

UO‘K: 544.723:628.35:665.6.7

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.2.2026.24

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ADSORBSIYA JARAYONIGA PH, KONTAKT VAQTI, SORBENT MIQDORI VA BOSHLANG‘ICH KONSENTRATSIYA TA‘SIRINI O‘RGANISH



Turdiyev Jasurbek
Qahramon o‘g‘li

Qarshi davlat texnika universiteti,
“Ekologiya va atrof-muhit
muhofazasi” kafedrasida doktoranti,
Qarshi, O‘zbekiston



Kuyboqarov Oybek
Ergashevich

Qarshi davlat texnika universiteti,
“NGI va UQIT” kafedrasida dotsenti,
Qarshi, O‘zbekiston



Panjiyev Ulug‘bek
Rustamovich

Kimyo fanlari bo‘yicha falsafa
doktori (PhD), Qarshi xalqaro
universiteti rektori, Qarshi,
O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada adsorbsiya jarayonining samaradorligiga ta‘sir etuvchi asosiy omillar, jumladan eritma pH muhiti, kontakt vaqti, sorbent miqdori hamda adsorbatning boshlang‘ich konsentratsiyasi tahlil qilingan. Adsorbsiya oqova suvlar, neft mahsulotlari, og‘ir metall ionlari va organik ifloslantiruvchilarni tozalashda samarali usullardan biri sifatida baholangan. Jarayon samaradorligiga sorbentning fizik-kimyoviy xossalari, massa almashinish jarayoni va muvozanat holati ta‘siri yoritilgan. Shuningdek, adsorbsiya izotermalari, kinetik modellar va tajribalarni rejalashtirish usullari ilmiy asosda bayon etilgan.

Kalit so‘zlar: adsorbsiya, pH, kontakt vaqti, sorbent miqdori, boshlang‘ich konsentratsiya, oqova suv, neft mahsulotlari, og‘ir metall ionlari, Langmuir izotermasi, Freundlich izotermasi, adsorbsiya kinetikasi.

Received: 20.05.2026

Accepted: 26.06.2026

Published: 29.06.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ pH, ВРЕМЕНИ КОНТАКТА, КОЛИЧЕСТВА СОРБЕНТА И НАЧАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА ПРОЦЕСС

АДСОРБЦИИ

Турдиев Жасурбек
Кахрамон угли

Каршинский государственный
технический университет,
докторант кафедры «Экология и
охрана окружающей среды»,
Карши, Узбекистан

Куйбокаров Ойбек
Эргашевич

Каршинский государственный
технический университет,
доцент кафедры «НГИ и УКИТ»,
Карши, Узбекистан

Панджиев Улугбек
Рустамович

Доктор философии (PhD) по
химическим наукам, ректор
Каршинского международного
университета, Карши,
Узбекистан

Аннотация. В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность процесса адсорбции, включая pH раствора, время контакта, количество сорбента и начальную концентрацию адсорбата. Адсорбция представлена как один из наиболее эффективных методов очистки сточных вод, нефтесодержащих вод, ионов тяжёлых металлов и органических загрязнителей. Проанализировано влияние физико-химических свойств сорбента, процессов массопереноса и условий достижения равновесия на эффективность очистки. Кроме того, приведены научные основы изотерм адсорбции, кинетических моделей и методов планирования

эксперимента.

Ключевые слова: адсорбция, pH, время контакта, количество сорбента, начальная концентрация, сточные воды, нефтепродукты, ионы тяжёлых металлов, изотерма Ленгмюра, изотерма Фрейндлиха, кинетика адсорбции.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PH, CONTACT TIME, SORBENT DOSAGE, AND INITIAL CONCENTRATION ON THE ADSORPTION PROCESS

**Turdiyev Jasurbek
Kahramon ugli**

Karshi State Technical University,
Doctoral Student of the Department
of Ecology and Environmental
Protection, Karshi, Uzbekistan

**Kuybokarov Oybek
Ergashevich**

Karshi State Technical University,
Associate Professor of the
Department of NGI and UQIT,
Karshi, Uzbekistan

**Panjiyev Ulugbek
Rustamovich**

PhD in Chemical Sciences, Rector
of Karshi International University,
Karshi, Uzbekistan

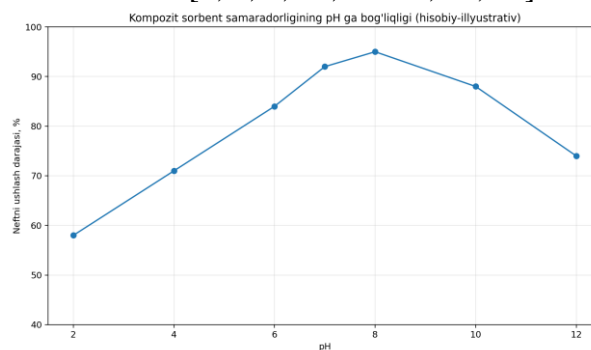
Abstract. This paper investigates the main factors affecting the adsorption process, including solution pH, contact time, sorbent dosage, and the initial concentration of the adsorbate. Adsorption is considered one of the most effective methods for removing pollutants from wastewater, oil-contaminated water, heavy metal ions, and organic contaminants. The influence of the physicochemical properties of the sorbent, mass transfer mechanisms, and equilibrium conditions on adsorption efficiency is discussed. In addition, adsorption isotherms, kinetic models, and experimental design approaches are presented to evaluate and optimize the adsorption process.

Keywords: adsorption, pH, contact time, sorbent dosage, initial concentration, wastewater, petroleum products, heavy metal ions, Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, adsorption kinetics.

Kirish. Eritmaning pH qiymati sorbent yuzasining zaryadi, emulsiya tomchilarining elektrokinetik potentsiali hamda sirt faol moddalarning ionlanish darajasiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, neytral yoki kuchsiz ishqoriy muhitda sorbentning neft tomchilarini ushlab qolish qobiliyati yuqori bo'ladi. Bunday sharoitda sorbent yuzasining namlanishi va tomchilarning koalesensiyasi uchun qulay muhit hosil bo'ladi. Aksincha, kuchli kislotali muhit emulsiyaning barqarorligini oshirsa, yuqori ishqoriy muhitda sovunlanish jarayoni va sorbent yuzasining ortiqcha gidrofillanishi kuzatilishi mumkin.

Adsorbsiya jarayonida kontakt vaqti ortishi bilan dastlab faol markazlar tez to'yinadi, keyinchalik esa adsorbatning ichki g'ovaklarga diffuziyasi hisobiga jarayon sekinlashadi. Odatda dastlabki 20–30 daqiqada adsorbsiya tez kechadi, 45–90 daqiqalarda esa tizim muvozanat holatiga yaqinlashadi. Sorbent miqdorining ortishi tozalash samaradorligini oshiradi, biroq ma'lum chegaradan so'ng birlik massa hisobiga adsorbsiya sig'imi kamayishi faol markazlarning to'liq ishga solinmasligi bilan izohlanadi.

Boshlang'ich konsentratsiyaning ortishi massa almashinishning harakatlantiruvchi kuchini kuchaytiradi, biroq sorbentning tezroq to'yinishiga olib keladi. Shu sababli sanoat amaliyotida adsorbsiya jarayoni odatda mexanik yoki fizik-kimyoviy tozalash bosqichidan keyin, qoldiq ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasi nisbatan past bo'lgan sharoitlarda qo'llaniladi. Bunday yondashuv sorbentning xizmat muddatini uzaytirish, regeneratsiya davrini ko'paytirish va jarayonning iqtisodiy samaradorligini oshirish imkonini beradi [2; 5; 6; 26; 31–36; 98; 99].



1-rasm. Kompozit sorbent samaradorligining pH ga bog'liqligi.

Grafik natijalari eritmaning pH qiymati adsorbsiya samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini namoyon etadi. pH o'zgarishi sorbent sirtidagi funksional guruhlarning protonlanish va deprotonlanish darajasini, shuningdek emulsiya tomchilarining zeta-potensialini o'zgartiradi. Natijada neytral yoki kuchsiz ishqoriy muhit adsorbsiya jarayoni uchun eng qulay sharoitni ta'minlaydi. Aksincha, kuchli kislotali yoki yuqori ishqoriy muhitda dispers tizimning barqarorlashishi tufayli adsorbsiya va ajratish samaradorligi pasayadi.



2-rasm. Kontakt vaqti ortishi bilan adsorbsiya muvozanatiga yaqinlashish.

Grafikda adsorbsiya jarayonining dastlabki bosqichida adsorbat molekularining sorbentning tashqi sirtlari va makrog'ovaklarida tez yutilishi kuzatiladi. Vaqt o'tishi bilan faol markazlarning to'yinishi va adsorbatning ichki g'ovaklarga diffuziyasi hisobiga adsorbsiya tezligi pasayib, tizim asta-sekin muvozanat holatiga yaqinlashadi. Muvozanatga erishish vaqti adsorbsiya jarayoni uchun optimal kontakt vaqtini belgilashda muhim mezon hisoblanadi.

3-jadval

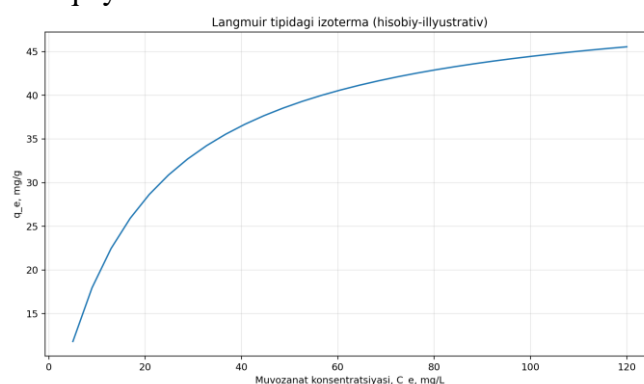
Ish rejimlari bo'yicha umumlashtirilgan samaradorlik ko'rsatkichlari

Omil	Past daraja	Optimal diapazon	Yuqori darajadagi cheklov
pH	2-4: emulsiyaning yuqori barqarorligi	6.5-8.5	10-12: sirt gidrofillashishi mumkin
Doza	0.5-1.0 g/L: markazlar yetishmasligi	2-3 g/L	4-5 g/L: sig'imdan foydalanish pasayadi
Vaqt	5-20 min: tez bosqich	45-90 min	>120 min: qo'shimcha foyda kam
C0	50-200 mg/L	200-500 mg/L	Yuqori yuklamada tez to'yinish

Jadvalda adsorbsiya jarayoniga ta'sir etuvchi asosiy omillar – pH muhiti, sorbent dozasi, kontakt vaqti hamda haroratning tozalash samaradorligiga ta'siri umumlashtirilgan. Ushbu natijalar texnologik jarayon uchun optimal ish rejimini tanlash hamda adsorbsiya samaradorligiga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi parametrlarni aniqlash imkonini beradi.

Natijalar. Izoterma tahlili sorbentning adsorbsion sig'imi va sirt xususiyatlarini baholashda muhim ahamiyatga ega. Tajriba natijalarining Langmuir modeliga mos kelishi adsorbsiya asosan bir qatlamli va energetik jihatdan nisbatan bir xil faol markazlarda sodir bo'lishini ko'rsatadi. Freundlich modeliga moslik esa sorbent sirtining g'ovak va energetik jihatdan notekis tuzilishga ega ekanligini ifodalaydi. Kompozit sorbentlarda odatda ushbu ikki mexanizm birgalikda namoyon bo'ladi: uglerodli komponent mikro-g'ovaklarda adsorbsiyani kuchaytirsa, bentonit va boshqa modifikatorlar ko'p funksiyali faol markazlarni hosil qiladi.

Kinetik tahlil natijalari psevdoo-ikkinchi tartibli modelning yuqori mosligi adsorbsiya jarayonida sirt reaksiyalari muhim o'rin tutishini ko'rsatadi [19]. Shu bilan birga, neft emulsiyalarini adsorbsiyalashda ichki diffuziya, parda diffuziyasi va tomchilarning deformatsiyasi ham sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun jarayonni baholashda bir nechta kinetik modellardan kompleks foydalanish maqsadga muvofiqdir. Zarracha ichidagi diffuziya grafigining koordinata boshidan o'tmasligi tashqi massa almashinish qarshiligi mavjudligini tasdiqlaydi.

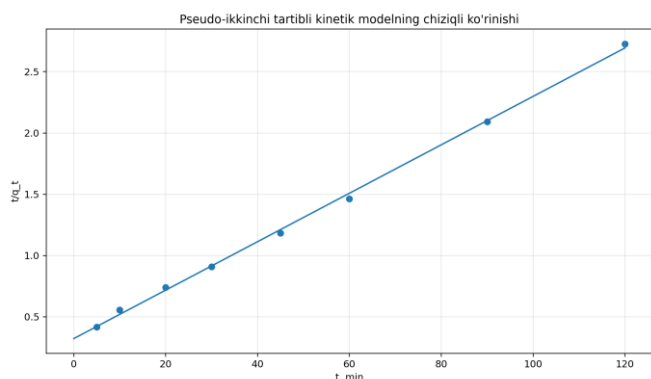


3-rasm. Langmuir tipidagi adsorbsiya izotermasi.

Termodinamik tahlilda Gibbs erkin energiyasining (ΔG) manfiy qiymati adsorbsiya

jarayonining o‘z-o‘zidan kechishini, entalpiya (ΔH) qiymati esa uning endotermik yoki ekzotermik xususiyatini tavsiflaydi. Mo‘tadil musbat ΔH qiymatlari harorat ortishi bilan adsorbsiya samaradorligi oshishini ko‘rsatsa-da, sanoat sharoitida optimal harorat sorbent samaradorligi va energiya sarfi o‘rtasidagi iqtisodiy muvozanat asosida tanlanadi [14–19; 43; 44; 98–100].

Langmuir izotermasiga mos natijalar adsorbsiya jarayonining asosan monoqavatli mexanizm bo‘yicha kechishi va sorbent yuzasidagi faol markazlar sonining cheklanganligini ko‘rsatadi. Ushbu model sorbentning maksimal adsorbsion sig‘imini aniqlash hamda texnologik jarayonning optimal yuklamasini hisoblashda muhim ahamiyat kasb etadi.



4-rasm. Adsorbsiya kinetikasining nisbiy-ikkinchi tartibli modelga mos chiziqli ko‘rinishi.

Kinetik modelning yuqori chiziqli mosligi adsorbsiya tezligi nafaqat tashqi diffuziya, balki sorbent sirtidagi faol markazlar bilan kechadigan kimyoviy o‘zaro ta’sirlar orqali ham boshqarilishini ko‘rsatadi. Mazkur model adsorbsiya jarayonining optimal davomiyligini va sorbentning samarali dozasini aniqlashda muhim amaliy ahamiyatga ega.

4-jadval

Model	Parametr	Qiymat	Interpretatsiya
Langmuir	q_{max}	52 mg/g	Maksimal bir qatlamli sig‘im
Langmuir	K_L	0.058 L/mg	Affinitet ko‘rsatkichi
Freundlich	K_F	11.4	Notekis sirt faol markazlari
Freundlich	$1/n$	0.61	Quvvat qonuniga bo‘ysunuvchi yutilish
PSO	k_2	2.1×10^{-3} g/mg·min	Sirt reaksiyasi hissasi muhim

Turli adsorbsiya modellarining parametrlarini taqqoslash tajriba natijalarini qaysi model aniqroq tavsiflashini aniqlash imkonini beradi. Bu esa adsorbsiya markazlarining tabiati hamda jarayon

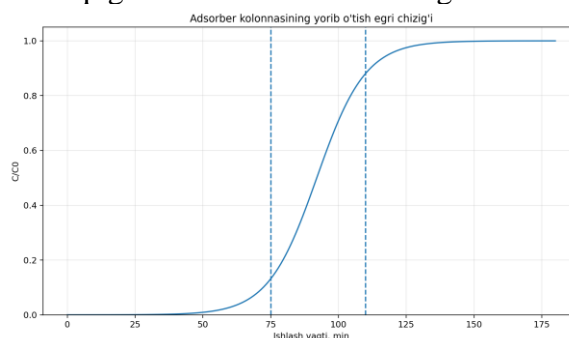
tezligini cheklovchi asosiy mexanizmlarni baholash uchun muhim ilmiy asos yaratadi.

Dinamik adsorbsiya va kolonna jarayoni.

Dinamik adsorbsiya jarayoni sanoat sharoitlarini batch usuliga nisbatan ancha aniqroq modellashtiradi. Kolonna bo‘ylab massa almashinish zonasi kirish qismidan chiqish tomon siljib boradi va vaqt o‘tishi bilan chiqish oqimidagi ifloslantiruvchi modda konsentratsiyasi ortadi. Yorib o‘tish egri chizig‘i qatlam balandligi, sorbent granulari o‘lchami, oqim tezligi, boshlang‘ich konsentratsiya va sorbentning g‘ovak tuzilishiga bog‘liq. Qatlam balandligining ortishi kolonnaning xizmat muddatini uzaytirsa, oqim tezligining oshishi massa almashinish vaqtini qisqartirib, adsorbsiya samaradorligini pasaytiradi.

Kolonna jarayonini tavsiflashda Thomas, Yoon–Nelson va Bohart–Adams modellari keng qo‘llaniladi. Thomas modeli sorbent sig‘imi va kinetik konstantalarni aniqlashga, Yoon–Nelson modeli 50 % yorib o‘tish vaqtini baholashga, Bohart–Adams modeli esa jarayonning boshlang‘ich bosqichini tavsiflashga xizmat qiladi. Ushbu modellarni kompleks qo‘llash kolonna ishlash parametrlarini yanada ishonchli aniqlash imkonini beradi.

Muhokama. Kolonnaning gidravlik tavsifi Ergun tenglamasi asosida bosim yo‘qotilishini hisoblash orqali baholanadi [23]. Mayda granular massa almashinishni jadallashtirgan bo‘lsa-da, gidravlik qarshilikni oshiradi. Aksincha, yirik granular bosim yo‘qotilishini kamaytiradi, biroq diffuziya jarayonini sekinlashtiradi. Shu sababli amaliyotda 1–3 mm granular o‘lchami optimal variant sifatida qabul qilinadi. Kolonnani loyihalashda qatlamning bo‘shliqliligi, granularlarning sferiklik koeffitsienti hamda oqimning qovushoqligi kabi omillar ham hisobga olinadi.



5-rasm. Adsorber kolonnasining yorib o‘tish egri chizig‘i.

Yorib o'tish egri chizig'i kolonna qatlamida ishchi va to'yingan zonalarning shakllanishini tavsiflaydi hamda ($t_{0.1}$), ($t_{0.5}$) va ($t_{0.9}$) kabi asosiy vaqt parametrlarini aniqlash imkonini beradi. Ushbu ko'rsatkichlar kolonna balandligini, regeneratsiya davriyligini va qurilmaning optimal ish rejimini belgilashda muhim ahamiyatga ega.

5-jadval

Adsorbsiya kolonnasi modeli uchun qabul qilingan parametrlar

Ko'rsatkich	Qiymat	Izoh
Qatlam balandligi	0.50 m	Pilot adsorber uchun
Granula diametri	1.5-2.0 mm	Gidravlik va massoalmashinish muvozanati
Yorib o'tish vaqti	75 min	C/C0 ≈ 0.1 holati
50% to'yinish vaqti (τ)	92 min	Yoon-Nelson bo'yicha
To'liq to'yinish	110-120 min	Sarf va yuklamaga bog'liq

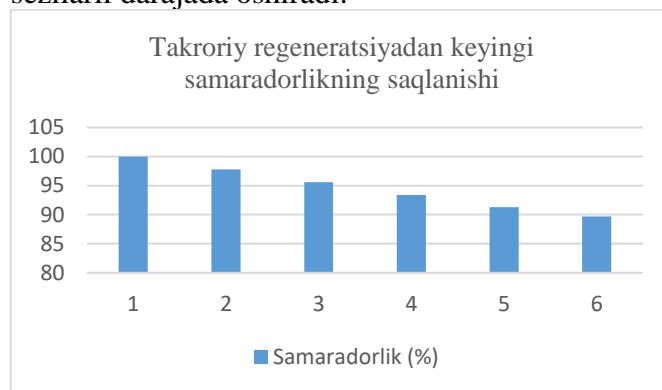
Jadvalda adsorbsiya kolonnasining ishlashini tavsiflovchi asosiy yorib o'tish parametrlari umumlashtirilgan. Ushbu ko'rsatkichlar adsorberning ishchi hajmi, sorbent sarfi, regeneratsiya davriyligi hamda texnologik qurilmaning optimal ish rejimini hisoblash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

Sorbentni regeneratsiya qilish va xizmat muddati. Sorbentning amaliy samaradorligi uning regeneratsiyadan keyingi adsorbsion xossalarni saqlab qolish qobiliyati bilan belgilanadi. Neft mahsulotlari bilan to'yingan kompozit sorbentni erituvchi yordamida ekstraksiyalash, termik desorbsiya yoki ushbu usullarni kombinatsiyalash orqali qayta tiklash mumkin. Erituvchili regeneratsiya sorbent tuzilishini yaxshi saqlaydi, termik regeneratsiya esa yuqori desorbsiya darajasini ta'minlashda, ko'proq energiya talab qiladi va sirt funksional guruhlarining o'zgarishiga olib kelishi mumkin.

Ko'p martalik regeneratsiya jarayonida sorbentning samaradorligi mexanik yemirilish, mayda fraksiyalarning hosil bo'lishi, g'ovaklarning og'ir uglevodorodlar bilan qisman berkilishi hamda sirtning fizik-kimyoviy xossalari o'zgarishi hisobiga pasayadi. Amaliyotda 5-6 regeneratsiya siklidan keyin adsorbsiya samaradorligi 85-90% dan yuqori saqlansa, bunday sorbent sanoatda qo'llash uchun istiqbolli deb baholanadi.

Regeneratsiya jarayonida ajratib olingan neft fraksiyalarini qayta ishlatish texnologiyaning iqtisodiy samaradorligini oshiradi. Ular energiya manbai yoki texnologik yoqilg'i sifatida

foydalanilishi mumkin. Shu sababli regeneratsiya sorbent sarfini kamaytirish bilan birga qo'shimcha foydali mahsulot olish imkonini yaratib, jarayonning ekologik va iqtisodiy samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.



6-rasm. Regeneratsiya sikllari ortishi bilan samaradorlikning saqlanishi.

Grafik natijalari sorbentning bir necha regeneratsiya sikllaridan keyin ham yuqori adsorbsiya samaradorligini saqlab qolishini ko'rsatadi. Biroq takroriy regeneratsiya jarayonida g'ovaklarning qisman berkilishi, sirt funksional guruhlarining o'zgarishi hamda mexanik yemirilish natijasida adsorbsiya samaradorligi bosqichma-bosqich kamayadi. Olingan natijalar sorbentning optimal xizmat muddati va regeneratsiya sikllari sonini aniqlashda muhim amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

6-jadval

Regeneratsiya sikllariga bog'liq holda samaradorlikning o'zgarishi

Sikl	Nisbiy samaradorlik, %	Massa yo'qotilishi, %	Amaliy baho
1	100	0	Boshlang'ich holat
2	97.8	0.8	Barqaror
3	95.6	1.6	Qoniqarli
4	93.4	2.5	Yaxshi
5	91.3	3.4	Ruxsat etiladi
6	89.7	4.5	Qisman yangilash tavsiya etiladi

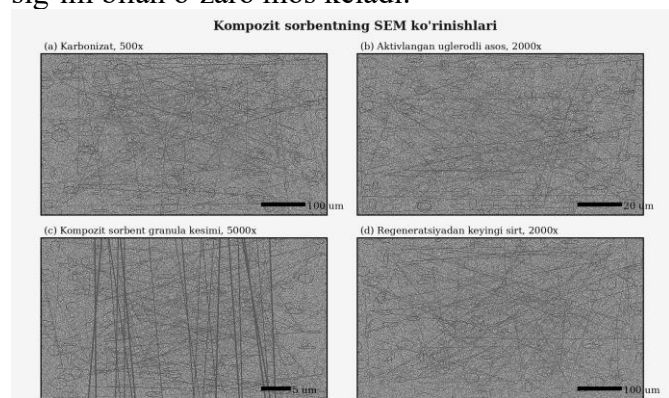
Jadval natijalari kompozit sorbentning bir necha regeneratsiya sikllaridan keyin ham yuqori adsorbsiya samaradorligini saqlab qolishini ko'rsatadi. Samaradorlikning bosqichma-bosqich pasayishi regeneratsiya jarayonida sorbent tuzilishida yuz beradigan o'zgarishlarni baholash hamda optimal regeneratsiya usuli va xizmat muddatini aniqlash imkonini beradi.

Kompozit sorbentning instrumental tahlili.

Kompozit sorbentning ekspluatatsion xususiyatlarini to'liq baholash uchun adsorbsion ko'rsatkichlar bilan bir qatorda uning morfologiyasi, fazaviy tarkibi, g'ovak tuzilishi va termik barqarorligi ham o'rganildi. Shu maqsadda sorbent SEM, XRD, BET-BJH hamda TG-DTG usullari yordamida kompleks tahlil qilindi.

SEM mikrotuzilma tahlili. SEM tasvirlari kompozit sorbentning rivojlangan mikro- va mezog'ovaklardan iborat notekis g'ovak tuzilishga ega ekanligini ko'rsatdi. Karbonizatsiyadan so'ng hosil bo'lgan ochiq g'ovaklar va notekis yuzalar adsorbsiya uchun qulay sharoit yaratgan bo'lsa, aktivatsiyadan keyin g'ovaklar yanada ravshan shakllangan. Bentonit qo'shilishi natijasida plastinkasimon mineral zarrachalar uglerod karkasi bo'ylab bir tekis taqsimlanib, granulalarning mexanik mustahkamligini oshirgan.

Granula kesimining SEM tasvirlari modifikatorning sorbent hajmi bo'ylab nisbatan bir xil taqsimlanganini ko'rsatadi. Takroriy regeneratsiyadan so'ng ayrim g'ovaklarning qisman berkilishi kuzatilgan bo'lsa-da, umumiy g'ovak-kannali tuzilmaning saqlanib qolishi sorbentning ko'p martalik foydalanish uchun yaroqliligini tasdiqlaydi. Morfologik tahlil natijalari batch va kolonna tajribalarida aniqlangan yuqori adsorbsion sig'im bilan o'zaro mos keladi.



7-rasm. Kompozit sorbentning SEM ko'rinishlari:
(a) karbonizat; (b) aktivlangan asos; (c) granula kesimi; (d) regeneratsiyadan keyingi sirt.

SEM tasvirlari piroliz va aktivatsiya jarayonlari natijasida sorbentning g'ovakli tuzilmasi shakllanganini hamda g'ovaklarning bir tekis rivojlanganligini tasdiqlaydi. Regeneratsiyadan keyingi morfologik tahlil esa sorbentning

strukturaviy barqarorligi, g'ovak tuzilishining saqlanish darajasi va uning takroriy qo'llash imkoniyatlarini baholashga xizmat qiladi.

7-jadval

SEM bilan bog'langan strukturaviy va fizik ko'rsatkichlar

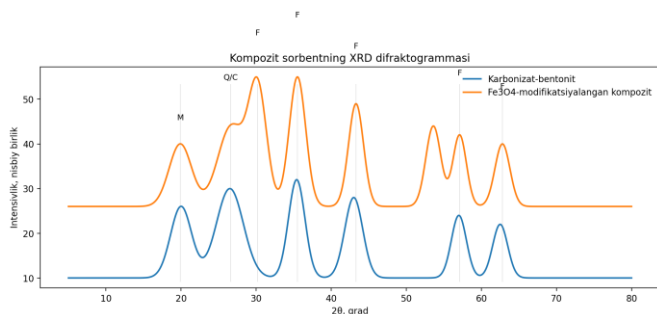
Namuna	Siqilish must., N/granula	Kul miqdori, %	Zeta-pot., mV	SEM bo'yicha asosiy belgi
K-0	18.4	36.5	-12.6	Notekis siniq yuzalar, yopiq g'ovaklar ko'p
KA-1	11.2	28.7	-18.1	Ochilgan g'ovaklar va kuchli qo'pollik
KS-1	24.6	31.4	-16.8	Uglerod skeleti + bentonit plitalari + ochiq kanallar
KS-1 (5-sikl)	22.9	31.9	-15.4	Qisman berkilgan, ammo saqlangan g'ovak tarmog'i

SEM tasvirlari asosida olingan miqdoriy ko'rsatkichlar sorbentning morfologik xususiyatlarini batafsil baholash imkonini beradi. Zarrachalar o'lchami, g'ovaklilik darajasi va g'ovaklarning ochiqligi adsorbsiya jarayonining samaradorligini belgilovchi asosiy omillar sifatida namoyon bo'ladi hamda neft mahsulotlarining sorbent yuzasida ushlanish mexanizmini izohlashga xizmat qiladi.

XRD difraktogrammasi va fazaviy tarkib.

XRD tahlili natijalari kompozit sorbent tarkibida bentonitga xos montmorillonit fazasi, kvartsning aniq reflekslari hamda Fe₃O₄ modifikatoriga tegishli difraksion cho'qqilar mavjudligini ko'rsatadi. Shuningdek, 20–28° oralig'ida kuzatilgan keng difraksion maksimum karbonizatsiya jarayonida hosil bo'lgan amorf uglerod fazasining mavjudligini tasdiqlaydi. Bu esa kompozitning mexanik mustahkamligi asosan mineral komponentlar, adsorbsion faolligi esa amorf uglerod va sirt funksional guruhlari hisobiga shakllanganligini ko'rsatadi.

Difraktogrammadagi 35,5°, 43,3°, 57,1° va 62,8° burchaklarda qayd etilgan reflekslar magnetit (Fe₃O₄) fazasining saqlanib qolganini tasdiqlaydi. Mazkur fazaning mavjudligi sorbentni regeneratsiya qilish va magnit usulda ajratish jarayonlarini soddalashtiradi. Shu bilan birga, difraktogrammada yangi begona kristall fazalarning aniqlanmaganligi kompozitlash jarayoni asosan sirtaro o'zaro ta'sir va mexanik-funksional integratsiya orqali amalga oshganligini ko'rsatadi.



8-rasm. Karbonizat-bentonit va Fe₃O₄-modifikatsiyalangan kompozit sorbentning XRD diffraktogrammalari.

Rentgen diffraktogrammalari bentonitning qatlamli silikat fazalari, uglerodli komponent hamda Fe₃O₄ modifikatsiyasiga xos kristall fazalarni aniqlash imkonini beradi. Difraksion reflekslarning intensivligi va shaklidagi o'zgarishlar kompozit sorbentning mineral-uglerodli tuzilmasi muvaffaqiyatli shakllanganini hamda modifikatsiya jarayonining samarali kechganini tasdiqlaydi.

8-jadval

XRD cho'qqilarining identifikatsiyasi

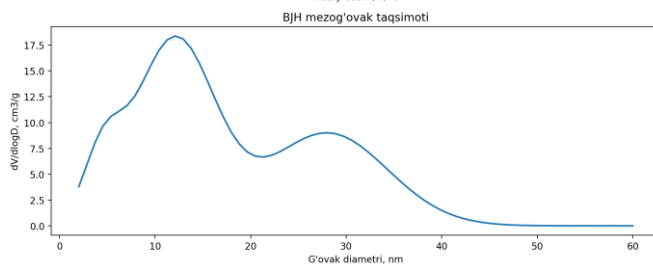
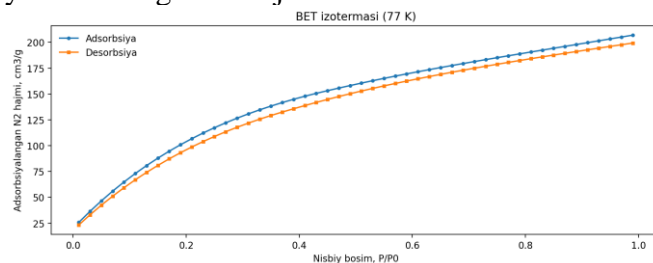
№	2θ, grad	Faza	Tavsif
1	19.8-20.2	Montmorillonit	Bentonit skeletining qatlamli tuzilmasi
2	26.5-26.8	Kvarts / amorf C	Mineral plomba va uglerod halosi ustma-ust kelishi
3	30.1-30.4	Fe ₃ O ₄	Magnetitning asosiy refleksi
4	35.3-35.7	Fe ₃ O ₄	Modifikatorning eng ifodali cho'qqisi
5	43.1-43.5	Fe ₃ O ₄	Magnit fazaning saqlanganligi
6	57.0-57.3	Fe ₃ O ₄	Kristall faza barqarorligi
7	62.6-63.0	Fe ₃ O ₄	Yuqori burchakdagi refleksi

Difraksion cho'qqilar tahlili kompozit sorbent tarkibidagi mineral fazalar va modifikator komponentlarning muvaffaqiyatli shakllanganini tasdiqlaydi. Ushbu natijalar sorbentning strukturaviy barqarorligi hamda sirtning fizik-kimyoviy xossalarni izohlashda muhim ahamiyatga ega.

BET-BJH tahlili va g'ovak tuzilishi. BET tahlili natijalari aktivatsiyadan so'ng sorbentning xususiy sirt maydoni sezilarli darajada ortganini ko'rsatdi. Kompozitlash jarayonida sirtning bir qismi bentonit va modifikator bilan qoplangan bo'lsa-da, mezog'ovaklar tizimi yanada rivojlanganligi aniqlandi. Adsorbsiya-desorbsiya izotermalarida kuzatilgan gisterezis halqasi kapillyar kondensatsiya jarayonining mavjudligini

hamda mezog'ovaklarning emulsiyalangan neft tomchilarini adsorbsiyalashdagi muhim rolini tasdiqlaydi.

BJH tahliliga ko'ra, g'ovak diametrining asosiy qismi 8–20 nm oralig'ida joylashgan bo'lib, bu kompozit sorbentning neft emulsiyalarini samarali ushlab turish uchun qulay mezog'ovak tuzilishga ega ekanligini ko'rsatadi. Mazkur g'ovak arxitekturasi massa almashinishni jadallashtiradi, diffuziya cheklanishlarini kamaytiradi va dinamik kolonnalarda yorib o'tish vaqtini uzaytiradi. Shu sababli tanlangan kompozit tarkib yuqori xususiy sirt maydoni, optimal g'ovak o'lchami va past suv yutuvchanligi bilan ajralib turadi.



9-rasm. KS-1 kompozit sorbent uchun BET izotermasi va BJH mezog'ovak taqsimoti.

9-jadval

BET-BJH va funksional ekspluatatsion ko'rsatkichlar

Namuna	S _{BET} , m ² /g	V _p , sm ³ /g	D _p , nm	Suv yutilishi, g/g	Neft sig'imi, g/g
Karbonizat (K-0)	82	0.08	3.7	1.42	3.6
Aktivlangan asos (KA-1)	236	0.29	4.9	1.18	5.8
Kompozit sorbent KS-1	198	0.24	8.7	0.76	6.4
KS-1 regeneratsiyadan keyin	184	0.22	8.4	0.81	6.0

BET izotermasi sorbentning rivojlangan mezog'ovak tuzilishga ega ekanligini, BJH tahlili esa massa almashinish uchun qulay g'ovak o'lchamlarining ustunligini ko'rsatadi. Bunday g'ovak arxitekturasi emulsiyalangan neft tomchilarining samarali adsorbsiyalanishini ta'minlab, diffuziya qarshiligini kamaytiradi va

adsorbtsiya jarayonining umumiy samaradorligini oshiradi.

Jadval natijalari sorbentning teksturaviy xossalari bilan adsorbtsiya samaradorligi o'rtasidagi bog'liqlikni yaqqol namoyon etadi. Mezog'ovaklar ulushining ortishi massa almashinishni jadallastirib, dinamik rejimdagi transport jarayonlarini yaxshilaydi, yuqori xususiy sirt maydoni esa adsorbtsion sig'imning ortishiga xizmat qiladi. Shu sababli ushbu parametrlar sorbentning amaliy samaradorligini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari adsorbtsiya jarayonining samaradorligi asosan eritma pH muhiti, kontakt vaqti, sorbent dozasi va adsorbantning boshlang'ich konsentratsiyasiga bog'liqligini ko'rsatdi. Ushbu omillar sorbent yuzasining fizik-kimyoviy holati, massa almashinish jarayoni va muvozanat sharoitiga bevosita ta'sir etadi. Optimal pH qiymatini tanlash adsorbtsiya samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etadi, kontakt vaqti esa jarayonning muvozanat holatiga erishish tezligini belgilaydi. Sorbent miqdorining ortishi umumiy tozalash

darajasini yaxshilaydi, biroq birlik massa hisobiga adsorbtsion sig'imning kamayishi iqtisodiy jihatdan optimal dozani tanlash zarurligini ko'rsatadi. Boshlang'ich konsentratsiya ortishi adsorbtsion sig'imni oshirsa-da, yuqori konsentratsiyalarda ko'p bosqichli yoki oldindan tozalash texnologiyalarini qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Adsorbtsiya mexanizmini baholashda Langmuir va Freundlich izotermalari hamda psevdobirinch, psevdodikkinchi tartibli va ichki diffuziya kinetik modellaridan kompleks foydalanish tavsiya etiladi. Model tanlashda statistik moslik ko'rsatkichlari bilan bir qatorda ularning fizik-kimyoviy mazmunini ham hisobga olish zarur.

Taklif etilgan metodik yondashuv mahalliy xomashyolar asosida olingan bentonit, diatomit, kaolin, neft shلامي karbonizati va turli kompozit sorbentlarning oqova suvlarni adsorbtsion tozalashdagi samaradorligini baholash hamda optimal texnologik parametrlarni aniqlashda qo'llanishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Haan, T. Y., Chong, W. C., & Chai, P. V. (2023). A review on adsorption process for the treatment of oily wastewater. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(1).
- [2] Sarran, M. A., AbdulRazak, A. A., Abid, M. F., & Jawad, A. D. (2024). Oily wastewater treatment using low-cost and highly efficient natural and activated Iraqi bentonite. *Desalination and Water Treatment*, 319, Article 100412.
- [3] Tanko, D. B., et al. (2026). Review of adsorption isotherms models. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0>
- [4] Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, Article 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- [5] Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, Article 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
- [6] Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kannuchamy, V. K. (2023). A review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time. *ACS Omega*, 8, 17407–17430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01177>
- [7] Sarran, M. A., AbdulRazak, A. A., Abid, M. F., & Jawad, A. D. (2024). Oily wastewater treatment by using Fe₃O₄/bentonite in fixed-bed adsorption column. *ChemEngineering*, 8(5), Article 92. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8050092>
- [8] De Gisi, S., Lofrano, G., Grassi, M., & Notarnicola, M. (2016). Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 10–40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>

- [9] Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- [10] Long, J., et al. (2024). Preparation of oily sludge-derived activated carbon and its adsorption properties. *Molecules*, 29, Article 769. <https://doi.org/10.3390/molecules29030769>
- [11] Amari, A., et al. (2023). Investigation of the viable role of oil sludge-derived activated carbon for oily wastewater remediation. *Frontiers in Environmental Science*, 11, Article 1138308. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1138308>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Turdiyev, J. Q., Kuyboqarov, O. E., & Panjiyev, U. R. (2026). Adsorbsiya jarayoniga pH, kontakt vaqti, sorbent miqdori va boshlang'ich konsentratsiya ta'sirini o'rganish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(2). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.2.2026.24>
