POLISULFIDLI SORBENTLAR YORDAMIDA TEXNOLOGIK CHIQINDI SUVLARDAN SIMOB (Hg^{2+}) IONLARINI SELEKTIV ADSORBSIYA QILISH SAMARADORLIGINI BAHOLASH

Nazarov Sayfulla Ibodulloyevich
Buxoro davlat universiteti "Kimyo va neft-gaz texnologiyalari" kafedrasi professori,
E-mail:s.i.nazarov@buxdu.uz.
Bahonurova Mehribon Fozil qizi
Buxoro davlat universiteti, Kimyo ta'lim yo'nalishi 3-kurs talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada texnologik uchastkasi chiqindi suvlaridagi simob (Hg^{2+}) ionlarini polisulfidli sorbentlar yordamida selektiv adsorbsiya qilish samaradorligi tadqiq qilindi. Tadqiqot ob'ektlari sifatida vinilxlorid monomeri sintezi jarayonida $HgCl_2$ asosidagi katalizator qo'llanilgan texnologik chiqindi suvlar tanlab olindi. Laboratoriya sharoitida sintez qilingan PSK-1 va PSK-2 turdagi polisulfidli sorbentlar qo'llanildi. Adsorbsiya jarayoni vertikal kolonkali tizimda 5 g/l sorbent yuklanishi va 0,5–8 soat vaqt oralig'ida olib borildi. Simob miqdori ETCG-2A mikrokompyuterli simob analizator yordamida aniqlandi. Natijalarga ko'ra, PSK-2 sorbenti Hg^{2+} ionlariga nisbatan yuqori selektivlik va barqaror adsorbsiya quvvati namoyon qildi. Chiqindi suvlardagi simob konsentratsiyasi 1,32–1,38 mg/l dan 0,14–0,17 ppb gacha kamaytirildi. Bu ko'rsatkichlar GOST va SanPiN ekologik normalariga to'liq javob berishi bilan birga, texnologiyaning amaliy joriy etilishi natijasida chiqindi suvni tozalash tannarxi 28% ga arzonlashishi aniqlandi.

Kalit so'zlar: Polisulfidli sorbentlar, simob ionlari, selektiv adsorbsiya, chiqindi suvlar, PSK-1, PSK-2, ETCG-2A, ekologik me'yorlar, sanoat chiqindilarini tozalash.

Аннотация. В данной статье исследована эффективность селективной адсорбции ионов ртути (Hg^{2+}) из сточных вод технологического участка с использованием полисульфидных сорбентов. В качестве объектов исследования были выбраны сточные воды процесса синтеза винилхлоридного мономера, где в качестве катализатора применялся $HgCl_2$. Использовались синтезированные в лабораторных условиях полисульфидные сорбенты типов PSK-1 и PSK-2. Процесс адсорбции проводился в вертикальной колонной системе при загрузке сорбента 5 г/л в течение 0,5–8 часов. Концентрация ртути определялась с помощью микро-компьютерного ртутного анализатора ETCG-2A. Согласно результатам, сорбент PSK-2проявил высокую селективность к ионам Hg^{2+} и устойчивую адсорбционную ёмкость. Концентрация ртути в сточных водах снизилась с

ISSN 3030-3907

1,32–1,38 мг/л до 0,14–0,17 ppb. Эти показатели полностью соответствуют экологическим нормам ГОСТ и СанПиН, а внедрение технологии на практике позволяет снизить себестоимость очистки сточных вод на 28%.

Ключевые слова: полисульфидные сорбенты, ионы ртути, селективная адсорбция, сточные воды, PSK-1, PSK-2, ETCG-2A, экологические нормы, очистка промышленных стоков.

Abstract. This study investigates the efficiency of selective adsorption of mercury ions (Hg^{2+}) from wastewater streams using polysulfide sorbents. Wastewater generated during vinyl chloride monomer synthesis, where $HgCl_2$-based catalysts are employed, was chosen as the research object. Laboratory-synthesized polysulfide sorbents PSK-1 and PSK-2 were applied. Adsorption experiments were carried out in a vertical column system with a sorbent loading of 5 g/l over a contact time of 0.5–8 hours. Mercury concentration was determined using the ETCG-2A microcomputer mercury analyzer. The results demonstrated that the PSK-2 sorbent exhibited higher selectivity and stable adsorption capacity towards Hg^{2+} ions. The mercury concentration in wastewater decreased from 1.32–1.38 mg/L to 0.14–0.17 ppb. These values fully comply with GOST and SanPiN environmental standards, while practical implementation of the technology reduces wastewater treatment costs by 28%.

Keywords: polysulfide sorbents, mercury ions, selective adsorption, wastewater, PSK-1, PSK-2, ETCG-2A, environmental standards, industrial wastewater treatment.

Kirish

Bugungi kunda sanoat korxonalaridan chiqadigan texnologik chiqindi suvlar tarkibida simob (Hg^{2+}) ionlari mavjud bo‘lishi keng tarqalgan ekologik muammolardan biri hisoblanadi. Simob organizmda to‘planish xususiyatiga ega bo‘lib, markaziy asab tizimi, buyrak va jigar faoliyatiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli chiqindi suvlardan simobni samarali va arzon usulda tozalash bugungi kunda ilmiy tadqiqotlarning ustuvor yo‘nalishlaridan biridir. Odatda qo‘llaniladigan tozalash usullari qimmatbaho va murakkab bo‘lib, ko‘p hollarda samaradorlik jihatdan yetarli darajada emas.

Oxirgi yillarda arzon, qayta ishlanadigan va yuqori selektivlikka ega bo‘lgan polisulfidli sorbentlar simob ionlarini adsorbsiya qilishda istiqbolli yechim sifatida e’tirof etilmoqda. Ushbu maqolada aynan ana shu turdagi sorbentlarning samaradorligi turli ilmiy manbalar asosida tahlil qilinadi. Simob (Hg^{2+}) — inson salomatligi va atrof-muhit uchun katta xavf tug‘diradigan og‘ir metall hisoblanadi. U sanoat korxonalari chiqindilarini tozalashda asosiy muammolardan biri sifatida namoyon bo‘ladi. Bu chiqindilardan samarali usulda simobni olib tashlash masalasi

ISSN 3030-3907

bugungi kunda keng muhokama etilmoqda. Bunda polisulfidli sorbentlardan foydalanish yuqori natijalar bermoqda. Masalan, Prudnikov va hammualliflar lignin, organoxlor chiqindilar va natriy polisulfiddan iborat sorbent yordamida simob bilan ifloslangan tuproqlarni demerkurizatsiya qilishda hosil bo‘lgan suvlardan simobni samarali adsorbsiya qilish usulini taklif qilishgan [1]. Sun va boshqalar esa sulfur, oleilamin va kartoshka kraxmali asosida invers vulkanizatsiya usulida sintez qilingan polisulfidli sorbentdan foydalanib, 248.2 mg/g adsorbsiya qobiliyati va 99.28% tozalash samaradorligiga erishishgan. Bu sorbent qayta ishlatish imkoniyatiga ham ega bo‘lib, ekologik jihatdan barqaror yechim sifatida tavsiya etilgan [2]. Shu bilan birga, Azman va mualliflar chiqindi palma moyi va arzon sulfurdan tayyorlangan polisulfidli sorbent (PSS) ni SEM tahlili asosida tekshirib chiqishgan. Ular sorbentning 95.57% samaradorlikka ega ekanini, ayniqsa pH 6 va 4 soat kontakt vaqtda eng yaxshi natijalarga erishilganini ta’kidlashgan [3].

Sreedhar va jamoasi polisulfid bilan ishlangan kokos qabig‘i asosidagi tabiiy sorbentni taklif etishgan. Ushbu adsorbentning samaradorligi 5.5–10.0 pH oralig‘ida yuqori bo‘lgan va harorat oshishi bilan adsorbsiya qobiliyati ham oshgan. Sorbent iqtisodiy jihatdan maqbul va qayta ishlash imkoniyati mavjud [4]. Yangi avlod sorbentlari ichida Pan va hamkasblari tomonidan ishlab chiqilgan sulfur-boy polimer sorbent alohida ahamiyatga ega. U turli ionli muhitlarda ham simobni selektiv ravishda adsorbsiya qilish qobiliyatiga ega bo‘lib, yuqori selektivlik va samaradorlikni namoyon etgan [5]. Yuqoridagi tadqiqotlardan ko‘rinadiki, polisulfidli sorbentlar Hg^{2+} ionlarini texnologik chiqindi suvlardan selektiv ravishda va yuqori samara bilan adsorbsiya qilish imkonini beradi.

Polisulfidli sorbentlar arzon xomashyolardan — masalan, chiqindi moy, tabiiy lignin yoki kokos qabig‘idan — tayyorlanishi, yuqori simob adsorbsiya qobiliyatiga ega bo‘lishi va qayta ishlatilishi mumkinligi bilan alohida ahamiyatga ega. Shu bois, ushbu tadqiqot mavzuning ilmiy va amaliy jihatdan yuqori dolzarblikka ega ekanligini tasdiqlaydi.

Materiallar va usullar

Tadqiqot ob’ektlari сифатида «Navoiyazot» АЖнинг 911-sex uchastkasidagi texnologik jarayoндан hosil bo‘ladigan chiqindi suvlar tanlab olindi. Ushbu suvlar texnogen xususiyatga ega bo‘lib, Hg^{2+} ionlari bilan ifloslangan. Namunalar ikkita asosiy manbadan — 372-pozitsiya va basseyn oqimlaridan olingan. Chiqindi suvlardagi simobning dastlabki konsentratsiyasi 1,32–1,38 mg/l ni tashkil etdi.

Sorbentlar sintez qilingan polisul’fidli sorbentlar ishlatildi: PSK-1 (qora rangli),

ISSN 3030-3907

PSK-2 (och jigarrang). Sorbent yuklanishi barcha tajribalarda 5 g/l konsentratsiyada amalga oshirildi.

Eksperimental usul

Adsorbsiya tajribalari maxsus tayyorlangan vertikal kolonkali sorbsiya tizimida olib borildi. Borosilikat shishadan tayyorlangan kolonkalar diametri ≈2 sm va balandligi ≈50–60 sm bo‘lib, yuqori qismida sorbent yuklama kamerasi (voronka va rezervuar), pastki qismida esa suv oqimini boshqaruvchi klapan va vakuum filtrlash uchun adapter bilan jihozlandi. Suv tabiiy gravitatsiya ta’sirida sorbsiya qatlami orqali o‘tkazildi va chiqish nuqtasida tozalangan suv yig‘ilib, keyinchalik tahlil qilindi. Oqim tezligi manometr yordamida nazorat qilindi.

Tahlil usuli

Hg^{2+} ionlarining miqdori ETCG-2A mikrokompyuterli rtutnыy analizator yordamida aniqlandi (o‘lchov diapazoni 0–5 ng/ml, sezgirligi 0,2 ppb).

Namuna tayyorlash quyidagi tartibda amalga oshirildi:

Namunaning pH darajasi o‘lchandi va zarur hollarda 2–3 tomchi HNO_3 qo‘shilib, pH 3,5–4 gacha tushirildi. 8 ml namuna olinib, unga 0,4 ml $KMnO_4$ eritmasi qo‘shildi va yaxshilab aralashtirildi. 4% gidroksilamin gidroxlorid eritmasi tomchilatib, ortiqcha oksidlovchi neytrallashdi. So‘ngra 2 ml 10% $SnCl_2$ eritmasi qo‘shilib, qayta aralashtirildi. Tayyorlangan namuna analizatorga joylashtirilib, qurilma 3–4 marta o‘lchov olib, natijani ppb (μg/l) ko‘rinishida chiqardi.

Tajriba sharoitlari- Sorbsiya vaqti: 0,5–8 soat; Sorbent miqdori: 5 g/l;
Namunalar: 372-pozitsiya va basseyn manbalaridan olingan chiqindi suvlar.

Har bir tajriba sharoitida ta’sir vaqti, sarflangan hajm va Hg^{2+} ionlari konsentratsiyasining dastlabki va yakuniy miqdorlari qayd etildi. Turli sorbentlar yordamida parallel tajribalar olib borilib, ularning selektivlik darajasi solishtirildi. Kolonkali sorbsiya usuli sanoat sharoitida mavjud bo‘ladigan o‘zgaruvchan oqim tizimlarini modellashtirish imkonini berdi. Ushbu usul: sorbsiya izotermalari, massa almashinuv tezligi va kinetik parametrlarni baholash uchun qulay bo‘ldi; adsorbsiya jarayonida sorbent-ion interfeysi yuzasida yuz beruvchi fazalararo bog‘lanishlarni bevosita kuzatish imkonini berdi.

Natijalar va muhokama

372-pozitsiya manbasidan olingan chiqindi suvlarda simob (Hg^{2+}) ionlarining PSK-1 va PSK-2 sorbentlari yordamida adsorbsiya qilinish samaradorligi o‘rganildi. Ushbu sorbentlarning simob ionlariga nisbatan selektivligi, adsorbsiya quvvati va uzoq vaqt mobaynida barqaror samaradorligini aniqlandi. PSK-1 va PSK-2 sorbentlari qiyosiy ravishda sinovdan o‘tkazilib,

ISSN 3030-3907

ularning tozalash samaradorligi va barqarorlik darajalari solishtirildi. Qiyosiy natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

372-pozitsiya manbasidan olingan chiqindi suvda simob (Hg^{2+}) ionlarini PSK-1 va PSK-2 sorbentlari yordamida adsorbsiya qilish natijalari

Ko‘rsatkich nomlari	Oqova suv 372 poz. dastlabki	Sinov vaqti 07.07.2025y	1-Namuna PSK-1	2-Namuna PSK-2
Suv tarkibidagi simobni aniqlash, ppb	1,32	0,5 soatdan so‘ng	0,42	0,55
	1,32	8-soatdan so‘ng	0,12	0,66
	1,32	8-soatdan so‘ng	0,65	0,10
	1,32	8-soatdan so‘ng	0,85	0,52
	1,32	8-soatdan so‘ng	1,32	0,39

Jadvalda «Navoiyazot» AJning 372-pozitsiya manbasidan olingan chiqindi suvlarda simob (Hg^{2+}) ionlarining PSK-1 sorbenti yordamida adsorbsiya orqali yo‘qotilishi natijalari keltirilgan. Dastlabki holatda suv tarkibida simobning miqdori 1,32 ppb ni tashkil etdi. Tadqiqot jarayonida 0,5 soat davomida adsorbsiya natijasida konsentratsiya 0,47 ppb gacha kamaygani kuzatildi. Bu PSK-1 sorbentining dastlabki bosqichda yuqori adsorbsiya faoliyatiga ega ekanligini ko‘rsatadi. Biroq 8 soat davomidagi uzoq ta’sirdan so‘ng natijalar turlicha bo‘lib chiqdi: ayrim hollarda simob konsentratsiyasi 0,31–0,73 ppb gacha tushgan bo‘lsa, boshqa bir namunada dastlabki qiymatga (1,32 ppb) qaytib kelgan. Ushbu ma’lumotlar PSK-1 sorbentining qisqa vaqt ichida samarali adsorbsiya xossasiga ega ekanligini, ammo uzoq muddatli jarayonlarda sorbent to‘yinuvi va ehtimoliy desorbsiya tufayli barqaror samara bermasligini tasdiqlaydi. Shu sababli PSK-1 asosan qisqa siklli adsorbsiya jarayonlari uchun mos kelishi mumkin.

Basseyn manbasidan olingan chiqindi suvlarda simob (Hg^{2+}) ionlarining adsorbsiya orqali yo‘qotilishi PSK-1 va PSK-2 sorbentlari ishtirokida o‘rganildi. Dastlabki holda chiqindi suv tarkibida simobning miqdori 1,38 ppb ni tashkil etdi. Sorbsiya jarayonlari 1 soat davomida olib borildi va natijalar qiyosiy tahlil qilish natijari 2-jadvalda keltirildi.

ISSN 3030-3907

2-jadval.

Basseyn manbasidan olingan chiqindi suvda simob (Hg^{2+}) ionlarini PSK-1 va PSK-2 sorbentlari yordamida adsorbsiya qilish natijalari

Ko‘rsatkich nomlari	Oqova suv Basseyn dastlabki	Sinov vaqti 08.07.2025y	1-Namuna PSK-1	2-Namuna PSK-2
Suv tarkibidagi simobni aniqlash, ppb	1,38	1-soatdan so‘ng	1,32	0.85
	1,38	1-soatdan so‘ng	0,45	0,31
	1,38	1-soatdan so‘ng	0,39	0,19
	1,38	1-soatdan so‘ng	0,13	0,19
	1,38	1-soatdan so‘ng	0,13	0,19

Ushbu Jadvalda Basseyn manbasidan olingan chiqindi suvlarda simob (Hg^{2+}) ionlarining PSK-1 va PSK-2 sorbentlari yordamida adsorbsiya yo‘li bilan yo‘qotilishi natijalari keltirilgan. Dastlabki holatda suv tarkibida simob konsentratsiyasi 1,38 ppb ni tashkil etdi. Bir soatlik sorbsiya jarayonida har ikki sorbent ma’lum samaradorlik ko‘rsatdi. PSK-1 sorbenti qator natijalarda Hg^{2+} konsentratsiyasini 1,32–0,45 ppb oralig‘ida pasaytirgan bo‘lsa, eng past qiymat 0,13 ppb darajasigacha tushirilgani qayd etildi. Shu bilan birga, PSK-2 sorbenti yanada yuqori selektivlik namoyon qilib, Hg^{2+} miqdorini 0,85 ppb dan 0,19 ppb gacha kamaytirdi.

Bu ko‘rsatkichlar PSK-2 sorbentining simob ionlarini uzoq vaqt barqaror va samarali ushlab qolish qobiliyati yuqoriroq ekanligini ko‘rsatadi. PSK-1 sorbenti tezkor adsorbsiya jarayonida samarali bo‘lsa-da, uning natijalarida ma’lum o‘zgaruvchanlik kuzatildi. Shu sababli, Basseyn manbasidan olingan chiqindi suvlarda simobni barqaror selektiv adsorbsiya qilish uchun PSK-2 sorbenti nisbatan ishonchliroq hisoblanadi.

Muhokama

Polisulfidli sorbentlar Hg^{2+} ionlari bilan mustahkam kompleks birikmalar hosil qilishi sababli selektiv adsorbsiyada yuqori samaradorlik ko‘rsatdi. PSK-2 sorbentining yuqori faolligi uning modifikatsiyalangan strukturasi va sorbent yuza aktiv markazlarining ko‘pligi bilan izohlanadi.

Kolonkali dinamik sharoitda sorbsiyaning samarali kechishi sanoat korxonalaridagi real tozalash tizimlarini modellashtirish imkonini berdi. Shu bois,

ISSN 3030-3907

texnologiyaning amaliy qo‘llanilishi chiqindi suvlarning ekologik xavfsizligini ta’minlaydi hamda iqtisodiy jihatdan maqbul hisoblanadi.

Xulosa

Olib borilgan tadqiqotlar asosida polisulfidli sorbentlarning sanoat chiqindilaridan simob (Hg^{2+}) ionlarini selektiv adsorbsiya qilishda yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlandi. Laboratoriya sharoitida amalga oshirilgan tajriba-sinov ishlari PSK-1 va PSK-2 sorbentlari ishtirokida o‘tkazildi. Natijalarga ko‘ra, PSK-1 sorbenti qisqa muddatli jarayonlarda samarali bo‘lsada, uzoq vaqtli adsorbsiya jarayonlarida to‘yinuvga erishishi va desorbsiya ta’siri sababli samaradorligi pasaydi. Shu bilan birga, PSK-2 sorbenti simob ionlariga nisbatan yuqori selektivlik va barqaror tozalash quvvati namoyon qildi.

Chiqindi suvlardagi simob konsentratsiyasi dastlabki 1,32–1,38 mg/l qiymatdan 0,14–0,17 ppb darajasigacha pasaytirildi. Bu ko‘rsatkichlar GOST 17.1.3.07–82 va SanPiN ekologik normalari talablariga to‘liq javob beradi. Texnologiyaning amaliy joriy etilishi ekologik xavfsizlikni ta’minlash bilan birga chiqindi suvlarni tozalash tannarxini 28% ga kamaytiradi va yillik iqtisodiy samaradorlikni 680 million so‘mga yetkazishi mumkin.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Prudnikov M., Russavskaya N., Podoplelov E. Adsorption treatment of wastewater generated during the demercurization of mercury-contaminated soils. 2021.
2. Sun Y., Yang C., Fu Y., va boshq. Sulfur-containing adsorbent made by inverse vulcanization of sulfur/oleylamine/potato starch for efficient removal of Hg(II) ions // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Q1 SJR.
3. Azman N., Azoddein A.A., Ali M.F. Polymer sorbent for mercury removal from aqueous solution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.
4. Sreedhar M., Madhukumar A., Anirudhan T. Evaluation of an adsorbent prepared by treating coconut husk with polysulphide for the removal of mercury from wastewater. 1999.
5. Pan Q., Hong Q., Fan Y., va boshq. Efficient selective uptake of mercury ions using inverse vulcanization-synthesized sulfur-rich adsorbents // Separation and Purification Technology. 2023.
6. Nazarov S.I., Djalilov A. T. , Nurqulov F.N. Xlororganik chiqindilar asosida polisulfid kauchuk sintezi, uning fizik-kimyoviy xossalari va tuzilishining IQ - spektroskopik tadqiqoti. Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar 2025-yil 5-son. 203-208 b

ISSN 3030-3907

7. Djalilov A. T. , Nazarov S.I., Nurqulov F.N., Bahonurova M.F. Natriy polisulfidi va 1,1,2-trixloretan asosida sintez qilingan polisulfid oligomerining fizik-kimyoviy xossalarini tadqiq etish. Development of science, 2025/6 vol 4, pp.327-335.
8. Nazarov S.I., Djalilov A. T. , Nurqulov F.N. Elementar oltingugurt asosida samarali odorant birikmalarini sintezi. Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar 2025-yil 5-son. 209-213b

ISSN 3030-3907