga tatbiqi va yashil texnologiyalar»*. – Namangan, 18–19 aprel 2025. – 885-887 b.

Avtoreferat Namangan muhandislik-texnologiya instituti ilmiy-texnika jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazildi va o'zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (29.07.2025 y.).

Bosishga ruxsat etildi: 29.07.2025 yil.
Bichimi 60x841/16, «Times New Roman»
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog'i 3,0 Adadi: 100. Buyurtma: № 33/07
NamDTU bosmaxonasida chop etildi.
Namangan shahri, Kosonsoy ko'cha, 7-uy.

