



**KOMPOZITSIYALI SORBENTLARNING SANOAT OQAVA
SUVLARINI TOZALASHDAGI SAMARADORLIGI VA
REGENERATSIYADAN KEYINGI QAYTA FOYDALANISH
IMKONIYATLARINI BAHOLASH**

Buxoro davlat texnika universiteti

professori Fozilov Sadridin Fayzullayevich

Tadqiqotchi Azimova Fotima Aslon qizi

Annotatsiya

Kompozitsiyali sorbentning amaliy samaradorligi model eritmadagi yuqori yutish sig'imi bilan birga haqiqiy oqava suv tarkibi, oqim sharoiti va takroriy foydalanishdagi barqarorligiga bog'liq. Ushbu maqolada biochar va mineral asosidagi materiallarning kolonnada ishlashi, regeneratsiyasi va texnologik baholanishiga oid birlamchi tadqiqotlar qiyosiy tahlil qilindi. Model eritma, tarkibi nazorat qilinadigan sun'iy oqava suv va haqiqiy sanoat suvi natijalari o'rtasidagi farq aniqlashtirildi. Tahlil sorbentning dinamik sig'imi, chiqish konsentratsiyasi, bosim yo'qotilishi, regeneratsiyada metall ajralishi va sikllar davomida massa saqlanishini birgalikda baholash zarurligini ko'rsatdi. Mahalliy kompozitsiya uchun namuna olish, dastlabki tozalash, batch saralash, kolonna sinovi va qayta foydalanish bosqichlaridan iborat tekshiruv tartibi taklif etildi. Regeneratsiya samarasi faqat metallning desorbsiyasi bilan cheklanmaydi; qayta ishlangan materialning yutish qobiliyati va gidravlik xususiyatlari ham tasdiqlanishi kerak. Texnik-iqtisodiy baholashda belgilangan sifatga erishgan suv hajmi, reagentlar, energiya, yuvish oqimi va ishlatilgan sorbentni boshqarish xarajatlari hisobga olinadi. Natijalar adabiyotlar tahlili hamda asoslangan metodik takliflar bo'lib, mahalliy sorbent uchun o'lchangan ishlab chiqarish ko'rsatkichlari sifatida talqin qilinmaydi.



Kalit soʻzlar: sanoat oqava suvi, kompozitsiyali sorbent, kolonna, dinamik sigʻim, regeneratsiya, desorbsiya, qayta foydalanish, material balansi, iqtisodiy baholash.

1 Kirish

Sorbentni amaliy tozalash tizimiga kiritish uchun uning laboratoriyadagi yutish qobiliyati yetarli shart boʻlmaydi. Sanoat oqava suvida metall bilan birga organik moddalar, erigan tuzlar va muallaq zarrachalar mavjud boʻlishi mumkin. Ular sirt markazlari uchun raqobatlashadi, metallni kompleks holatga oʻtkazadi yoki sorbent qatlamini berkitadi. Shu sababli materialning bir komponentli eritmada olingan sigʻimi real suvdagi ishchi sigʻim bilan farqlanishi tabiiy. Bu farqning kattaligi va sababi amaliy baholashning mustaqil obyekti hisoblanadi.

Biochar va bentonit asosidagi monolitning oqimdagi metall yutishini tadqiq etgan ish kolonna shaklidagi sinovning ahamiyatini koʻrsatadi [1]. Fseha va hammualliflar esa bir va koʻp metall eritmaları hamda sunʼiy birlamchi va ikkilamchi tozalangan suv sharoitlarini qiyoslagan [2]. Mazkur tadqiqotlarni haqiqiy mahalliy sanoat oqava suvida olingan dalil bilan tenglashtirib boʻlmaydi. Ularning metodik qiymati suv matritsasi va foydalanish rejimi alohida tekshirilishi kerakligini koʻrsatishidadir.

Regeneratsiya sorbentdan yutilgan komponentni chiqarish va materialni keyingi ishga tayyorlash jarayonidir. Uning natijasi ikki savolga javob berishi kerak: ifloslantiruvchi qay darajada chiqarildi va sorbent keyingi siklda oʻz vazifasini qanchalik bajara oldi. Kuchli reagent yuqori desorbsiya berishi mumkin, biroq mineral yoki bogʻlovchi fazani yemirishi ehtimoli mavjud. Shu sababli regeneratsiya reagentini tanlash yutish qobiliyati, mexanik holat va qoʻshimcha oqimlarni hisobga olgan holda amalga oshiriladi.

Maqolaning maqsadi mahalliy xomashyodan olingan kompozitsiyali sorbentning sanoat oqava suvini tozalashdagi amaliy yaroqliligini baholash



tartibini ilmiy manbalar asosida ishlab chiqishdir. Vazifalar haqiqiy suv tarkibini hisobga olish, kolonna ko'rsatkichlarini aniqlash, sikllar bo'yicha regeneratsiyani tekshirish va iqtisodiy hisob chegaralarini belgilashdan iborat. Tahlil sorbentning butun foydalanish davrini qamrab oladi; faqat birinchi sikldagi tozalash foizi yakuniy samaradorlik mezonini sifatida olinmaydi.

2 Materiallar va usullar

Ilmiy tahlil doirasi

Tadqiqot oqimidagi adsorbsiya, biochar kompozitsiyalari, metallni desorbsiya qilish va qayta foydalanish bo'yicha birlamchi nashrlarni maqsadli qiyoslashga asoslandi [1–7]. Manbalardan material shakli, suv turi, tajriba rejimi, regeneratsiya usuli va hisoblash mezonlari ajratildi. Oqimdagi sorbentlar uchun an'anaviy Thomas modelining dastlabki ilmiy manbasi ham kiritildi [6]. Bibliografik tekshiruv 2026-yil 8-oktabrda amalga oshirildi. Tozalangan suvdan foydalanish bo'yicha mahalliy huquqiy limitlar ushbu tahlilda belgilanmaydi.

Taqqoslashda uch turdagi muhit farqlandi: bir komponentli model eritma, ma'lum tarkibda tayyorlangan sun'iy oqava suv va ishlab chiqarishdan olingan haqiqiy namuna. «Haqiqiy suv» atamasi faqat manbasi qayd etilgan ishlab chiqarish namunasiga qo'llanadi. Metall bilan sun'iy boyitilgan namuna alohida belgilanadi. Turli muhitlarda olingan ko'rsatkichlarni birlashtirib umumiy tozalash foizi chiqarilmadi. Natijalarning qo'llanish chegarasi har bir suv turi bilan bog'lab ko'rsatildi.

Oqava suvni tavsiflash va namuna olish

Kelajakdagi tajriba uchun maqsadli korxona tanlanganda suvning hosil bo'lish jarayoni va namunani olish nuqtasi aniqlanadi. Bir martalik namuna ishlab chiqarishdagi butun o'zgaruvchanlikni ifodalamaydi. Shu sababli ish smenalari yoki texnologik bosqichlarni qamrab oladigan takroriy namuna olish rejalashtiriladi. Tarkib keskin o'zgaradigan oqimlarda nuqtaviy va aralash



namunalar vazifasi farqlanadi. Namuna olish sanasi, oqim rejimi, saqlash va tahlilgacha bo'lgan vaqt yozib boriladi.

1-jadval. Haqiqiy oqava suv uchun tavsiya etiladigan tavsiflar

Ko'rsatkich	Baholash vazifasi	Tozalashga ehtimoliy ta'sir	Talqin talabi
pH va ishqoriylik	Muhit va buferlashni aniqlash	Zaryad, eruvchanlik, reagent sarfi	Dastlab va jarayon davomida o'lchanadi
Erigan va umumiy metall	Metall fraksiyalarini ajratish	Adsorbsiya va mexanik ushlanish	Namuna tayyorlash usuli ko'rsatiladi
Elektr o'tkazuvchanlik	Tuzli muhitni tavsiflash	Ion raqobati va ekranlanish	Ion tarkibi bilan birga talqin qilinadi
Organik uglerod yoki KKS	Organik yukni baholash	Komplekslanish va sirt bandligi	Metall kamayishiga tenglashtirilmaydi
Muallaq moddalar va loyqalik	Qattiq zarrachalarni baholash	Qatlam berkilishi va bosim oshishi	Sorbentdan chiqadigan zarrachalar ajratiladi
Ca, Mg va boshqa ionlar	Raqobatni aniqlash	Faol markazlar uchun raqobat	Kirish va chiqish oqimida tekshiriladi

KKS kimyoviy kislorod sarfini bildiradi va organik yukni baholash vositalaridan biridir. Uni kamaytirish bilan metallni kamaytirish boshqa-boshqa natijalardir. Sorbsiya bosqichiga kirayotgan suv tavsifi korxonaning xom oqava suvi tavsifidan farq qilishi mumkin. Agar oldindan tindirish yoki filtrlash





qo'llansa, aynan sorbentga kiruvchi oqim tahlil qilinadi. Dastlabki tozalash samarasi sorbent samarasi bilan aralashtirilmaydi.

Sorbentning ishchi shaklini tanlash

Kukunli material davriy idishdagi, ya'ni batch sinov uchun qulay, ammo uzluksiz tizimda uni suvdan ajratish talab etiladi. Batch sinovda eritma va sorbent belgilangan hajmda birga ushlab turiladi. Granula yoki monolit foydalanishdagi ajratishni soddalashtirishi mumkin, lekin faol sirtga kirish va massa uzatish tezligini o'zgartiradi. Shu sababli ishchi shakl tayyorlangandan keyin sorbsiya qayta tekshiriladi. Bog'lovchi komponent metallni o'zi ham ushlasa, nazorat sifatida bog'lovchining alohida sinovi kiritiladi. Granulaning quruq mustahkamligi bilan suvdagi mustahkamligi alohida ko'rsatkichlar sifatida olinadi.

Dastlab 1–3 mm granulalar kabi texnologik jihatdan boshqariladigan o'lcham oralig'i sinov varianti sifatida ko'rib chiqilishi mumkin. Bu oraliq tasdiqlangan optimum emas. Sorbentning haqiqiy zichligi, qatlamning hajmiy zichligi, zarrachalar o'lcham taqsimoti va shishishi aniqlanadi. Qatlam ichida bo'shliq va kanal hosil bo'lishini kamaytirish uchun to'ldirish tartibi bir xil saqlanadi. Sinovdan oldingi namlash va yuvish hajmi jarayon balansiga kiritiladi.

Batch saralash va kolonna sinovi

Batch bosqichda bir xil suv namunasida material variantlari qiyoslanadi. Sorbentsiz nazorat, alohida komponentlar va kompozitsiya bir xil sharoitda tekshiriladi. Tanlangan variant kolonnaga o'tkaziladi. Kolonna diametri, qatlam balandligi, quruq sorbent massasi va oqim yo'nalishi yoziladi. Kirish va chiqish oqimida metall konsentratsiyasi vaqt bo'yicha aniqlanadi. Kirish tarkibi o'zgaruvchan bo'lsa, uning o'lchangan vaqt qatori ishlatiladi; doimiy boshlang'ich konsentratsiya farazi avtomatik qo'llanmaydi.



Bo'sh qatlam kontakt vaqti EBCT va o'tkazilgan qatlam hajmlari soni BV quyidagi bog'lanishlar orqali hisoblanadi.

$$EBCT = \frac{V_b}{Q}, \quad BV(t) = \frac{Qt}{V_b}$$

Bu yerda V_b to'ldirilgan sorbent qatlamining umumiy hajmi, L; Q sarf, L/daqiqa; t vaqt, daqiqa. EBCT haqiqiy g'ovak suvi yashash vaqtiga teng emas, chunki qatlamning bo'shliq ulushi alohida hisobga olinmagan. Oqim sarfi o'zgarsa, BV vaqt davomida o'tgan hajmlarni yig'ish orqali aniqlanadi. Qatlamning bosim farqi, chiqish loyqaligi va sorbent zarrachalarining ajralishi ham metall ko'rsatkichlari bilan birga qayd etiladi.

Dinamik sig'im va ish muddati

Kirish va chiqish konsentratsiyasining farqi vaqt bo'yicha integrallanganda qattiq fazada ushlangan metall massasi hisoblanadi. Oqim doimiy bo'lgan sharoitda dinamik sig'im quyidagicha yoziladi.

$$q_{\text{dyn}} = \frac{Q}{m} \int_0^{t_*} [C_{\text{in}}(t) - C_{\text{out}}(t)] dt$$

Q L/daqiqa, konsentratsiyalar mg/L, m g va t daqiqa birliklarida bo'lsa, q_{dyn} mg/g hisobida olinadi. t_* hisob tugagan vaqtni bildiradi. Chiqishning nisbiy konsentratsiyasi 0,05 yoki 0,95ga yetgan nuqtalar qiyosiy tajribada shartli uzilish va to'yinish mezonlari sifatida ishlatilishi mumkin. Ushbu chegaralar oqava suvni chiqarishning qonuniy limiti emas. Ishchi to'xtash nuqtasi mo'ljallangan suv sifati mezonidan ham kelib chiqib belgilanadi.

Regeneratsiya tajribasi

Yutilgan metallni ajratish uchun kislota, tuz eritmasi yoki boshqa eluent sorbentning tuzilishi va metallning bog'lanishiga mos tanlanadi. Eluent konsentratsiyasi, hajmi, oqim sarfi va kontakt vaqti yoziladi. Adsorbsiya, desorbsiya, yuvish va keyingi adsorbsiya bir sikl sifatida kuzatiladi. Dastlabki baholash uchun besh siklli reja taklif etiladi, ammo amaliy xizmat muddatini





tasdiqlash uchun bundan ko'proq sinov talab qilinishi mumkin. Har siklda quruq massa yo'qotilishi hisobga olinadi.

Desorbsiya darajasi va sig'imni saqlash ko'rsatkichlari alohida hisoblanadi.

$$D_n = \frac{M_{\text{eluat},n}}{M_{\text{yutilgan},n}} \times 100\%, \quad A_n = \frac{q_n}{q_1} \times 100\%$$

D_n metallning eluatga chiqqan ulushini, A_n esa n -sikldagi sig'imning birinchi siklga nisbatini bildiradi. Q_n bir xil suv va kontakt sharoitida, tegishli quruq massa hisobida aniqlanadi. Har sikldagi tozalangan suv hajmi ham mustaqil ko'rsatkich sifatida beriladi. Yuqori desorbsiya keyingi sikldagi sig'im saqlanganligini anglatmaydi. Past desorbsiya esa materialda qoldiq metall to'planishining miqdoriy tekshiruvini talab qiladi.

3 Natijalar

Suv matritsasining ta'siri

Tahlil suv tarkibini o'zgartirish sorbent ko'rsatkichlarining ma'nosini ham o'zgartirishini ko'rsatdi. Fseha va hammualliflar bir va aralash metall eritmalari, shuningdek sun'iy tozalangan suv muhitida yutish xususiyatlarini qiyoslagan [2]. Ushbu tadqiqot haqiqiy mahalliy korxona suvining tayyor natijasi emas. Uning metodik xulosasi suv tarkibidagi fon komponentlarini alohida hisobga olishdir. Model eritmadagi natijadan amaliy oqimga o'tishda tarkib va kontakt sharoiti birgalikda qayta tekshiriladi.

Organik ligandlar erigan metallning erkin ion ulushini kamaytirishi mumkin; muallaq zarrachalar esa umumiy metallning bir qismini o'zida olib yuradi. Sorbentdan keyingi filtrlash bunday zarrachalarni ushlab qolsa, konsentratsiya kamayishining bir qismi mexanik ajratishga tegishli bo'ladi. Shu sababli tozalashning umumiy natijasi bilan adsorbsiya hissasi bir xil deb olinmaydi. Haqiqiy suvda pH, erigan metall va umumiy metallning parallel kuzatilishi bunday farqni aniqlashga yordam beradi.





Kolonnada foydalanishning asosiy farqlari

Biochar va bentonit kompozitsiyali monolitning qo'zg'almas qatlamli sinoviga oid tadqiqot ishchi shaklni sinash zarurligini ko'rsatadi [1]. Kukundagi qisqa diffuziya yo'li monolit yoki granulada uzayishi mumkin. Shu bilan birga, qattiq materialni ajratish yengillashadi. Demak, ishchi shaklni tanlash sig'im va massa uzatish bilan ajratish imkoniyatining muvozanatidir. Mahalliy materialning shakli bo'yicha qaror batch natijalariga qo'shimcha kolonna dalili bilan qo'llab-quvvatlanadi.

Oqim sarfi ortishi qatlamning ish vaqtini qisqartirishi mumkin, lekin sabab faqat sorbentning «tez to'yishi» emas. Kontaktning yetarli bo'lmasligi yoki kanal hosil bo'lishi ham chiqish konsentratsiyasini oshiradi. Qatlam balandligi oshganda yutish zonasi uchun joy ko'payishi bilan bosim yo'qotilishi ham kuchayishi mumkin. Shu sababli material tanlashga metallning chiqish egri chizig'i, bosim dinamikasi va oqimning barqarorligi birgalikda kiritildi.

Regeneratsiya va qayta foydalanish

Ko'p metallni ushlovchi biosorbentning uzluksiz kolonnada qo'llanishiga oid birlamchi ish desorbsiya va qayta foydalanishni ketma-ket tekshirish mumkinligini ko'rsatadi [3]. Gidratlangan temir oksidli biochar bo'yicha tadqiqot esa modifikatsiyalangan materialning foydalanish imkoniyatlarini o'rganadi [4]. Ushbu dalillar regeneratsiya konsepsiyasini qo'llab-quvvatlaydi, lekin mahalliy kompozitsiyaning xizmat muddati yoki sig'imini saqlash foizini oldindan bermaydi. Material va reagentga xos o'zgarishlar alohida o'lchanishi kerak.

Sig'im yo'qotilishining sabablarini ajratish uchun sikldan keyingi qoldiq metall, quruq massa va mexanik holat tekshiriladi. Mineralning erishi, bog'lovchining yemirilishi va mayda zarrachalarning chiqishi sorbent miqdorini kamaytirishi mumkin. Faqat qolgan massaga nisbatan sig'im hisoblansa, material sarfi ortishi yashirin qoladi. Shu sababli n-sikldagi solishtirma sig'im





bilan birga boshlang'ich massa hisobidagi umumiy ushlangan metall va tozalangan suv hajmi berilishi tavsiya etildi.

2-jadval. Regeneratsiya usullarini tanlash uchun qiyosiy mezonlar

Usul	Maqsadli ta'sir	Tekshiriladigan cheklov	Qaror uchun ko'rsatkich
Kislota bilan elutsiya	Bog'langan metallni chiqarish	Mineral erishi va reagent sarfi	Desorbsiya, massa va sig'im saqlanishi
Tuz eritmasi bilan elutsiya	Almashinuvchi ionlarni siqib chiqarish	Qoldiq tuz va yetarli ajralmaslik	Ion balansi va keyingi yutish
Kompleks hosil qiluvchi eluent	Metallni eritmada bog'lash	Eluentni qayta ishlash zarurati	Metall qaytarilishi va eluent sarfi
Termik ishlov	Ayrim organik qoldiqlarni yo'qotish	Metall qolishi va sirt o'zgarishi	Emissiya, tuzilish va qayta yutish
Birlashtirilgan yuvish	Sirtini ishchi holatga keltirish	Suv hajmi va qo'shimcha oqim	Umumiy sikl xarajati va barqarorlik

Termik ishlov sorbentdagi metallni avtomatik ravishda yo'q qilmaydi. Harorat o'zgarishi metallning kimyoviy holatini, mineral fazani va uglerod sirtini o'zgartirishi mumkin. Shu sababli organik ifloslantiruvchi uchun mos regeneratsiya usulini metall bilan to'yingan materialga bevosita ko'chirish asoslanmaydi. Eluat va yuvish suvlarining umumiy metall massasi alohida hisoblanadi. Tozalash jarayoni ifloslantiruvchini bir oqimdan boshqasiga ko'chirish bilan cheklanmasligi uchun keyingi boshqarish usuli ham aniqlanadi.





Texnik va iqtisodiy baholash

Biochar asosidagi pastga oqimli kolonna bo'yicha 2025-yilgi tadqiqotda regeneratsiya, qayta foydalanish va texnik-iqtisodiy tahlil birgalikda ko'rib chiqilgan [5]. Ushbu yo'nalish mahalliy material uchun ham birinchi sikldagi sig'imdan kengroq hisob zarurligini asoslaydi. Xarajatlar tarkibiga xomashyoni yetkazish, quritish, termik ishlov, granula tayyorlash va monitoring kiradi. Reagent narxi yoki xizmat muddati bo'yicha mahalliy ma'lumot bo'lmasa, aniq iqtisodiy tejam foizi chiqarilmaydi.

Bir kub metr suvni tozalash xarajati hisobida denominator belgilangan sifatga erishgan suv hajmini ifodalashi kerak. Kolonnadan o'tgan barcha hajmni bir xil tozalangan suv deb hisoblash natijani yaxshiroq ko'rsatib yuboradi. Regeneratsiya, yuvish va ishga tushirish paytidagi oqimlar alohida qayd etiladi. Metallni qaytarishdan daromad faqat amalda ajratib olingan mahsulotning sifati, bozori va qayta ishlash xarajati ma'lum bo'lganda hisobga kiritiladi.

4 Muhokama

Sorbentni mavjud tozalash tizimiga kiritish

Kompozitsiyali sorbent dastlabki tozalashdan keyingi sayqallash bosqichi sifatida qo'llanishi mumkin. Bunda yirik zarrachalar, keskin pH tebranishlari va yuqori organik yuk avval boshqariladi. Sorbsiya bosqichining vazifasi qoldiq erigan metall yoki tanlangan komponentni kamaytirish bilan aniq belgilanadi. Barcha ifloslantiruvchilarni bitta materialga yuklash talab etilmaydi. Texnologik tizimga moslashtirish korxona oqimining hajmi va tarkibiga asoslanadi.

Kolonnalar ketma-ket ulanishi birinchi qatlamning chiqishidagi metallni keyingi qatlamda ushlash imkonini berishi mumkin. Biroq bunday yechim uchun uzilish egri chizig'i, almashtirish va regeneratsiya vaqti aniqlangan bo'lishi zarur. Birinchi qatlamdan ajralgan mayda material ikkinchi qatlamni berkitishi ehtimoli ham tekshiriladi. Parallel ishlash varianti esa regeneratsiya paytida tozalashning uzluksizligini ta'minlash uchun baholanadi. Qaysi sxema tanlanishi





laboratoriya modeli bilan emas, o'lchangan oqim va xizmat vaqti bilan asoslanadi.

Kolonna modelining qo'llanish chegarasi

Thomas modeli oqimdagi adsorbsiya egri chizig'ini tavsiflash uchun ishlatiladigan tarixiy modellardan biridir [6]. Modelga moslik kolonnada barcha fizik farazlar bajarilganligini isbotlamaydi. Kirish konsentratsiyasi, oqim yoki pH vaqt bo'yicha o'zgarsa, parametrning ma'nosi ham o'zgaradi. Shuning uchun modeldan olingan sig'im integral material balansi bilan qiyoslanadi. Bir xil chiqish egri chizig'iga bir nechta empirik model moslashishi mumkinligi ham hisobga olinadi.

Kolonna tahlilida faqat yaxshi moslashgan egri chiziqni taqdim etish yetarli emas. O'lchangan nuqtalar, kirish tarkibi, oqim sarfi va bosim farqi ko'rsatiladi. Adsorbsiya oldidan oqimning tekisligini tekshirish uchun zarur hollarda izlovchi modda bilan gidravlik sinov o'tkazilishi mumkin. Hajm va vaqt bo'yicha masshtablash sinov o'lchamlari chegarasida qo'llanadi. Kichik kolonnadan sanoat qurilmasiga o'tishda diametr, zarracha va kanal hosil bo'lishining yangi ta'siri tekshiriladi.

Sikllar bo'yicha metall balansi

Adsorbsiya va regeneratsiyani yagona tizim sifatida baholashda kirgan metallning barcha chiqish yo'llari hisobga olinadi. Tozalangan oqim, eluat, yuvish suvi, chiqarilgan qattiq material va namuna olish orqali yo'qotilgan massa ajratiladi. Qoldiq metall sikl oxirida sorbentda qolgan miqdorni bildiradi. Adsorbsiya bosqichida ushlangan miqdorni va regeneratsiyadan keyingi qoldiqni bitta balansda ikki marta qo'shishdan saqlanish kerak.

$$M_{\text{kirish}} = M_{\text{chiqish}} + M_{\text{eluat}} + M_{\text{qoldiq}} + M_{\text{qattiq}} + M_{\text{namuna}}$$

Ifodada eluat tarkibiga regeneratsiya va tegishli yuvish oqimlari, qattiq chiqindiga esa tizimdan chiqarilgan material kiradi. Tizimga eluent bilan metall



kirsa, bu ham kirish tomoniga qo'shiladi. Balansning yopilish darajasi analitik noaniqlik doirasida baholanadi. Katta nomuvofiqlik kuzatilsa, hajm, namuna tayyorlash yoki erigan va umumiy metall fraksiyalarining farqi tekshiriladi. Ishlatilgan materialdagi qoldiq metallni bilish regeneratsiya strategiyasini tanlashga ham yordam beradi.

Xizmat muddati va iqtisodiy qaror

Sorbentning xizmat muddati belgilangan sifatga erishish, qatlamning barqarorligi va regeneratsiya xarajatining birgalikdagi chegarasi bilan aniqlanadi. Sig'im saqlanishi uchun, masalan, dastlabki qiymatning 80 foizi tadqiqot mezon sifatida oldindan tanlanishi mumkin. Bu universal me'yor emas va boshqa cheklovlarni almashtirmaydi. Agar qatlam bosimi yoki ikkilamchi ajralish qabul qilinadigan chegaradan chiqsa, sig'im saqlangan material ham qayta ishlash yoki almashtirishni talab qilishi mumkin.

Oksidlangan biochar yordamida misni ajratish bo'yicha 2024-yilgi tadqiqotda batch va kolonna natijalari alohida baholangan hamda takroriy regeneratsiya o'rganilgan [7]. Mazkur tajriba turli ishlash rejimlaridagi sig'imlarni ajratishning zarurligini ko'rsatadi. Mahalliy materialning iqtisodiy hisobi ham aynan foydalaniladigan rejim ma'lumotiga asoslanishi kerak. Kukun uchun olingan muvozanat sig'imini granulaning ishchi kolonna sig'imi o'rnida qo'llash reagent va material sarfini noto'g'ri baholashga olib kelishi mumkin.

3-jadval. Amaliy qo'llash qarori uchun baholash matritsasi

Mezon	O'lchanadigan ko'rsatkich	Qarorga ta'siri
Suv sifati	Maqsadli komponentning qoldiq darajasi	Ishchi oqim va to'xtash nuqtasi
Dinamik foydalanish	Uzilish vaqti, BV, dinamik sig'im	Qatlam massasi va almashtirish oralig'i



Mezon	O'lchanadigan ko'rsatkich	Qarorga ta'siri
Gidravlik barqarorlik	Bosim farqi va sarfning saqlanishi	Oldindan tozalash va granula tanlovi
Regeneratsiya	Desorbsiya va sig'im saqlanishi	Eluent va sikl davomiyligi
Material saqlanishi	Massa yo'qotilishi va ajralgan elementlar	Qayta foydalanishning amaliy chegarasi
Xarajat	Sifatga mos suv hajmiga to'liq sarf	Texnologik variantni tanlash

Xarajat tahlilida muqobil variantlar bir xil suv va bir xil yakuniy sifat mezoni bo'yicha taqqoslanadi. Kapital sarf, reagent, energiya, ishchi kuchi, monitoring va chiqindi bilan ishlash alohida keltiriladi. Xomashyo bepul deb olinadigan ssenariy ham yig'ish va tayyorlash xarajatini yo'q qilmaydi. Sikllar soni, elektr sarfi va regeneratsiya eluenti miqdori sezgirlik tahliliga kiritiladi. Mahalliy narxlar yoki tajriba xizmat muddati bo'lmasa, iqtisodiy xulosa aniq pul qiymati o'rniga hisoblash tartibi sifatida beriladi.

Tahlilning cheklovi mahalliy korxona suvi va kompozitsiyali sorbent uchun bevosita kolonna tajribasi mavjud emasligidir. Shu sababli muayyan tozalash foizi, ishlash soati yoki qayta foydalanish sikllari soni kafolatlanmaydi. Ushbu maqola bunday ko'rsatkichni aniqlash tartibini ishlab chiqadi. Keyingi sinovda kamida bir nechta mustaqil suv partiyasi va yangi sorbent partiyasi qamrab olinsa, xomashyo hamda suv o'zgaruvchanligining amaliy ta'siri tekshiriladi.

5 Xulosa

Kompozitsiyali sorbentning sanoat oqava suvini tozalashdagi samaradorligini baholash model eritmadagi sorbsiya sig'imidan haqiqiy suv va oqim sharoitiga bosqichma-bosqich o'tishni talab qiladi. Suvning erigan va





umumiy metall fraksiyalari, organik yuki va muallaq moddalari natijalarning talqinida hisobga olinishi zarur.

Dinamik sig'im bilan birga chiqish konsentratsiyasi, uzilish vaqti, qatlam hajmlari soni va bosim farqi aniqlanishi kerak. Regeneratsiya metallning chiqarilishi va keyingi yutish sig'imining saqlanishi bilan alohida tavsiflanadi. Sikllar davomida sorbent massasi va qoldiq metallni kuzatish foydalanish muddatining asosli bahosini beradi.

Mahalliy material uchun taklif etilgan baholash tartibi xomashyo, ishchi shakl, kolonna va regeneratsiyani yagona material balansiga bog'laydi. Iqtisodiy samaradorlik belgilangan sifatga erishgan suv hajmiga nisbatan to'liq xarajat orqali hisoblanadi. Ushbu yondashuv mahalliy kompozitsiyali sorbentning haqiqiy amaliy imkoniyatini tajriba dalillari bilan aniqlash uchun asos yaratadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Elimination of selected heavy metals from aqueous solutions using biochar and bentonite composite monolith in a fixed-bed operation. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022;10:106993. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106993>
2. Fseha Y. H., Sizerici B., Yildiz I., Yavuz C. Pristine biochar performance investigation to remove metals in primary and secondary treated municipal wastewater for groundwater recharge application. PLOS ONE. 2022;17(12):e0278315. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278315>
3. Abdolali A., Ngo H. H., Guo W. va boshq. Application of a breakthrough biosorbent for removing heavy metals from synthetic and real wastewaters in a lab-scale continuous fixed-bed column. Bioresource Technology. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.016>



4. Wang Y. va boshq. Enhanced Removal of Heavy Metals from Water by Hydrous Ferric Oxide-Modified Biochar. ACS Omega. 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03893>

5. Baaloudj O., Langerame F., Iunnissi R. va boshq. Biochar-based Downflow Fixed-Bed Adsorption Systems for Water Treatment: Process Optimization, Reusability, and Techno-Economic Evaluation. Separation and Purification Technology. 2025;377:134347. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134347>

6. Thomas H. C. Heterogeneous Ion Exchange in a Flowing System. Journal of the American Chemical Society. 1944;66(10):1664–1666. <https://doi.org/10.1021/ja01238a017>

7. Response surface modelling and optimization for copper removal from acid mine drainage using oxidized Himalayan pine needle biochar. AQUA Water Infrastructure Ecosystems and Society. 2024. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.161>