NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

02.00.00-KIMYO FANLARI
journal.namdu.uz
CHEMICAL SCIENCES

OQOVA SUVLARNI SIMOB(II) IONLARIDAN TOZALASHDA EPIXLORGIDRIN ASOSIDAGI POLIFUNKSIONAL SORBENTNING EKOLOGIK SAMARADORLIGINI BAHOLASH

Allanov Abdigaffor Berdiyorovich
Qarshi davlat universiteti doktoranti, Qarshi shahri, O‘ zbekiston Respublikasi
Nurqulov Fayzulla Nurmuminovich
texnika fanlari doktori, professor, bo‘ lim mudiri, Toshkent kimyo texnologiya ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent shahri, O‘ zbekiston Respublikasi.

Annotatsiya. *Mazkur tadqiqotda oqova suvlarni Hg(II) ionlaridan tozalash uchun epixlorgidrin asosida modifikatsiyalangan kraxmal karbamat polifunksional sorbentining olinishi, strukturaviy xususiyatlari va ekologik samaradorligi baholandi. Kraxmal karbamid bilan funksionallashtirilib, keyinchalik epixlorgidrin yordamida modifikatsiyalandi. Reaksiya davomiyligining mahsulot unumiga ta’siri o‘ rganilib, 3,0 soatda maksimal 83,2 % unum qayd etildi. Sorbentning strukturaviy o‘ zgarishlari IQ-spektroskopiya yordamida tahlil qilinib, C=O, C–N/C–O va C–O–C guruhlariga xos yutilish sohalaridagi siljishlar polimer matritsaning kimyoviy muhitida o‘ zgarish sodir bo‘ lganini ko‘ rsatdi. Termik barqarorlik TGA–DTA usulida baholanib, materialning ko‘ p bosqichli termik parchalanish xususiyati aniqlandi. Hg(II) ionlarini ajratish samaradorligi kolonka sharoitida tekshirildi. KrK–EXG (1:3) sorbenti boshlang‘ ich 1,615 ppb Hg^{2+} konsentratsiyasini 0,0742 ppb gacha kamaytirib, 95,4 % tozalash samaradorligini ta’minladi. Olingan natijalar mazkur sorbentning simob ionlarini saqlovchi oqova suvlarni chuqur tozalashda istiqbolli material ekanligini ko‘ rsatadi.*

Kalit so‘ zlar: *oqova suv, simob(II) ionlari, epixlorgidrin, kraxmal karbamat, polifunksional sorbent, sorbsiya, IQ-spektroskopiya, TGA–DTA, tozalash samaradorligi, ekologik samaradorlik.*

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОРБЕНТА НА ОСНОВЕ ЭПИХЛОРГИДРИНА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ РТУТИ(II)

Аннотация. *В работе исследован модифицированный эпихлоргидрином полифункциональный сорбент на основе карбамата крахмала, предназначенный для удаления ионов Hg(II) из сточных вод. Крахмал предварительно функционализировали карбамидом, после чего осуществляли модификацию эпихлоргидрином. Установлено влияние продолжительности реакции на выход продукта; максимальный выход 83,2 % достигнут при продолжительности процесса 3,0 ч. Структурные изменения сорбента исследованы методом ИК-спектроскопии. Смещения полос поглощения, характерных для групп C=O, C–N/C–O и C–O–C, свидетельствуют об изменении химического окружения функциональных групп полимерной матрицы. Термическая устойчивость материала оценена методом TGA–DTA, выявившим многостадийный характер термической деструкции. Эффективность удаления ионов Hg(II) определена в колонных условиях. Наиболее высокий результат продемонстрировал сорбент KrK–EXG (1:3), снизивший концентрацию Hg^{2+} с 1,615 до 0,0742 ppb при эффективности очистки 95,4 %. Полученные результаты подтверждают перспективность разработанного сорбента для экологически эффективной очистки сточных вод от соединений ртути.*

Ключевые слова: *сточные воды, ионы ртути(II), эпихлоргидрин, карбамат крахмала, полифункциональный сорбент, сорбция, ИК-спектроскопия, TGA–DTA, эффективность очистки, экологическая эффективность.*

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF AN EPICHLOROHYDRIN-BASED POLYFUNCTIONAL SORBENT FOR THE REMOVAL OF MERCURY(II) IONS FROM WASTEWATER

Abstract. *This study evaluates the structural properties and environmental performance of an epichlorohydrin-modified starch carbamate polyfunctional sorbent developed for the removal of Hg(II) ions from wastewater. Starch was initially functionalized with urea and subsequently modified with epichlorohydrin. The effect of reaction time on product yield was investigated, and the maximum yield of 83.2% was achieved after 3.0 h. Structural changes in the sorbent were characterized by FTIR spectroscopy. Shifts in the absorption bands assigned to C=O, C–N/C–O, and C–O–C groups indicated changes in the chemical environment of the polymer matrix after modification. Thermal stability was evaluated by TGA–DTA, revealing a multistage thermal degradation behavior. Hg(II) removal efficiency was examined under column conditions. Among the investigated compositions, the KrK–EXG (1:3) sorbent exhibited the highest performance, decreasing the Hg^{2+} concentration from 1.615 to 0.0742 ppb and achieving a removal efficiency of 95.4%. The*

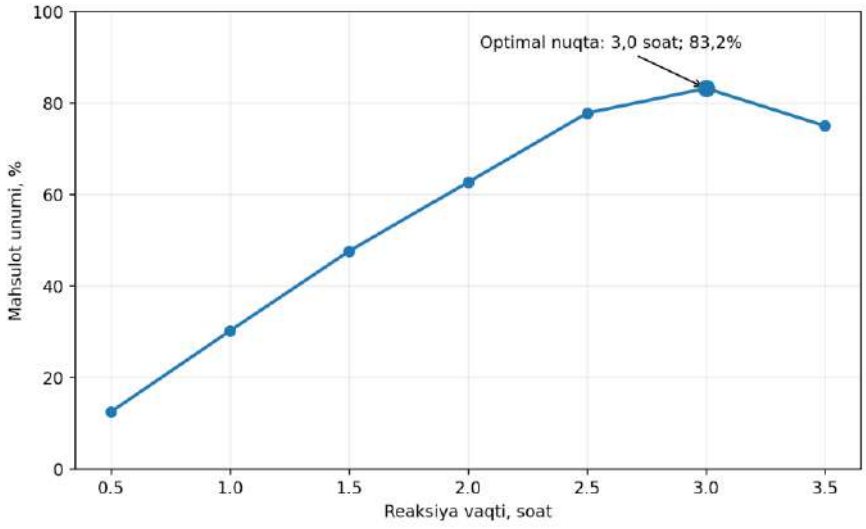
obtained results demonstrate the potential of the developed polyfunctional sorbent for environmentally efficient treatment of mercury-containing wastewater.

Keywords: *wastewater, mercury(II) ions, epichlorohydrin, starch carbamate, polyfunctional sorbent, sorption, FTIR spectroscopy, TGA-DTA, removal efficiency, environmental performance.*

Kirish. Sanoat oqova suvlarida og‘ ir metallar, xususan simob ionlari konsentratsiyasini oshib borishi suv ekotizimlari barqarorligi va inson salomatligi uchun jiddiy ekologik xavf tug‘ diradi. Simob biologik muhitda saqlanib qolishi, oziq zanjirida to‘ planishi va yuqori toksikligi sababli ustuvor nazorat qilinadigan ifloslantiruvchilardan hisoblanadi [1,2]. Oqova suvlarni tozalashda adsorbsiya texnologiyalari soddaligi, energiya sarfining nisbatan pastligi va past konsentratsiyadagi metall ionlarini ajratish imkoniyati bilan istiqbolli yondashuvdir [3,4]. Qayta tiklanuvchi, biologik parchalanadigan va ko‘ p sonli gidroksil guruhlariga ega kraxmal ekologik xavfsiz sorbent matritsasi sifatida alohida ahamiyatga ega. Biroq tabiiy kraxmalning sorbsion faolligi va suv muhitidagi strukturaviy barqarorligi cheklangan bo‘ lib, uni funksionallashtirish va modifikatsiyalash talab etiladi [5, 6, 7]. Karbamid bilan modifikatsiya kraxmal tarkibiga azot saqlovchi faol markazlarni kiritish, epixlorgidrin esa uch o‘ lchamli, suvda erimaydigan polimer tarmog‘ ini shakllantirish imkonini beradi. Bunday yondashuv metall ionlari bilan koordinatsion va boshqa sirt o‘ zaro ta’sirlarini kuchaytirishi mumkin. So‘ nggi tadqiqotlarda kraxmal asosidagi adsorbentlar uchun real oqova suvlar, uzluksiz oqim sharoiti va tuzilish-xossa bog‘ liqligini birgalikda baholash yetarli emasligi qayd etilgan [8]. Bu esa tadqiqotning dolzarbligini oshiradi. Shu nuqtai nazardan, ushbu tadqiqotning maqsadi kraxmal karbamat–epixlorgidrin asosidagi polifunksional sorbentni sintez qilish, uning optimal modifikatsiya sharoitlarini aniqlash, IQ-spektroskopik va TGA-DTA xususiyatlarini tavsiflash hamda Hg^{2+} ionlari bilan ifloslangan texnologik oqova suvni tozalash samaradorligini ekologik mezonlar asosida baholashdan iborat.

Materiallar va metodlar. Kraxmal karbamat sintezi uchun 10 g kraxmal, 3 g karbamid va 0,21 g natriy asetat ishlatildi. Karbamid va katalizator 30 ml distillangan suvda eritilib, kraxmal bilan 40–50 °C da 1 soat aralashtirildi. Mahsulot filtrlandi, 102–105 °C da 4 soat termik ishlovdan o‘ tkazildi va suvda eruvchan qoldiqlarni chiqarish uchun 4–5 marta distillangan suv bilan yuvildi. Keyingi modifikatsiyada kraxmal karbamat epixlorgidrin bilan turli massa nisbatlarida (1:1, 1:2 va 1:3) ishlov berildi; namunaviy sintezda 5,0 g kraxmal karbamatga 2,5 g epixlorgidrin qo‘ shilib, sistema 60 °C da aralashtirildi va 130 °C da 2 soat termik ishlov berildi. Reaksiya davomiyligining unumga ta’siri 0,5–3,5 soat oralig‘ ida baholandi. Strukturaviy o‘ zgarishlar SHIMADZU IRAffinity-1S FTIR spektrometrida, termik barqarorlik TGA-DTA usulida o‘ rganildi. Hg^{2+} sorbsiyasi kolonka sharoitida tekshirilib, qoldiq simob ETsG-2A analizatorida aniqlandi. Har bir tajriba besh marta takrorlandi; tozalash samaradorligi $\eta=((C_0-C_e)/C_0)\times100\%$ formula bo‘ yicha hisoblandi. Natijalar o‘ rtacha qiymatlarda ifodalandi.

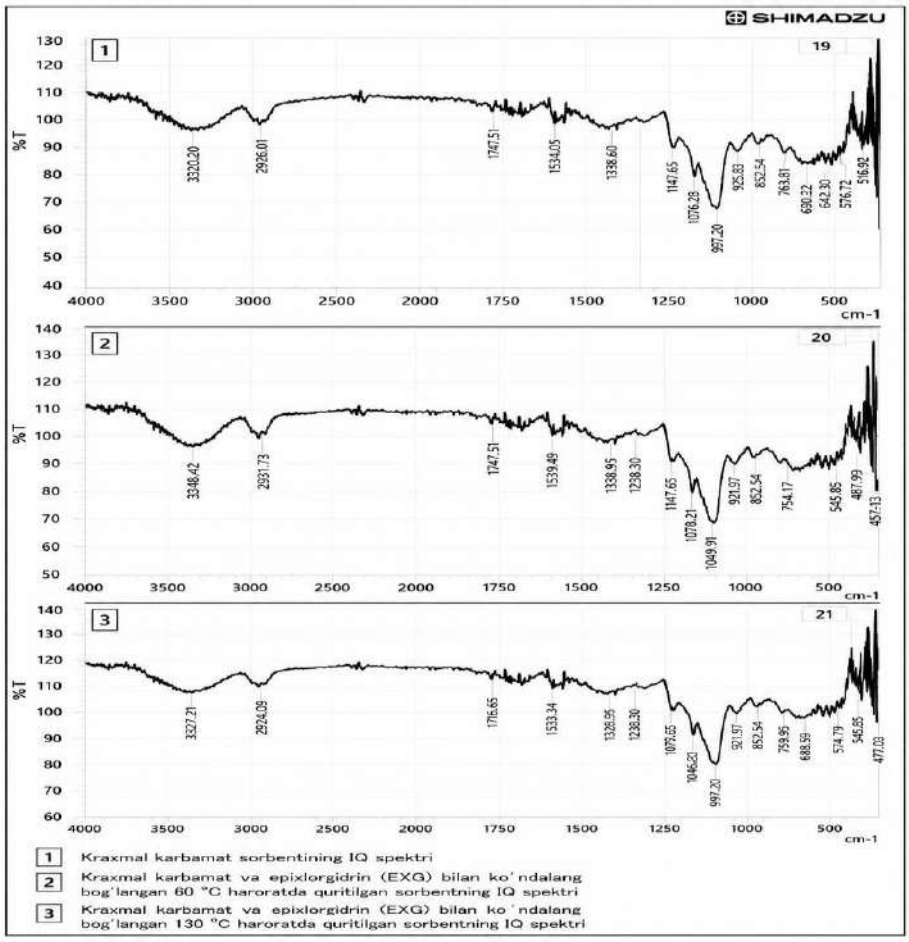
Natijalar va ularning muhokamasi. Kraxmal karbamat–epixlorgidrin asosidagi sorbent sintezi yuqori sorbsion faollik, strukturaviy barqarorlik va ekologik xavfsizlikni ta’minlashga qaratilgan muhim ilmiy-amaliy yo‘ nalish sifatida e’tirof etiladi. Kraxmal qayta tiklanuvchi tabiiy polisaxarid bo‘ lib, makromolekula tarkibidagi ko‘ p sonli gidroksil guruhlari uning kimyoviy funksionallashtirilishiga imkon beradi. Reaksiya davomiyligining mahsulot unumiga ta’siri va optimal vaqtini aniqlash. Modifikatsiyalaish jarayonining davomiyligi mahsulot unumiga sezilarli ta’sir ko‘ rsatgan. Reaksiya vaqti 0,5 soatdan 3,0 soatgacha oshirilganda unum 12,5 % dan 83,2 % gacha ortgan. 3,5 soatga uzaytirilganda esa unum 75,0 % gacha kamaygan. Shu sabab 3,0 soat tajriba qatoridagi optimal reaksiya davomiyligi sifatida qabul qilinadi.



1-rasm. Kraxmal karbamatning epixlorgidrin bilan modifikatsiyalashreaksiyasi unumining vaqtga bog‘ liqligi

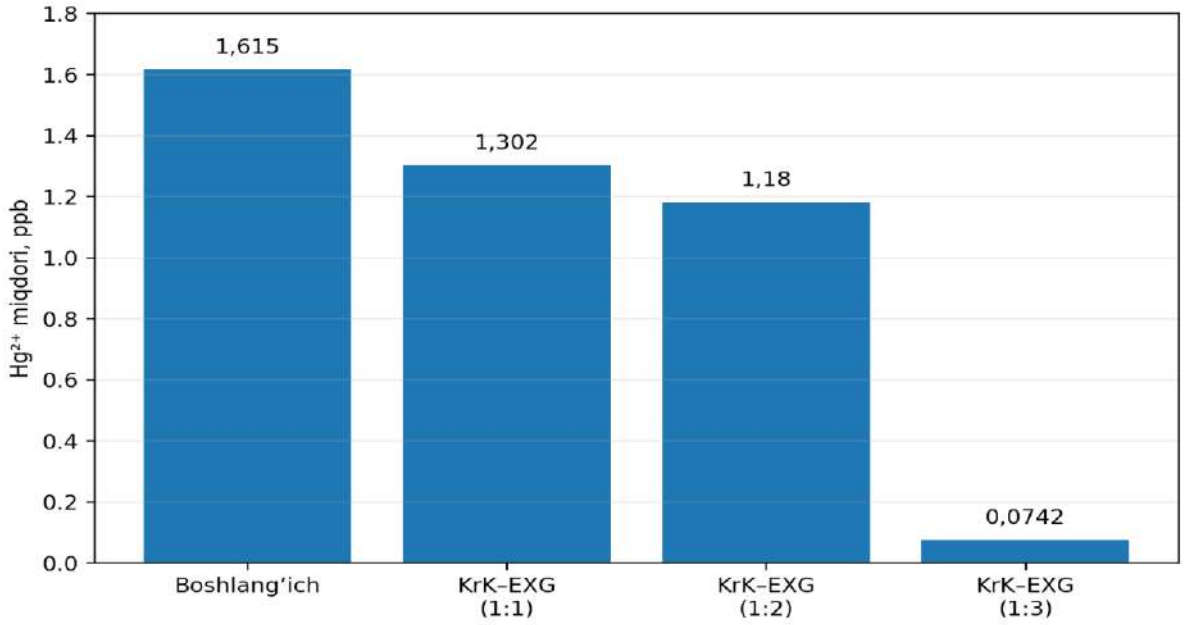
Grafikda 0,5–3,0 soat oralig‘ ida unumning uzluksiz oshishi reaksiyaning kinetik rivojlanishini ifodalaydi. 3,0 soatdan keyingi pasayish uzoq termik ta’sir sharoitida yon jarayonlar, funksional guruhlarning qisman o‘ zgarishi yoki yuvish jarayonidagi mahsulot yo‘ qotishlari bilan bog‘ liq bo‘ lishi mumkin.

KrK–EXG sorbentining IQ-spektroskopik tahlili. IQ-spektroskopik tadqiqot KrK–EXG namunasini 60°C haroratdagi modifikatsiyasi 3348,42 sm^{-1} sohadagi keng yutilish –OH va –NH guruhlarining valent tebranishlariga; 2933,73 sm^{-1} signal alifatik C–H bog‘ lariga; 1747,51 sm^{-1} yutilish esa karbonil C=O guruhiga moslashtirilgan. 1543,05 sm^{-1} soha N–H deformatsion va C–N tebranishlari, 1143,79; 1076,28 va 1004,91 sm^{-1} sohalar esa asosan C–O va C–O–C bog‘ lari bilan bog‘ langan. KrK–EXG namunasi 130 °C termik ishlovdan keyingi qiyosiy tahlilda eng muhim o‘ zgarish karbonil sohasida qayd etilgan: C=O signali 1747,51 sm^{-1} dan 1716,65 sm^{-1} gacha siljigan. Shuningdek C–N/C–O sohasida taxminan 1338,60 → 1328,95 sm^{-1} va C–O–C sohasida 1049,91 →1046,63 sm^{-1} siljishlar keltirilgan. Bunday o‘ zgarishlar funksional guruhlarning lokal elektron va vodorod-bog‘ lanish muhiti o‘ zgarganini ko‘ rsatadi hamda modifikatsiyalash natijasidagi strukturalarni bog‘ lanishi deb qarash mumkin.



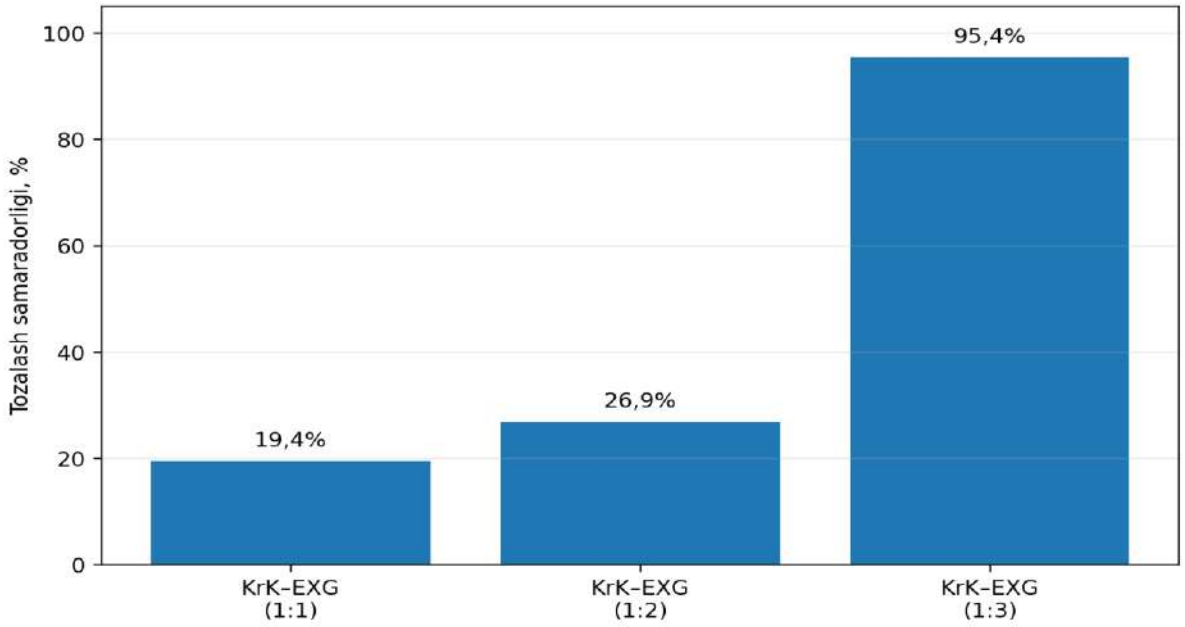
2-rasm. - Kraxmal karbamat va uning epixlorgidrin (EXG) bilan ko‘ ndalang bog‘ langan hosilalarining IQ-spektrlaridagi strukturaviy o‘ zgarishlar: 1 — kraxmal karbamat; 2 — epixlorgidrin bilan ko‘ ndalang bog‘ langan va 60 °C da quritilgan KrK–EXG sorbenti; 3 — epixlorgidrin bilan ko‘ ndalang bog‘ langan va 130 °C da termik ishlov berilgan KrK–EXG sorbenti.

KrK–EXG sorbentini Hg^{2+} ionlarini sorbsiyalash va oqova suvni tozalash samaradorligi. KrK–EXG sorbentlarining amaliy samaradorligi tarkibida Hg^{2+} ionlari mavjud texnologik oqova suvni kolonka usulida tozalash orqali baholangan. Boshlang‘ ich eritmadagi Hg^{2+} miqdori 1,615 ppb bo‘ lgan. KrK–EXG (1:1) namunasidan keyin qoldiq konsentratsiya 1,302 ppb, KrK–EXG (1:2) da 1,180 ppb va KrK–EXG (1:3) da 0,0742 ppb ni tashkil etgan. Har bir sinov besh marta takrorlangan va jadvalda o‘ rtacha qiymatlar berilgan.



3-rasm. KrK–EXG tarkibiga bog‘ liq holda oqova suvdagi qoldiq Hg^{2+} miqdorining o‘ zgarishi

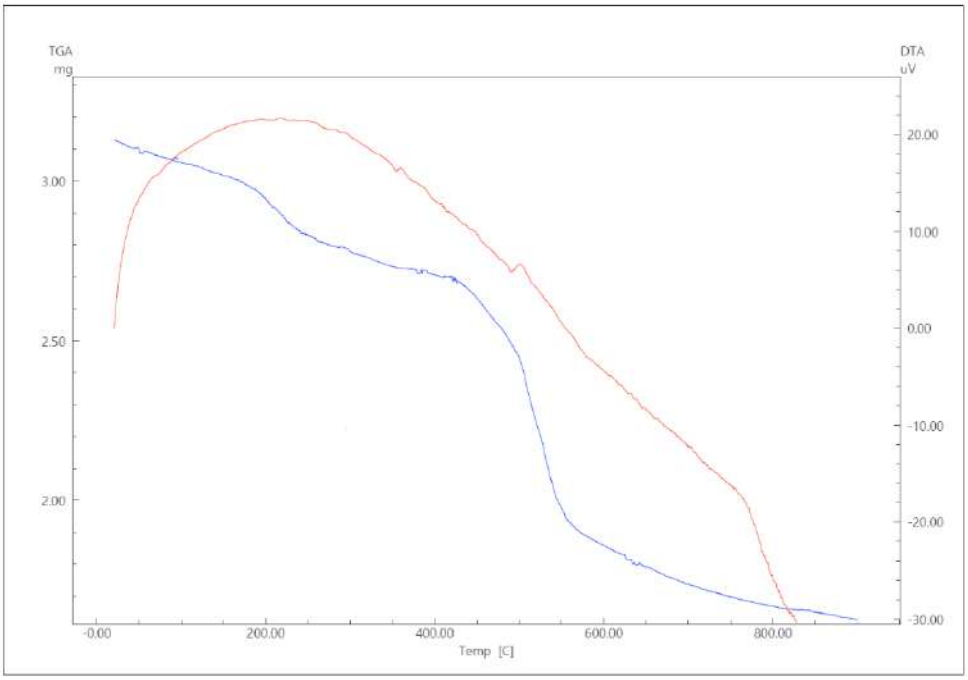
Tozalash samaradorligi $\eta = ((C_0 - C_e)/C_0) \times 100$ % ifoda orqali hisoblanadi. Bu yerda C_0 — boshlang‘ ich Hg^{2+} konsentratsiyasi, C_e — sorbentdan o‘ tkazilgandan keyingi qoldiq konsentratsiya. Hisoblangan qiymatlar 1:1, 1:2 va 1:3 tarkiblar uchun mos ravishda 19,4; 26,9 va 95,4 % ni tashkil etadi.



4-rasm. KrK–EXG sorbentlari bilan Hg^{2+} ionlarini chiqarib tashlash samaradorligi

KrK–EXG sorbentlarini 1:1 dan 1:2 nisbatga o‘ tishda samaradorlik nisbatan oshganligi aniqlandi. KrK–EXG sorbentini 1:3 tarkibda 95,4 % gacha keskin ko‘ tarilish kuzatildi. Bu natija KrK–EXG (1:3) namunasida Hg^{2+} ionlarini ushlab qolishga qulayroq strukturaviy va funksional muhit shakllanganini ko‘ rsatadi.

KrK–EXG (1:3) namunasining DTG tahlili. KrK–EXG (1:3) polifunksional sorbentining termik barqarorligi TGA-DTA usuli yordamida baholandi. Termogramma materialning qizdirish jarayonida ko‘ p bosqichli termik o‘ zgarishga uchrashini ko‘ rsatadi. Dastlabki, taxminan 25-200 °C oralig‘ ida massa yo‘ qotilishi nisbatan kichik bo‘ lib, bu sorbent yuzasi va polimer matritsasida fizik adsorbsiyalangan hamda kuchsiz bog‘ langan suvning ajralishi bilan izohlanadi. 200-430 °C diapazonda massa asta-sekin kamayib, karbamat fragmentlarining qisman parchalanishi va polisaxarid skeletining dastlabki destruksiyasi sodir bo‘ lishi mumkin.



5-rasm. Kraxmal karbamat–epixlorgidrin asosidagi KrK–EXG (1:3) sorbentining termik barqarorligini tavsiflovchi TGA va DTA termogrammalari.

Eng muhim termik o‘ zgarish 430-560 °C oralig‘ ida kuzatiladi. Ushbu sohada TGA egri chizig‘ ining keskin pasayishi kraxmal-karbamat skeleti va epixlorgidrin modifikatsiyasi natijasidagi bog‘ lanishlar polimer tarmog‘ ining intensiv destruksiyasiga mos keladi. DTA egri chizig‘ ida ayni harorat oralig‘ iga yaqin termik effektning kuzatilishi ushbu parchalanish jarayoni sezilarli energetik o‘ zgarish bilan kechishini ko‘ rsatadi. 560 °C dan yuqori haroratlarda massa yo‘ qotilishi sekinlashadi va chuqur destruksiya hamda qoldiqning shakllanishi ustunlik qiladi. Termogramma yakunida qoldiq massaning sezilarli darajada saqlanishi material tarkibida yuqori haroratga natijasida koks qatlam hosil bo‘ lishini ko‘ rsatadi.

Umumiy xulosa. Tadqiqot natijalari kraxmalni karbamid bilan funksionallashtirish va keyinchalik epixlorgidrin yordamida modifikatsiyalash orqali suvda erimaydigan, kislorod va azot saqlovchi funksional markazlarga ega polifunksional sorbent olish mumkinligini ko‘ rsatadi. Reaksiya davomiyligi bo‘ yicha 3,0 soatlik ishlov 83,2 % maksimal unum bilan tajriba qatoridagi optimal nuqta bo‘ lgan. IQ-spektroskopiyada C=O, C–N/C–O va C–O–C diapazonlaridagi siljishlar polimer matritsaning kimyoviy muhiti qayta tashkil topganini ko‘ rsatadi.

Hg^{2+} ionlarini chiqarib tashlash bo‘ yicha KrK–EXG (1:3) namuna aniq ustunlik namoyon etib, boshlang‘ ich 1,615 ppb konsentratsiyani 0,0742 ppb gacha kamaytirgan va 95,4 % tozalash samaradorligini ta’minlagan. Shu sabab ushbu tarkib o‘ rganilgan nisbatlar orasida eng istiqbolli sorbent sifatida baholash mumkin.

Adabiyotlar

1. World Health Organization. Mercury and health. WHO Fact Sheet, 2024. WHO simobni inson salomatligi uchun eng muhim kimyoviy xavflardan biri sifatida baholaydi.

2. Yu J.G., Yue B.Y., Wu X.W., et al. Removal of mercury by adsorption: a review. Environmental Science and Pollution Research. 2016;23:5056–5076. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5880-x.

3. Xia M., Chen Z., Li Y., et al. Removal of Hg(II) in aqueous solutions through physical and chemical adsorption principles. RSC Advances. 2019;9:20941–20953. https://doi.org/10.1039/C9RA01924C.

4. Gupta A.D., Rawat K.P., Bhadauria V., Singh H. Recent trends in the application of modified starch in the adsorption of heavy metals from water: A review. Carbohydrate Polymers. 2021;269:117763. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117763.

5. Fang K., Deng L., Yin J., et al. Recent advances in starch-based magnetic adsorbents for the removal of contaminants from wastewater: A review. International Journal of Biological Macromolecules. 2022;218:909–929. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.175.

6. Abd El-Ghany N.A., Abu Elella M.H., Abdallah H.M., et al. Recent Advances in Various Starch Formulation for Wastewater Purification via Adsorption Technique: A Review. Journal of Polymers and the Environment. 2023;31:2792–2825. https://doi.org/10.1007/s10924-023-02798-x.

7. Khoo P.S., Ilyas R.A., Uda M.N.A., et al. Starch-Based Polymer Materials as Advanced Adsorbents for Sustainable Water Treatment: Current Status, Challenges, and Future Perspectives. Polymers. 2023;15(14):3114. https://doi.org/10.3390/polym15143114.

8. Zhuang J., Fan W., Ji M. Starch-based hydrogels for heavy metal remediation: A critical review of progress, pitfalls, and rational design. Carbohydrate Research. 2026;565:109941. https://doi.org/10.1016/j.carres.2026.109941.

9. Costa T.B., Matias P.M.C., Sharma M., Murtinho D., Rosa D.S., Valente A.J.M. Recent Advances on Starch-Based Adsorbents for Heavy Metal and Emerging Pollutant Remediation. Polymers. 2025;17(1):15. https://doi.org/10.3390/polym17010015