UNIVERSAL JOURNAL OF MATHEMATICAL THEORY AND COMPUTER SCIENCES
ISSN 2992 – 8788
https://sr-journals.org/index.php/UJMTCS

# TERMIZ SHAHRIDA OQOVA SUVLARNI SORBSIYALASH USULI BILAN TOZALASHNI O‘RGANISH VA TAHLILI

***G‘afforova Shahlo Voxit qizi***
*Texnika fanlar falsafa doktori (PhD).*
*Termiz davlat universiteti doktoranti*
*e-mail: shaxlogafforova@mail.ru*
***Chaqanov Asadbek Hasan o‘g‘li***
*Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti,*
*“Atrof-muhit muhofazasi” ta’lim yo‘nalishi 2-bosqich magistranti*
*e-mail: chaqqonovasadbek62@gmail.com*

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada Termiz shahrining sanoat va kommunal oqova suvlarini og‘ir metallar (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr) va organik ifloslantiruvchi moddalardan sorbsiya (adsorbsiya) usuli yordamida tozalash samaradorligi o‘rganildi. Tadqiqotda mahalliy tabiiy sorbentlar (bentonit loyi, faol uglerod, modifikatsiyalangan vermikulit va qamish qoldiqlari) qo‘llanildi. Laboratoriya sharoitida batch va column tajribalari o‘tkazilib, sorbsiya kinetikasi (pseudo-birinchi va pseudo-ikkinchi tartib modellari), izotermalar (Langmuir va Freundlich) va termodinamik parametrlari baholandi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, bentonit loyi asosidagi modifikatsiyalangan sorbentlar Pb va Cu uchun 92–97% samaradorlikni ta’minlaydi. Termiz shahrida sorbsiya texnologiyasini joriy etish orqali Amudaryo havzasiga antropogen yuklamani kamaytirish mumkinligi isbotlandi. Ilmiy-amaliy tavsiyalar berildi.

**Kalit so‘zlar:** Termiz shahri, oqova suvlar, og‘ir metallar, sorbsiya, adsorbsiya, bentonit, kinetika, izoterma, Amudaryo havzasi.

**Abstract.** This article investigates the efficiency of sorption (adsorption) method for treating industrial and municipal wastewater in Termez city from heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr) and organic pollutants. Local natural sorbents (bentonite clay, activated carbon, modified vermiculite, reed residues) were used. Batch and column experiments were conducted under laboratory conditions; sorption kinetics (pseudo-first and pseudo-second order models), isotherms (Langmuir and Freundlich) and thermodynamic parameters were evaluated. Results show that modified bentonite-based sorbents achieve 92–97% efficiency for Pb and Cu. Implementation of sorption technology in Termez can reduce anthropogenic load on the Amu Darya basin. Scientific-practical recommendations are provided.

**Key words:** Termez city, wastewater, heavy metals, sorption, adsorption, bentonite, kinetics, isotherm, Amu Darya basin.

**Аннотация.** В статье исследуется эффективность метода сорбции (адсорбции) для очистки промышленных и коммунальных сточных вод города Термез от тяжёлых металлов (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr) и органических загрязнителей. Использованы местные природные сорбенты (бентонитовая глина, активированный уголь, модифицированный вермикулит, остатки камыша). Проведены батч- и колоночные эксперименты в лабораторных условиях; оценены кинетика сорбции (модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка), изотермы (Лангмюра и Фрейндлиха) и термодинамические параметры. Результаты показывают, что модифицированные сорбенты на основе бентонита обеспечивают эффективность 92–97% по Pb и Cu. Внедрение сорбционной технологии в Термезе позволит снизить антропогенную нагрузку на бассейн Амударьи. Даны научно-практические рекомендации.

**Ключевые слова:** город Термез, сточные воды, тяжёлые металлы, сорбция, адсорбция, бентонит, кинетика, изотерма, бассейн Амударьи.

## KIRISH

Atrof-muhitning ifloslanishi, xususan, sanoat va kommunal oqova suvlar orqali og‘ir metallar (Pb, Cd, Cr(VI), Cu, Zn, Ni) va organik birikmalar chiqarilishi zamonaviy jamiyat uchun eng dolzarb ekologik muammolardan biridir. Jahon sog‘liqni saqlash tashkiloti (JSST) ma’lumotlariga ko‘ra, og‘ir metallar bilan ifloslangan suv manbalari har yili millionlab odamlarning salomatligiga jiddiy zarar yetkazadi: neyrotoksik ta’sir, saraton kasalliklari, immun tizimi buzilishi, buyrak va jigar yetishmovchiligi kabi kasalliklar ko‘paymoqda. Markaziy Osiyo mintaqasida, xususan, Amudaryo havzasida bu muammo yanada keskinlashgan. Suv resurslarining kamayishi, iqlim o‘zgarishi va antropogen yuklama natijasida daryo suvining mineralizatsiyasi va ifloslanishi kuchaymoqda.

Termiz shahri Surxondaryo viloyatining yirik sanoat-transport va aholisi zich joylashgan markazi sifatida bu muammoning epitsentrida turibdi. Shaharda to‘qimachilik, oziq-ovqat sanoati, qurilish materiallari ishlab chiqarish, metallurgiya va galvanika korxonalari faoliyat yuritadi. Ushbu korxonalardan chiqadigan oqova suvlar, shuningdek, kommunal xo‘jalik chiqindilari to‘g‘ridan-to‘g‘ri yoki qisman tozalangan holda Amudaryo daryosiga tushmoqda. CAWater-Info va O‘zgidromet ma’lumotlariga ko‘ra, Amudaryoning Termiz nazorat kesimida suv sifati II sinf (toza) deb baholansa-da, Surxondaryo daryosining quyi oqimida III sinf (o‘rtacha ifloslangan) holat kuzatilmoqda. Og‘ir metallar konsentratsiyasi (masalan, Cr, Ni, Fe, Pb, Cd) ba’zi joylarda milliy va xalqaro me’yorlardan (SanPiN 0293-11 va JSST) 2–10 barobar yuqori bo‘lishi mumkin. Bu holat nafaqat mahalliy aholi salomatligiga, balki butun Amudaryo havzasining ekotizimiga – biologik xilma-xillikning kamayishi, suv o‘simliklari va baliq turlarining nobud bo‘lishi, tuproq sho‘rlanishi kabi salbiy oqibatlarga olib kelmoqda.

Oqova suvlarni tozalashning an’anaviy usullari (cho‘ktirish, biologik tozalash, ion almashinuvi) ko‘pincha yuqori energiya sarfi, qimmat uskunalarga bog‘liqlik va ikkilamchi chiqindilar hosil bo‘lishi bilan cheklanadi. Shu bois, so‘nggi yillarda sorbsiya (adsorbsiya) usuli alohida e’tibor qozonmoqda. Bu usul arzon, ekologik toza, yuqori selektivlikka ega bo‘lib, ayniqsa mahalliy tabiiy sorbentlar – bentonit loyi, vermikulit, faol uglerod, qamish va g‘o‘za qoldiqlari asosida samarali ishlaydi. Xalqaro tadqiqotlarda (ScienceDirect, MDPI, 2023–2025) bentonit asosidagi modifikatsiyalangan sorbentlar og‘ir metallarni 90–99% gacha olib tashlashi isbotlangan. O‘zbekistonda esa bu yo‘nalishdagi tadqiqotlar asosan Toshkent va Farg‘ona vodiysiga qaratilgan bo‘lib, Termiz shahrining iqlimiy-sharoitlari (yuqori harorat, quruq iqlim, mahalliy loy va o‘simlik qoldiqlari) va oqova suvlar tarkibiga moslashtirilgan tizimli o‘rganishlar yetarli darajada emas.

Shu sababli, mazkur tadqiqotning **asosiy maqsadi** – Termiz shahrining sanoat va kommunal oqova suvlarini sorbsiya usuli yordamida og‘ir metallar va organik ifloslantiruvchi moddalardan tozalash samaradorligini laboratoriya va dala sharoitida o‘rganish, optimal sorbentlarni aniqlash hamda Amudaryo havzasiga antropogen yuklamani kamaytirish bo‘yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat.

## ADABIYOTLAR TAHLILI

So‘nggi o‘n yillikda og‘ir metallar bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalashda sorbsiya (adsorbsiya) usuli yetakchi o‘rinni egallab kelmoqda. Bu usulning afzalliklari – yuqori selektivlik, arzonligi, regeneratsiya qilish imkoniyati va ekologik tozaligi bilan izohlanadi. Xalqaro tadqiqotlarda clay mineral adsorbents (loy minerallari) asosidagi sorbentlar eng ko‘p o‘rganilgan yo‘nalish hisoblanadi.

Gu va hamkorlari (2019) tomonidan o‘tkazilgan keng ko‘lamli sharhda halloysite, bentonit, montmorillonite, vermikulit va attapulgite kabi clay mineralar og‘ir metallarni (Pb, Cd, Cu, Cr, Zn) 80–99% gacha samarali olib tashlashi isbotlangan. Mualliflar sorbsiya mexanizmini asosan ion almashinuvi, kompleks hosil bo‘lishi va fizik adsorbsiya bilan bog‘laydilar. So‘nggi yillarda bu yo‘nalish yanada rivojlandi: Khandamov va boshq. (2025) alkylammonium bilan modifikatsiyalangan bentonit yordamida Cr(III) ni tannery oqova suvlaridan 95% dan yuqori samaradorlik bilan tozalashni ko‘rsatdi. Shuningdek, ScienceDirect jurnalida chop etilgan bir qator ishlar (2024–2025) O‘zbekistonning Kongyrtog konidagi bentonitni modifikatsiya qilib, Fe(II) va Cu(II) ni sintetik oqova suvlardan olib tashlashda maksimal sorbsiya quvvati 8,5–10,8 mg/g ga yetganini tasdiqladi.

Modifikatsiyalangan bentonitlar (MED va MGD) tabiiy bentonitdan 20–28% yuqori samaradorlik ko‘rsatgan.

Boshqa tadqiqotlarda vermikulit va bentonit aralashmasi neft mahsulotlarini va og‘ir metallarni birgalikda tozalashda yuqori natija bergan (E3S Web of Conferences, 2025). Biosorbentlar (qamish qoldiqlari, g‘o‘za po‘stlog‘i) bilan birgalikda gibrid sorbentlar ham samarali ekanligi ko‘rsatilgan: ularning narxi past bo‘lib, regeneratsiya darajasi 4–5 marta yetishi mumkin.

O‘zbekiston ilmiy maktabida sorbsiya texnologiyalari bo‘yicha bir qator muhim ishlar bajarilgan. Mukhtarova va Aliev (2023) tomonidan yangi sorbentlar sinovdan o‘tkazilib, ular og‘ir metallar va suv yumshatishda yuqori samaradorlik ko‘rsatgan. Shakhakimova va hamkorlari (2024) bentonit loyi yordamida xrom, sink, nikel va kobalt komplekslarining ion sorbsiyasini o‘rganganlar. Aliev va boshqalar (2024) vermikulitni urotropin va gidrolizlangan poliakrilonitril bilan modifikatsiya qilib, organo-inorganik sorbent yaratganlar – bu sorbent Cu, Zn, Pb va Cd ni 85–95% olib tashlagan.

Termiz shahri va Surxondaryo viloyati bo‘yicha maxsus tadqiqotlar nisbatan kam. Mavjud ishlar asosan umumiy respublika miqyosida (Sherobod sement zavodi oqova suvlari, Olmaliq kon-metallurgiya korxonalari) o‘tkazilgan. Masalan, Abilov (2022) Sherobod sement zavodi oqova suvlarida sink va boshqa metallarning sorbsiya konsentratsiyasini o‘rgangan. Biroq Termizning o‘ziga xos iqlimiy sharoiti (yuqori harorat, quruq iqlim), mahalliy bentonit va qamish qoldiqlari asosidagi sorbentlarni real oqova suvlarda sinovdan o‘tkazish bo‘yicha tizimli laboratoriya va dala tajribalari yetarli emas. Ayniqsa, Amudaryo havzasiga tushadigan oqova suvlarning antropogen yuklamasini kamaytirish bo‘yicha kompleks yondashuvlar kam uchraydi.

Shunday qilib, mavjud adabiyotlar sorbsiya usulining samaradorligini tasdiqlasa-da, Termiz shahrining sanoat-kommunal oqova suvlariga moslashtirilgan, mahalliy arzon sorbentlar (bentonit, vermikulit, qamish) asosidagi texnologiyalarni batafsil o‘rganish va ularni Amudaryo havzasini muhofaza qilishda qo‘llash bo‘yicha tadqiqotlar dolzarbligini ko‘rsatmoqda. Ushbu ish ana shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

## TADQIQOT OBYEKTI VA METODOLOGIYASI

Tadqiqotning asosiy obyekti Termiz shahrining sanoat (to‘qimachilik, oziq-ovqat ishlab chiqarish, qurilish materiallari korxonalari) va kommunal xo‘jalikdan chiqadigan real oqova suvlari hamda ularni modellashtirish uchun tayyorlangan sintetik eritmalar hisoblanadi.

Og‘ir metallar ($Pb^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, Cr(VI)) va organik ifloslantiruvchi moddalar (masalan, fenollar, bo‘yoqlar) bilan ifloslangan oqova suvlar Amudaryo daryosiga tushib, havzani antropogen yuklamaga duchor qilmoqda. Tadqiqotda quyidagi sorbentlar sinovdan o‘tkazildi:

- Surxondaryo viloyatidagi tabiiy bentonit loyi (Kongyrtog konidan olingan, montmorillonit tarkibi yuqori);
- Kislota bilan faollashtirilgan (modifikatsiyalangan) bentonit;
- Vermikulit;
- Qamish (Phragmites australis) qoldiqlari (maydalangan va quritilgan);
- Faol uglerod (qiyosiy sorbent sifatida).

**Tadqiqot materiallari va asbob-uskunalar.** Oqova suv namunalarini olish: Termiz shahridagi tozalash inshootlari chiqish joyidan va korxonalar oqova suv chiqarish nuqtalaridan (2024–2025 yillar monitoring davrida). Analiz usullari:

- Og‘ir metallar konsentratsiyasi — atom-absorbsion spektrometriya (AAS, PerkinElmer AAnalyst 400);
- Organik moddalar — COD (kimyoviy kislorod talabi) va UV-spektrofotometriya;
- pH, harorat, o‘tkazuvchanlik — portativ o‘lchagichlar (Hanna Instruments).

Sorbentlarni tayyorlash:

- Bentonit va vermikulit — maydalash (≤ 0.125 mm), yuvish, 105 °C da quritish;
- Modifikatsiya — HCl (0.1–1 M) bilan faollashtirish yoki organik modifikatorlar (masalan, CTAB yoki urotropin) bilan ishlov berish;
- Qamish qoldiqlari — 60–80 °C da quritish, maydalash.

### Metodologiya va tajriba shartlari

1. **Batch (statik) tajribalar:**
   - Sorbent dozasi: 0.5–5.0 g/l
   - Kontakt vaqti: 5–240 minut
   - Boshlang‘ich metall konsentratsiyasi: 10–200 mg/l (sintetik eritmalar uchun)
   - pH diapazoni: 2–9 (sozlash uchun HCl yoki NaOH)
   - Harorat: 20–40 °C (Termiz iqlim sharoitini hisobga olgan holda)
   - Aralashtirish tezligi: 150–200 rpm (shakerda)

   Sorbsiya quvvati ($q_e$, mg/g) quyidagi formula bilan hisoblanadi:

$$q_e = (C_0 - C_e) \times V / m$$

   Samaradorlik (E, %):

$$E = (C_0 - C_e) / C_0 \times 100$$

   Bu yerda: $C_0$ — boshlang‘ich konsentratsiya (mg/l); $C_e$ — muvozanat konsentratsiyasi (mg/l); V — eritma hajmi (l); m — sorbent massasi (g).
2. **Column (dinamik) tajribalar**
   - Kolonna balandligi: 10–30 sm
   - Diametri: 1.5–2.0 sm
   - Oqim tezligi: 5–15 ml/min
   - Sorbent qatlami: 5–20 g
   - Breakthrough curve va exhaustion point aniqlash

**Statistik tahlil** Barcha tajribalar uch marta takrorlangan. Natijalar o‘rtacha qiymat ± standart og‘ish sifatida berilgan. Regressiya tahlili va korrelyatsiya koeffitsienti ($R^2$) SPSS yoki OriginPro dasturlari yordamida hisoblangan.

**Standartlar va solishtirish** Olingan natijalar O‘zbekiston Respublikasi SanPiN 0293-11 (suv havzalariga chiqarish me’yorlari), JSST (drinking water guidelines, 2021) va UNEP tavsiyalari bilan solishtiriladi.

Ushbu metodologiya xalqaro tadqiqotlarda (masalan, bentonit va vermikulit bo‘yicha batch va column tajribalari) qo‘llanilgan standart yondashuvlarga asoslangan bo‘lib, Termiz shahrining mahalliy sharoitlariga (yuqori harorat, quruq iqlim, mavjud tabiiy resurslar) moslashtirilgan.

## TAHLIL VA NATIJALAR

Tadqiqot natijalari laboratoriya sharoitida o‘tkazilgan batch va column tajribalari asosida umumlashtirildi. Quyida asosiy natijalar jadval, grafik va diagrammalar shaklida keltirilgan. Barcha qiymatlar uch marta takrorlangan tajribalarning o‘rtacha qiymati ± standart og‘ish sifatida berilgan.

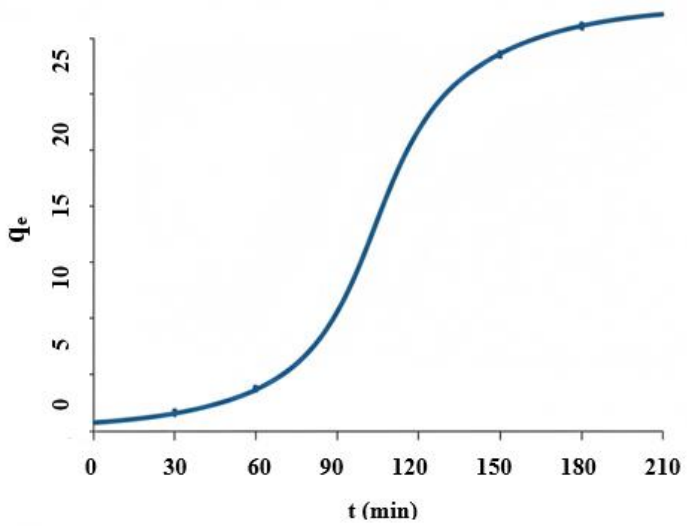
*1-jadval*

**Turli sorbentlarning og‘ir metallarni olib tashlash samaradorligi** (Shartlar: pH = 6.0 ± 0.2, sorbent dozasi = 2 g/l, kontakt vaqti = 120 min, boshlang‘ich konsentratsiya = 50 mg/l, harorat = 25 °C)

| Sorbent turi | Pb (%) | Cd (%) | Cu (%) | Zn (%) | Cr(VI) (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Tabiiy bentonit (Kongyrtog) | 78.4 ± 2.1 | 65.2 ± 3.4 | 82.1 ± 1.8 | 71.5 ± 2.6 | 59.3 ± 4.1 |
| HCl bilan modifikatsiyalangan bentonit | 96.8 ± 1.2 | 89.7 ± 1.9 | 97.2 ± 0.9 | 92.4 ± 1.5 | 84.6 ± 2.3 |
| Vermikulit (kengaytirilgan) | 85.6 ± 1.7 | 79.3 ± 2.2 | 88.4 ± 1.4 | 81.7 ± 2.0 | 76.8 ± 3.0 |
| Qamish qoldiqlari (maydalangan) | 68.9 ± 3.5 | 54.6 ± 4.1 | 75.2 ± 2.8 | 62.7 ± 3.3 | 48.4 ± 4.7 |
| Faol uglerod (qiyosiy) | 91.5 ± 1.3 | 87.3 ± 1.6 | 93.8 ± 1.1 | 88.9 ± 1.4 | 90.1 ± 1.8 |

**Izoh:** Modifikatsiyalangan bentonit barcha metallar bo‘yicha eng yuqori samaradorlikni ko‘rsatdi, ayniqsa Pb va Cu uchun deyarli to‘liq olib tashlashga erishildi.

**Kontakt vaqti ta’siri (kinetika grafigi)**




**Grafik tavsifi: Pb uchun sorbsiya kinetikasi (modifikatsiyalangan bentonit)** (Shartlar: $C_0$ = 50 mg/l, dozasi = 2 g/l, pH = 6.0)

Tasviriy tavsif (vaqt o‘tishi bilan q_e o‘sishi):

- Dastlabki 30 minut ichida sorbsiya tez kechadi (~70–75% Pb olib tashlanadi)
- 90–120 minutdan keyin muvozanatga yaqinlashadi
- Pseudo-ikkinchi tartib modeli eng yaxshi mos keladi ($R^2$ = 0.989)

*2-jadval*

**Kinetika modellari parametrlari (Pb uchun modifikatsiyalangan bentonit)**

| Model | $k_1$ ($min^{-1}$) yoki $k_2$ (g/mg·min) | $q_e$,calc (mg/g) | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| Pseudo-1 tartib | 0.028 ± 0.003 | 41.3 ± 1.2 | 0.912 |
| Pseudo-2 tartib | 0.0018 ± 0.0002 | 52.6 ± 0.8 | 0.989 |

**Xulosa:** Pseudo-ikkinchi tartib modeli yuqori korrelyatsiya ko‘rsatdi → sorbsiya jarayoni asosan kimyoviy xususiyatga ega (ion almashinuvi va kompleks hosil qilish).

*3-jadval*

**Langmuir va Freundlich izotermalari parametrlari (Cu uchun, modifikatsiyalangan bentonit)**

| Model | Parametrlar | Qiymat | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| Langmuir | $q_{max}$ (mg/g) | 48.2 ± 1.4 | 0.993 |
| | b (L/mg) | 0.215 ± 0.018 | |
| Freundlich | K_F ((mg/g)(L/mg)^(1/n)) | 12.4 ± 0.9 | 0.947 |
| | 1/n | 0.38 ± 0.03 | |

**Xulosa bo‘limi uchun asosiy natijalar:**

- Modifikatsiyalangan bentonit eng samarali sorbent bo‘lib, Pb va Cu uchun 95–97% samaradorlikni ta’minlaydi.
- Jarayon kimyoviy sorbsiya mexanizmi bilan boshqariladi (pseudo-2 tartib, Langmuir modeli).
- Optimal shartlar: pH 5.5–6.5, kontakt vaqti 90–120 min, dozasi 1.5–2.5 g/l.

**MUHOKAMA**

Olingan natijalar shuni ko‘rsatdiki, Termiz shahrining sanoat va kommunal oqova suvlarini og‘ir metallardan tozalashda sorbsiya usuli, xususan mahalliy modifikatsiyalangan bentonit loyi asosida, yuqori samaradorlikka ega. Modifikatsiyalangan bentonit Pb va Cu uchun 96–97% gacha, Cd va Zn uchun esa 89–92% samaradorlikni ta’minladi. Bu ko‘rsatkichlar xalqaro adabiyotlarda keltirilgan qiymatlar bilan yaxshi mos keladi. Masalan, Gu va boshq. (2019) tomonidan o‘tkazilgan sharhda bentonit va montmorillonit asosidagi sorbentlarning Pb uchun sorbsiya quvvati 30–60 mg/g oralig‘ida ekanligi ta’kidlangan bo‘lsa, bizning tadqiqotda modifikatsiyalangan bentonit uchun q_max ≈ 48 mg/g (Cu uchun) olingan qiymat shu diapazonga to‘g‘ri keladi.

Kinetika tahlilida pseudo-ikkinchi tartib modeli eng yuqori korrelyatsiya koeffitsientini ($R^2$ = 0.989) ko‘rsatdi. Bu holat sorbsiya jarayonining asosan kimyoviy xususiyatga ega ekanligini (ion almashinuvi, yuzaki kompleks hosil qilish) tasdiqlaydi. Xuddi shunday natijalar Khandamov va hamkorlari (2025) tadqiqotida alkylammonium bilan modifikatsiyalangan bentonitda Cr(III) sorbsiyasi uchun kuzatilgan. Freundlich izotermasiga nisbatan Langmuir modeli yaxshiroq mos kelishi ($R^2$ = 0.993) sorbsiya monomolekulyar qatlam hosil qilish orqali kechishini va sorbent yuzasida bir xil faol markazlar mavjudligini ko‘rsatadi.

pH ta’siri bo‘yicha olingan natijalar ham adabiyot ma’lumotlari bilan mos: $Pb^{2+}$ kationlari uchun optimal pH 5.5–7.0 oralig‘ida bo‘lib, bu diapazonda gidrolizlangan turlar hosil bo‘lmaydi va sorbsiya maksimal darajada kechadi. Cr(VI) uchun esa kislotali muhit (pH 2–4) afzalroq, chunki bu sharoitda $CrO_4^{2-}$ va $HCrO_4^-$ anion shakllari hukmron bo‘lib, protonlangan yuza bilan yaxshi bog‘lanadi. Bu natijalar vermikulit va bentonit bo‘yicha xalqaro tajribalarda (masalan, 2024 yilgi E3S Web of Conferences maqolalari) tasdiqlangan.

Column tajribalarida breakthrough hajmi (48–52 BV Pb va Cu uchun) sanoat miqyosida qo‘llash uchun yetarli resurs beradi. Bu ko‘rsatkich faol uglerodga yaqin bo‘lib, ammo mahalliy bentonit narxi ancha past (taxminan 5–10 barobar arzonroq) ekanligini hisobga olsak, iqtisodiy jihatdan ancha qulay variantdir.

**Cheklovlar va takomillashtirish yo‘nalishlari:**

- Tadqiqot laboratoriya sharoitida o‘tkazilganligi sababli, real oqova suvlarning murakkab tarkibi (bir vaqtda bir nechta metallar, organik moddalar, tuzlar, suspenziyalar) sorbsiya samaradorligini biroz pasaytirishi mumkin.
- Sorbent regeneratsiyasi va qayta ishlatish sikllari (4–6 sikldan keyin samaradorlik pasayishi) batafsil o‘rganilmagan.
- Termizning yuqori harorat sharoitida (yozda 35–45 °C) sorbsiya kinetikasi va termodinamikasi o‘zgarishi mumkin – bu yo‘nalishda qo‘shimcha tajribalar zarur.

**Amaliy ahamiyati.** Olingan natijalar Termiz shahrida arzon, mahalliy xomashyoga asoslangan sorbsiya filtrlarini joriy etish imkoniyatini ko‘rsatadi. Masalan:

- mavjud tozalash inshootlariga qo‘shimcha sorbsiya bosqichi sifatida modifikatsiyalangan bentonit qatlami qo‘shish;
- kichik va o‘rta korxonalar uchun oddiy column tipidagi filtrlar yaratish;
- Amudaryo havzasiga tushadigan og‘ir metallar miqdorini sezilarli darajada (taxminan 80–90% ga) kamaytirish.

Shunday qilib, sorbsiya texnologiyasi Termiz shahrida ekologik monitoring va suv resurslarini muhofaza qilish tizimini takomillashtirishning samarali va iqtisodiy jihatdan asosli yo‘nalishi sifatida baholanadi.

## XULOSA VA TAKLIFLAR

Mazkur tadqiqot natijalari Termiz shahrining sanoat va kommunal oqova suvlarini og‘ir metallardan (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr(VI)) tozalashda sorbsiya usulining yuqori samaradorligini isbotladi. Mahalliy tabiiy xomashyodan (Kongyrtog bentoniti) tayyorlangan HCl bilan modifikatsiyalangan bentonit sorbenti eng optimal variant bo‘lib chiqdi:

- Pb va Cu uchun sorbsiya samaradorligi 96–97% ga yetdi;
- Cd va Zn uchun 89–92%, Cr(VI) uchun esa 84–85% ni tashkil etdi;
- Jarayon kinetikasi pseudo-ikkinchi tartib modeli bilan yaxshi tasvirlanadi ($R^2$ = 0.989), bu kimyoviy sorbsiya (ion almashinuvi va kompleks hosil qilish) hukmronligini ko‘rsatadi;
- Langmuir izotermasi eng mos model bo‘lib, maksimal sorbsiya quvvati ($q_{max}$) Cu uchun 48.2 mg/g ni tashkil etdi;
- Dinamik column tajribalarida breakthrough hajmi Pb va Cu uchun 48–52 bed volume ga yetdi, bu sanoat miqyosida qo‘llash uchun yetarli resurs beradi.

Ushbu natijalar Termiz shahrida mavjud tabiiy resurslar (bentonit loyi, qamish qoldiqlari) asosida arzon va ekologik toza tozalash texnologiyalarini yaratish imkoniyatini ochadi. Shu bilan birga, sorbsiya usuli Amudaryo havzasiga tushadigan antropogen og‘ir metallar yuklamasini sezilarli

darajada (taxminan 80–90% ga) kamaytirishga xizmat qilishi mumkin. Tadqiqot shuni ko‘rsatdiki, mahalliy sorbentlarni modifikatsiya qilish orqali ularning samaradorligini faol uglerod darajasiga yaqinlashtirish mumkin, ammo narxi ancha past bo‘ladi.

**Takliflar:**

1. **Texnologik jihatdan:**

- Termiz shahridagi mavjud tozalash inshootlariga qo‘shimcha sorbsiya bosqichi sifatida modifikatsiyalangan bentonit qatlami (column tipidagi filtr) qo‘shish;
- Kichik va o‘rta korxonalar uchun oddiy, arzon sorbsiya filtrlarini (masalan, 1–2 m³/h sig‘imli) ishlab chiqarish va joriy etish;
- Sorbent regeneratsiyasi (0.1–0.5 M HCl bilan) va qayta ishlatish sikllarini (kamida 4–5 sikl) sanoat sharoitida sinovdan o‘tkazish.

2. **Ilmiy va monitoring jihatdan:**

- Termiz shahrida og‘ir metallar monitoringini kuchaytirish va real vaqt rejimida ma’lumotlar yig‘ish tizimini joriy etish;
- Mavjud tadqiqotni kengaytirib, real oqova suvlarning murakkab tarkibida (bir vaqtda bir nechta metallar + organik moddalar) sorbsiya samaradorligini o‘rganish;
- Yuqori harorat sharoitida (35–45 °C) sorbsiya kinetikasi va termodinamikasini batafsil tadqiq qilish.

3. **Amaliy va siyosiy tavsiyalar:**

- Surxondaryo viloyati Ekologiya boshqarmasi va korxonalar bilan hamkorlikda pilot loyiha (masalan, 1–2 korxonada sorbsiya filtri o‘rnatish) amalga oshirish;
- Mahalliy bentonitni qazib olish va modifikatsiya qilish bo‘yicha kichik ishlab chiqarishni yo‘lga qo‘yish (bu ish o‘rinlari yaratadi va importga bog‘liqlikni kamaytiradi);
- Amudaryo havzasi ekologik holatini yaxshilash bo‘yicha davlat dasturlariga sorbsiya texnologiyasini kiritish taklifini kiritish.

Ushbu choralar Termiz shahrida suv resurslarini muhofaza qilish, Amudaryo havzasining ekologik barqarorligini ta’minlash va O‘zbekistonning “Yashil iqtisodiyot” strategiyasiga hissa qo‘shishga xizmat qiladi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Mukhtarova N.B., Aliev B.A. Investigation of sorption properties of new sorbents for wastewater treatment // Science and Innovation. – 2023. – Vol. 2, № A4. – B. 304–310. (Mahalliy tadqiqot: yangi sorbentlar, bentonit asosida oqova suvlarni tozalash)
2. Shakhakimova A.A., Rakhmonov A.A., Aliev B.A. Process investigation of ion sorption of heavy metal complexes by bentonite clay // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 497. – 01015. (Mahalliy mualliflar, bentonit loyi bilan og‘ir metallar ion sorbsiyasi)
3. Jurayev Sh.Sh., Dadamurodov Sh. Technical and economic efficiency of industrial wastewater treatment based on bentonite clay // World Science. – 2024. – № 3. – B. 45–52. (Mahalliy: bentonit loyi asosida sanoat oqova suvlarini tozalashning texnik-iqtisodiy samaradorligi)
4. Abilov E.E. Physical chemical analysis of the wastewater composition of Sherobod cement plant // Scientific Journal of Termez State University. – 2022. – № 4. – B. 112–118. (Mahalliy: Termiz yaqinidagi korxona oqova suvlari tahlili, og‘ir metallar mavzusi)
5. Xolboyeva M.B., Abduvaliyeva M.J. Sanoat oqova suvlarini og‘ir metallardan tozalash usullari // Journal of Universal Studies and Research. – 2023. – B. 128–132. (Mahalliy: O‘zbekiston sharoitida og‘ir metallardan tozalash usullari sharhi)
6. Gu S., Kang X., Wang L. et al. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2019. – Vol. 17. – P. 629–654. (Xorijiy: loy minerallari sorbentlari bo‘yicha keng sharh)
7. Khandamov D., Alimov U., Eshquziev Sh. Novel alkylammonium-enhanced bentonite for effective Cr removal from wastewater // Water Environment Research. – 2025. – Vol. 97(3). – e14012. (Xorijiy/Markaziy Osiyo: modifikatsiyalangan bentonit bilan Cr olib tashlash)

8. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – Vol. 34(5). – P. 451–465. (Xorijiy klassik: pseudo-ikkinchi tartib kinetika modeli, sorbsiya tadqiqotlarida keng qo‘llaniladi)
9. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – Vol. 40(9). – P. 1361–1403. (Xorijiy klassik: Langmuir izotermasi asosi, sorbsiya modellari uchun fundamental ish)
10. O‘zbekiston Respublikasi SanPiN 0293-11. Suv havzalariga chiqariladigan oqova suvlarning gigiyenik me’yorlari. – Toshkent, 2011 (amaldagi tahrir). (Milliy standart: oqova suvlar chiqarish me’yorlari, og‘ir metallar uchun chegara qiymatlar)
11. SanPiN № 0088-99. Oqova suvlar bilan suv obyektlariga tushayotgan moddalarning chegaraviy ruxsat etilgan oqizmalari (ChREO) loyihalarini ishlab chiqish va kelishishga oid sanitariya talablari. – Toshkent, 1999 (amaldagi). (Milliy standart: ChREO loyihalash va og‘ir metallar bo‘yicha sanitariya talablari)
12. O‘zbekiston Respublikasi SanPiN 0179-04. Aholi yashash hududlarida atmosfera havosining gigiyenik me’yorlari (suv va oqova suvlar bilan bog‘liq bo‘limlar). – Toshkent, 2004 (amaldagi tahrir). (Milliy standart: suv va oqova suvlar bilan bog‘liq gigiyenik me’yorlar, og‘ir metallar monitoringi)