OQAVA SUVLARNI OG‘IR METALL IONLARIDAN TOZALASHDA IONITLARDAN FOYDALANISH

Shodiyev Sobir Vaxobjonovich
Buxoro davlat tibbiyot instituti “Tibbiy va biologik kimyo” kafedrasi assistenti(PhD).

Annotatsiya. Ushbu maqolada sanoat oqava suvlarini og‘ir metall ionlaridan tozalashda ion almashinuvchi materiallardan foydalanishning ilmiy asoslari tahlil qilingan. Og‘ir metall ionlarining suv muhitidagi asosiy manbalari, ularning ekologik xavfi va suvdan samarali ajratish zaruriyati yoritilgan. Kationit, anionit, amfoter hamda funksionallashgan gibrid ionitlarning Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+} va Cr ionlarini ajratishdagi imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Ion almashinish, elektrostatik tortishish, kompleks hosil bo‘lish va sirt adsorbsiyasi kabi jarayonlarning metall ionlarini ushlab qolishdagi roli tahlil qilingan. Eritmaning pH qiymati, ionit dozasi, kontakt vaqti, boshlang‘ich konsentratsiya, harorat va raqobatlashuvchi ionlarning jarayon samaradorligiga ta’siri muhokama qilingan. Shuningdek, ion almashinish sig‘imi, selektivlik va regeneratsiya jarayonlari muhim texnologik parametrlar sifatida baholangan. Zamonaviy yondashuv sifatida noorganik–organik gibrid ionitlardan foydalanishning afzalliklari ko‘rsatilib, kremnezem asosidagi funksionallashgan materiallarning og‘ir metall ionlarini selektiv ajratishdagi istiqbollari asoslangan.

Kalit so‘zlar: og‘ir metall ionlari, oqava suv, ionit, kationit, anionit, ion almashinish, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, selektivlik, regeneratsiya, gibrid ionit.

Аннотация. В данной статье проанализированы научные основы использования ионообменных материалов для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжёлых металлов. Рассмотрены основные источники поступления ионов тяжёлых металлов в водную среду, их экологическая опасность и необходимость эффективного удаления из воды. Изучены возможности катионитов, анионитов, амфотерных, а также функционализированных гибридных ионитов для извлечения ионов Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+} и Cr. Проанализирована роль таких процессов, как ионный обмен, электростатическое взаимодействие, комплексообразование и поверхностная адсорбция в удерживании ионов металлов. Обсуждено влияние значения pH раствора, дозы ионита, времени контакта, начальной концентрации, температуры и конкурирующих ионов на эффективность процесса. Кроме того, такие параметры, как ионообменная ёмкость, селективность и процессы регенерации, рассмотрены в качестве важных технологических характеристик. В качестве современного подхода показаны преимущества использования неоргано-органических гибридных ионитов, а также обоснованы

ISSN 3030-3907

перспективы применения функционализированных материалов на основе кремнезёма для селективного извлечения ионов тяжёлых металлов.

Ключевые слова: ионы тяжёлых металлов, сточные воды, ионит, катионит, анионит, ионный обмен, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, селективность, регенерация, гибридный ионит.

Abstract. This article analyzes the scientific foundations of using ion-exchange materials for the removal of heavy metal ions from industrial wastewater. The main sources of heavy metal ions in aquatic environments, their environmental hazards, and the necessity of their effective removal from water are discussed. The potential of cation-exchange resins, anion-exchange resins, amphoteric ion exchangers, and functionalized hybrid ion-exchange materials for the removal of Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, and Cr ions is considered. The roles of ion exchange, electrostatic attraction, complex formation, and surface adsorption in the retention of metal ions are analyzed. The effects of solution pH, ion-exchange material dosage, contact time, initial metal-ion concentration, temperature, and competing ions on the efficiency of the process are discussed. Furthermore, ion-exchange capacity, selectivity, and regeneration processes are evaluated as important technological parameters. As a modern approach, the advantages of using inorganic–organic hybrid ion-exchange materials are highlighted, and the prospects of silica-based functionalized materials for the selective removal of heavy metal ions are substantiated.

Keywords: heavy metal ions, wastewater, ion-exchange resin, cation exchanger, anion exchanger, ion exchange, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, selectivity, regeneration, hybrid ion exchanger.

KIRISH.

Sanoatning rivojlanishi bilan bir qatorda metallurgiya, konchilik, galvanika, mashinasozlik, kimyo, neft-gaz, akkumulyator ishlab chiqarish va boshqa tarmoqlardan hosil bo‘ladigan oqava suvlar tarkibida og‘ir metall ionlarining miqdori ortib bormoqda. Qo‘rg‘oshin, kadmiy, mis, nikel, rux, xrom va boshqa metallarning suv muhitiga tushishi ekologik tizimlarning barqarorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

Og‘ir metallarning asosiy xavfi ularning biologik parchalanmasligi va suv, tuproq hamda tirik organizmlarda to‘planish xususiyatiga ega ekanligidir. Shu sababli bunday komponentlarni oqava suvdan samarali ajratish va hosil bo‘lgan chiqindilarni xavfsiz boshqarish muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Og‘ir metall ionlarini suvdan chiqarishda kimyoviy cho‘ktirish, koagulyatsiya, membranali texnologiyalar, elektrokimyoviy usullar, ekstraksiya, adsorbsiya va ion almashinish kabi usullar qo‘llanadi. Ushbu usullar orasida ion almashinish texnologiyasi yuqori almashinish sig‘imi, jarayonni boshqarish

ISSN 3030-3907

imkoniyati va ionitlarni regeneratsiya qilib qayta foydalanish imkoniyati bilan ajralib turadi.

Ayniqsa, ionitlarning funksional guruhlarini maqsadli modifikatsiya qilish orqali muayyan metall ionlariga nisbatan selektivligini oshirish mumkin. Shu sababli so‘nggi tadqiqotlarda oddiy ion almashinuvchi smolalardan tashqari funksionallashgan polimerlar, mineral ionitlar, kompozitlar va noorganik–organik gibrid materiallarga katta e’tibor qaratilmoqda.

1. Og‘ir metall ionlarining suv muhitidagi asosiy manbalari

Og‘ir metall ionlari tabiiy geokimyoviy jarayonlar natijasida ham suvga tushishi mumkin. Biroq ko‘plab hududlarda ularning suv muhitidagi miqdorining ortishida antropogen faoliyat asosiy omillardan biri hisoblanadi.

Metallurgiya korxonalaridan tarkibida Fe, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb va boshqa metall ionlari bo‘lgan oqava suvlar hosil bo‘lishi mumkin. Galvanik ishlab chiqarish jarayonlarida esa xrom, nikel, mis, rux va boshqa metall ionlari oqava suv tarkibiga o‘tadi.

Konchilik va rudalarni qayta ishlash korxonalarida metall ionlari bilan bir qatorda sulfat va boshqa mineral komponentlar ham uchrashi mumkin. Akkumulyator ishlab chiqarish va qayta ishlash jarayonlari qo‘rg‘oshin va boshqa metallarning muhim manbalaridan biri hisoblanadi.

Qishloq xo‘jaligi faoliyatida ayrim metall saqlovchi preparatlarning uzoq muddat qo‘llanishi ham tuproq va suv muhitida metall ionlari to‘planishiga sabab bo‘lishi mumkin.

Shuning uchun oqava suvlarni tozalash texnologiyasini tanlashda nafaqat bitta metall ionining konsentratsiyasi, balki suvning umumiy ion tarkibi, pH qiymati va raqobatlashuvchi ionlarning mavjudligi ham hisobga olinishi kerak.

2. Ionitlarning og‘ir metall ionlarini ajratish mexanizmi

Og‘ir metall ionlarini ionit yordamida ajratish jarayonida bir nechta fizik-kimyoviy mexanizm bir vaqtda sodir bo‘lishi mumkin.

Kationitlarda manfiy zaryadlangan funksional guruhlar mavjud bo‘lib, ular eritmadagi metall kationlari bilan almashinadi. Masalan, vodorod shaklidagi kationit uchun jarayonni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$2R–H + M^{2+} \rightleftharpoons R_2–M + 2H^+$$

Bu yerda R — ionitning harakatsiz funksional qismi, M^{2+} — ikki valentli metall kationi.

Natriy shaklidagi kationit uchun:

$$2R–Na + M^{2+} \rightleftharpoons R_2–M + 2Na^+$$

ko‘rinishidagi almashinish sodir bo‘lishi mumkin.

Agar ionit tarkibida karboksil guruhlari mavjud bo‘lsa, ular metall ionlari bilan kompleks yoki koordinatsion bog‘lar hosil qilishi mumkin:

ISSN 3030-3907

$$2R–COO^- + M^{2+} \rightarrow (R–COO)_2M$$

Amin, fosfonat, fosfat va boshqa ligand tabiatli funksional guruhlar ham metall ionlari bilan kuchli o‘zaro ta’sirlashishi mumkin.

Shu sababli gibrid ionitlarda metall ionini ushlab qolish faqat klassik ion almashinish bilan cheklanmasligi mumkin. Ion almashinish, kompleks hosil qilish va adsorbsiyaning birgalikdagi ta’siri umumiy tozalash samaradorligini oshirishi mumkin.

3. Kationitlarning og‘ir metall ionlarini ajratishdagi roli

Kation almashinuvchi ionitlar og‘ir metall kationlarini suvdan ajratishda eng ko‘p o‘rganilgan materiallar qatoriga kiradi. Ularning asosiy faol markazlari sulfonat, karboksil, fosfonat va boshqa kislotali funksional guruhlardan tashkil topishi mumkin.

Sulfonat guruhli ionitlar kuchli kislotali kationitlar hisoblanadi. Ular keng pH oralig‘ida ion almashinish xususiyatini saqlashi mumkin.

Karboksil guruhli ionitlar esa nisbatan kuchsiz kislotali xususiyatga ega bo‘lib, ularning ionlanish darajasi eritmaning pH qiymatiga sezilarli darajada bog‘liq.

Metall ionlarini ushlab qolish samaradorligi funksional guruhlarning dissotsiatsiya darajasi va metall ionining ionit bilan o‘zaro ta’sir kuchiga bog‘liq.

Masalan, pH oshishi bilan karboksil guruhlarning deprotonlanishi:

$$–COOH \rightleftharpoons –COO^- + H^+$$

kuchayadi. Natijada metall kationlari bilan bog‘lanish uchun mavjud manfiy markazlar soni ortadi.

Biroq pH ni haddan tashqari oshirish metall gidroksidlarining cho‘kishi bilan ion almashinish jarayonini bir-biridan ajratishni qiyinlashtirishi mumkin. Shu sababli tajribalarda optimal pH qiymatini aniqlash muhimdir.

4. Ion almashinish samaradorligiga ta’sir qiluvchi omillar

4.1. pH qiymati

pH ion almashinish jarayonining eng muhim parametrlaridan biridir. Eritma pH qiymati ionit funksional guruhlarining ionlanish holatini va metall ionlarining suvdagi kimyoviy shaklini belgilaydi.

Past pH sharoitida H^+ ionlari funksional markazlar uchun metall ionlari bilan raqobatlashadi. Natijada og‘ir metall ionlarining ionit tomonidan ushlanishi kamayishi mumkin.

pH oshirilganda funksional guruhlarning deprotonlanishi kuchayib, metall ionlari bilan bog‘lanish ortishi mumkin. Biroq juda yuqori pH da metall gidroksidlarining cho‘kishi kuzatilishi mumkin.

Shuning uchun har bir metall–ionit tizimi uchun optimal pH qiymati tajribaviy ravishda aniqlanishi kerak.

ISSN 3030-3907

4.2. Kontakt vaqti

Ionit va eritma o‘rtasidagi kontakt vaqti metall ionlarining materialga diffuziyalanishi va faol markazlar bilan o‘zaro ta’sirlashishi uchun zarurdir.

Dastlabki bosqichda ion almashinish tezligi yuqori bo‘ladi, chunki ionitning ko‘plab faol markazlari bo‘sh holatda bo‘ladi. Vaqt o‘tishi bilan faol markazlar band bo‘lib, jarayon tezligi pasayadi va muvozanat holatiga yaqinlashadi.

Optimal kontakt vaqtini aniqlash ionitning iqtisodiy samaradorligi uchun muhim. Juda uzoq kontakt vaqti texnologik qurilmaning unumdorligini pasaytirishi mumkin.

4.3. Ionit dozasi

Ionit massasining oshirilishi odatda eritmadan ajratiladigan metall ionlarining umumiy miqdorini oshiradi. Chunki faol almashinish markazlari soni ortadi.

Biroq ionit dozasining ortishi bilan birlik massa hisobiga to‘g‘ri keladigan almashinish sig‘imi kamayishi mumkin. Shuning uchun “yuqori tozalash darajasi” va “yuqori birlik sig‘imi” o‘rtasidagi optimal nisbatni aniqlash zarur.

4.4. Boshlang‘ich konsentratsiya

Metall ionining boshlang‘ich konsentratsiyasi ionitning muvozanat holatiga va umumiy almashinish sig‘imiga ta’sir qiladi. Past konsentratsiyalarda ionit eritmadagi metall ionlarining katta qismini ushlab qolishi mumkin.

Konsentratsiya oshishi bilan faol markazlarning to‘yinishi tezlashadi. Shu sababli sorbsiya yoki ion almashinish izotermalarini aniqlash materialning muvozanat xususiyatlarini baholashda muhim hisoblanadi.

5. Ion almashinish sig‘imi va sorbsiya samaradorligi

Ionitning metall ionlarini ushlab qolish qobiliyatini baholash uchun almashinish yoki sorbsiya sig‘imi aniqlanadi.

Amaliy hisoblashlarda quyidagi tenglamadan foydalanish mumkin:

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

Bu yerda:

q_e — muvozanatdagi ion almashinish sig‘imi, mg/g;
C_0 — boshlang‘ich konsentratsiya, mg/L;
C_e — muvozanat konsentratsiyasi, mg/L;
V — eritma hajmi, L;
m — ionit massasi, g.

Metall ionining eritmadan chiqarilish darajasi esa:

$$R = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100\%$$

tenglama yordamida aniqlanishi mumkin.

Ushbu ko‘rsatkich ionitning tozalash samaradorligini foizlarda ifodalash imkonini beradi.

ISSN 3030-3907

Biroq ilmiy jihatdan faqat chiqarilish foizini ko‘rsatish yetarli emas. Ionitning birlik massa hisobiga sig‘imi, selektivligi, kinetikasi va regeneratsiyadan keyingi samaradorligi ham baholanishi kerak.

6. Og‘ir metall ionlarining selektiv ajratilishi

Real oqava suvlar tarkibida bir vaqtning o‘zida bir nechta metall ionlari bo‘lishi mumkin. Masalan, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+} va Pb^{2+} ionlari bir eritmada mavjud bo‘lishi ehtimoldan xoli emas.

Bunday sharoitda ionitning bir metall ionini boshqasiga nisbatan afzal bog‘lash xususiyati muhim ahamiyat kasb etadi.

Selektivlikka quyidagi omillar ta’sir qiladi:

- ionning zaryadi;
- ion radiusi;
- gidratlanish energiyasi;
- funksional guruh bilan kimyoviy yaqinligi;
- kompleks hosil qilish qobiliyati;
- ionitning g‘ovak strukturasi;
- eritmaning pH qiymati;
- raqobatlashuvchi ionlarning konsentratsiyasi.

Gibrid ionitlarning muhim afzalligi shundaki, organik funksional komponentni o‘zgartirish orqali ma’lum metall ionlariga nisbatan selektiv markazlarni shakllantirish mumkin.

Masalan, tarkibida azot yoki oltingugurt donor atomlari mavjud ligandlar ayrim metall ionlari bilan kuchli koordinatsion o‘zaro ta’sirga kirishishi mumkin. Bu esa oddiy ion almashinuvchi smolalarga nisbatan selektivlikni oshirish imkonini beradi.

7. Ion almashinish kinetikasi

Ion almashinish jarayonining tezligi materialning amaliy qo‘llanishi uchun muhim parametr hisoblanadi. Metall ionlari eritmadan ionit yuzasiga, keyin esa materialning ichki g‘ovaklariga diffuziyalanadi.

Jarayonni shartli ravishda quyidagi bosqichlarga ajratish mumkin:

1. metall ionlarining eritma hajmidan ionit yuzasiga ko‘chishi;
2. ionitning tashqi yuzasida diffuziya;
3. g‘ovaklar orqali ichki diffuziya;
4. funksional markaz bilan o‘zaro ta’sirlashish;
5. ion almashinish yoki kompleks hosil bo‘lishi.

Shu sababli ionit zarrachalarining o‘lchami, g‘ovakligi va solishtirma yuzasi kinetikaga katta ta’sir ko‘rsatadi.

ISSN 3030-3907

Kichik zarracha o‘lchamli materiallarda diffuziya masofasi qisqaradi va muvozanatga erishish tezlashishi mumkin. Biroq juda mayda zarrachalarni sanoat kolonnalarida gidravlik jihatdan boshqarish qiyinlashishi mumkin.

8. Ionitlarni regeneratsiya qilish

Ionitning faol markazlari metall ionlari bilan to‘yingach, material regeneratsiya qilinadi. Regeneratsiyaning maqsadi ionitni dastlabki faol holatiga qaytarish va keyingi siklda undan qayta foydalanishdir.

Kationitlarni regeneratsiya qilish uchun mineral kislotalar yoki tuz eritmalari ishlatilishi mumkin. Regeneratsiya natijasida ionit tarkibidagi metall ionlari eritmaga o‘tadi.

Jarayonni soddalashtirilgan holda:

$$R_2–M + 2H^+ \rightarrow 2R–H + M^{2+}$$

ko‘rinishida ifodalash mumkin.

Regeneratsiya jarayonining samaradorligini baholashda quyidagi ko‘rsatkichlar muhim:

regeneratsiyadan keyingi ion almashinish sig‘imi;

metallni desorbsiya qilish darajasi;

regenerant sarfi;

regeneratsiya sikllari soni;

ionitning mexanik va kimyoviy barqarorligi.

Ionitni ko‘p marotaba regeneratsiya qilish imkoniyati uning iqtisodiy samaradorligini sezilarli oshiradi.

9. Gibrid ionitlardan foydalanish istiqbollari

An’anaviy ion almashinuvchi materiallarning ayrim cheklovlarini bartaraf etish maqsadida noorganik–organik gibrid ionitlardan foydalanish istiqbolli hisoblanadi.

Gibrid materiallarda noorganik komponent sifatida kremnezem, silika-gel, alyumosilikat yoki metall oksidlaridan foydalanish mumkin. Organik komponent esa ion almashinish va kompleks hosil qilish uchun funksional guruhlarni ta’minlaydi.

Kremnezem asosidagi materiallarda yuzadagi ≡Si–OH guruhlarini modifikatsiya qilish orqali maqsadli funksional markazlarni hosil qilish mumkin.

Masalan, kremnezem matritsasiga amin, karboksil, fosfonat yoki boshqa ligand guruhlarini kiritish orqali Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+} va boshqa metall ionlariga nisbatan selektivlikni oshirish mumkin.

Bunday materiallarning istiqbolliligi ularning bir vaqtning o‘zida bir nechta xususiyatlarni — mexanik barqarorlik, kimyoviy chidamlilik, funksionallik va selektivlikni — birlashtira olish imkoniyati bilan belgilanadi.

10. Ilmiy va amaliy istiqbollar

ISSN 3030-3907

Og‘ir metall ionlarini ionitlar yordamida ajratish bo‘yicha kelgusidagi tadqiqotlarda real oqava suvlarning murakkab tarkibini hisobga olish muhimdir. Laboratoriya sharoitida bitta metall ionining standart eritmasida olingan yuqori natija real tizimda ham aynan takrorlanmasligi mumkin.

Shuning uchun quyidagi masalalarni chuqur o‘rganish talab etiladi:

ko‘p komponentli eritmalarda selektivlik;

raqobatlashuvchi ionlarning ta’siri;

real oqava suvlar sharoitidagi samaradorlik;

regeneratsiya sikllari;

ionitning uzoq muddatli barqarorligi;

regeneratsiya chiqindilarini qayta ishlash;

texnologiyaning iqtisodiy samaradorligi.

Ayniqsa, “yuqori sig‘imli ionit”dan “selektiv ionit”ga o‘tish zamonaviy tadqiqotlarning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Bu esa ionit tarkibidagi funksional guruhlarni maqsadli boshqarish, gibrid strukturalar yaratish va ma’lum ionni molekulyar/ion darajada tanib olish xususiyatini shakllantirishni talab qiladi.

XULOSA.

Og‘ir metall ionlari bilan ifloslangan oqava suvlarni tozalash ekologik xavfsizlikni ta’minlashning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Ion almashinish texnologiyasi metall ionlarini suvdan samarali ajratish, jarayonni boshqarish va ionitlarni regeneratsiya qilish imkoniyatlari tufayli katta ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Kationitlar Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+} kabi kationlarni ajratishda samarali materiallar hisoblanadi. Jarayon samaradorligi pH, kontakt vaqti, ionit dozasi, metall ionining boshlang‘ich konsentratsiyasi, harorat va raqobatlashuvchi ionlarning mavjudligiga bog‘liq.

Ionitlarning samaradorligini baholashda faqat metall ionining eritmadan chiqarilish darajasini emas, balki ion almashinish sig‘imi, selektivlik, kinetik ko‘rsatkichlar, regeneratsiya samaradorligi va ko‘p siklli ishlash barqarorligini kompleks baholash zarur.

Noorganik–organik gibrid ionitlar ushbu yo‘nalishda alohida istiqbolga ega. Kremnezem asosidagi funksionallashgan gibrid materiallar noorganik komponentning barqarorligi va organik funksional guruhlarning selektiv bog‘lash xususiyatlarini birlashtirishi mumkin.

Shu sababli kelgusida kremnezem asosidagi funksionallashgan organik–noorganik gibrid ionitlarni sintez qilish, ularning fizik-kimyoviy xossalarini aniqlash va Pb^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} kabi og‘ir metall ionlariga nisbatan selektivligini o‘rganish oqava suvlarni chuqur tozalash uchun yangi samarali materiallar yaratishga xizmat qilishi mumkin.

ISSN 3030-3907

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. P. 145–155.
2. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92. P. 407–418.
3. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. 2011. Vol. 4. P. 361–377.
4. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 2003. Vol. 97. P. 219–243.
5. Volesky B. Biosorption and me. *Water Research*. 2007. Vol. 41. P. 4017–4029.
6. Miretzky P., Cirelli A.F. Cr(VI) and Cr(III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 180. P. 1–19.
7. Inglezakis V.J., Poulopoulos S.G. *Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications*. Elsevier, 2006.
8. Harland C.E. *Ion Exchange: Theory and Practice*. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
9. Zagorodni A.A. *Ion Exchange Materials: Properties and Applications*. Elsevier, 2007.
10. Fan H., Huang Y., Yip N.Y. Advancing ion-exchange membranes to ion-selective membranes: principles, status, and opportunities. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2023.
11. Hagesteijn K.F.L., Jiang S., Ladewig B.P. A review of the synthesis and characterization of anion exchange membranes. *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 11131–11150.
12. Current Trends in Development and Use of Polymeric Ion-Exchange Resins in Wastewater Treatment. *Materials*. 2024. Vol. 17. Article 5994.
13. Structure, properties and industrial applications of anion exchange resins for the removal of electroactive nitrate ions from contaminated water. *RSC Advances*. 2024.
14. Alleviating the burden of ion exchange brine in water treatment: From operational strategies to brine management. *Water Research*.
15. Efficient techniques and practices for wastewater treatment: an update. *Discover Water*. 2024.

ISSN 3030-3907