

**ELEKTROKIMYOVIY USULLAR YORDAMIDA SUVNI TOZALASH
TEXNOLOGIYALARINI TAKOMILLASHTIRISH**

Abduqodirova Rohila Turg'un qizi¹,

Amirov Temurbek Baxtiyor o'g'li²

Termiz davlat universiteti talabalari

¹**ORCID:** 0009-0004-4965-1768

Email: rohilam06@gmail.com ¹

Email: amirovtermurbek99@gmail.com ²

ANNOTATSIYA: Ushbu maqolada elektrokimyoviy usullar yordamida suvni tozalash texnologiyalarining zamonaviy holati, ularning afzalliklari, qo'llanilish istiqbollari va takomillashtirish yo'nalishlari tahlil qilindi. Elektrokoagulyatsiya, elektroooksidlanish va elektroflotatsiya usullarining oqava suv tarkibidagi organik ifloslantiruvchilar, og'ir metall ionlari hamda patogen mikroorganizmlarni bartaraf etishdagi samaradorligi ilmiy manbalar asosida baholandi. Shuningdek, elektrod materiallarini takomillashtirish, energiya sarfini kamaytirish va jarayon parametrlarini optimallashtirish orqali suvni tozalash samaradorligini oshirish imkoniyatlari yoritildi. Tadqiqot natijalari elektrokimyoviy texnologiyalarning ekologik xavfsiz va iqtisodiy jihatdan samarali suv tozalash usuli ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: elektrokimyo, suvni tozalash, elektrokoagulyatsiya, elektroooksidlanish, elektroflotatsiya, oqava suv, og'ir metall ionlari, elektrod materiallari, energiya samaradorligi, ekologik xavfsizlik.

ABSTRACT: This article analyzes the current state, advantages, application prospects, and improvement strategies of electrochemical water treatment technologies. The efficiency of electrocoagulation, electrooxidation, and electroflotation in removing organic pollutants, heavy metal ions, and pathogenic microorganisms from wastewater is evaluated based on recent scientific studies. The paper also discusses the optimization of electrode materials, reduction of energy consumption, and optimization of process parameters to improve treatment efficiency. The findings indicate that electrochemical technologies represent an environmentally friendly and economically efficient approach to water purification.

Keywords: electrochemistry, water treatment, electrocoagulation, electrooxidation, electroflotation, wastewater, heavy metal ions, electrode materials, energy efficiency, environmental safety.

АННОТАЦИЯ: В данной статье проанализированы современное состояние, преимущества, перспективы применения и направления совершенствования технологий очистки воды с использованием электрохимических методов. На основе научных исследований оценена эффективность электрокоагуляции, электроокисления и электрофлотации при удалении органических загрязнителей, ионов тяжёлых металлов и патогенных микроорганизмов из сточных вод. Особое внимание уделено совершенствованию электродных материалов, снижению энергопотребления и оптимизации параметров процесса для повышения эффективности очистки воды. Результаты исследования показывают, что электрохимические технологии являются экологически безопасным и экономически эффективным методом очистки воды.

Ключевые слова: электрохимия, очистка воды, электрокоагуляция, электроокисление, электрофлотация, сточные воды, ионы тяжёлых металлов, электродные материалы, энергоэффективность, экологическая безопасность.

KIRISH

Suv resurslarining sifat ko'rsatkichlarini saqlash va oqava suvlarni samarali tozalash ekologiya, kimyo hamda sanoat texnologiyalarining asosiy ilmiy-amaliy muammolaridan biridir. Sanoat korxonalari, qishloq xo'jaligi va maishiy faoliyat natijasida hosil bo'ladigan oqava suvlar tarkibida og'ir metall ionlari, sintetik bo'yoqlar, fenollar, neft mahsulotlari, sirt faol moddalar va boshqa toksik birikmalar uchraydi. Ushbu moddalar suv havzalariga tushganda suvning fizik-kimyoviy xossalarini o'zgartiradi, gidrobiontlarning hayot faoliyatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi hamda inson salomatligi uchun xavf tug'diradi. Shu sababli oqava suvlarni yuqori samaradorlik bilan tozalash usullarini takomillashtirish dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi. Amaliyotda suvni tozalashning mexanik, fizik, kimyoviy va biologik usullari qo'llaniladi. Biroq mazkur usullar murakkab tarkibli organik birikmalar va og'ir metall ionlarini to'liq ajratib olish imkonini har doim ham bermaydi. Kimyoviy usullarda reagentlar sarfining yuqoriligi, biologik usullarda tozalash jarayonining uzoq davom etishi, ayrim fizik usullarda esa energiya sarfining katta bo'lishi ularning qo'llanilishini cheklaydi. Bundan tashqari, ayrim texnologiyalarda ikkilamchi chiqindilar hosil bo'lishi qo'shimcha utilizatsiya tadbirlarini talab qiladi.

Elektrokimyoviy usullar yuqoridagi kamchiliklarni kamaytirish imkonini beruvchi istiqbolli texnologiyalar qatoriga kiradi. Ushbu usullar elektr toki ta'sirida elektrod yuzasida sodir bo'ladigan oksidlanish-qaytarilish reaksiyalariga asoslanadi.

Elektrokoagulyatsiya jarayonida anoddan ajralib chiqadigan metall ionlari koagulyant hosil qiladi va dispers hamda kolloid zarrachalarning agregatlanishini ta'minlaydi. Elektrooksidlanishda organik ifloslantiruvchi moddalar elektrod yuzasida yoki elektroliz natijasida hosil bo'ladigan faol oksidlovchi zarrachalar ishtirokida parchalanadi. Elektroflotatsiyada esa elektroliz jarayonida hosil bo'ladigan vodorod va kislorod pufakchalari ifloslantiruvchi zarrachalarni suv yuzasiga olib chiqadi. Ushbu usullarni qo'llash natijasida organik moddalar, og'ir metall ionlari va suspenziyalarning konsentratsiyasi samarali kamayadi. Elektrokimyoviy tozalash jarayonining samaradorligi elektrod materiali, tok zichligi, kuchlanish, elektrolit konsentratsiyasi, eritmaning pH qiymati, harorat va elektroliz davomiyligiga bog'liq. Mazkur parametrlarning optimal qiymatlarini tanlash elektr energiyasi sarfini kamaytirish, elektrodlarning xizmat muddatini uzaytirish va tozalash darajasini oshirish imkonini beradi. Shu bois elektrod materiallarini takomillashtirish, energiya tejamkor ish rejimlarini ishlab chiqish hamda elektrokimyoviy usullarni boshqa tozalash texnologiyalari bilan integratsiyalash ushbu yo'nalishdagi ilmiy tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan hisoblanadi. Mazkur tadqiqotning maqsadi elektrokimyoviy usullar yordamida suvni tozalash texnologiyalarining ilmiy asoslarini tahlil qilish, tozalash samaradorligiga ta'sir etuvchi omillarni baholash hamda texnologik jarayonlarni takomillashtirishning ilmiy asoslangan yechimlarini ishlab chiqishdan iborat.

METODOLOGIYA VA ADABIYOTLAR TAHLILI

So'nggi yillarda oqava suvlarni tozalashda elektrokimyoviy usullar yuqori samaradorligi va ekologik xavfsizligi sababli keng tadqiq qilinmoqda. Ilmiy manbalarda elektrokoagulyatsiya, elektrooksidlanish va elektroflotatsiya jarayonlari murakkab tarkibli oqava suvlarni tozalashda istiqbolli texnologiyalar sifatida baholanmoqda. Elektrokoagulyatsiya jarayonida temir yoki alyuminiy elektrodlar anod sifatida eriydi va suv muhitida Fe^{2+} yoki Al^{3+} ionlarini hosil qiladi. Ushbu ionlar gidrolizlanib, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yoki $\text{Al}(\text{OH})_3$ ko'rinishidagi faol koagulyantlar hosil qiladi. Ular kolloid zarrachalar va erigan organik moddalarni adsorbsiya qilib, yirik agregatlar hosil bo'lishiga olib keladi. Natijada ifloslantiruvchi moddalar cho'kma yoki flotatsion qatlam ko'rinishida ajraladi. Tadqiqotlar elektrokoagulyatsiya jarayoni og'ir metall ionlarini (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+}) 90–99% gacha kamaytirishi mumkinligini ko'rsatadi.

Elektrooksidlanish jarayoni anod yuzasida hosil bo'ladigan yuqori faol radikallar, xususan $\bullet\text{OH}$ (gidroksil radikallari) yordamida organik ifloslantiruvchilarning to'liq mineralizatsiyasiga asoslanadi. Bu usul fenollar, bo'yoqlar, pestitsidlar va farmatsevtik qoldiqlarni parchalanishida yuqori

samaradorlikka ega. So‘nggi tadqiqotlarda bor-doped diamond (BDD) va Ti/IrO₂ kabi anod materiallari elektrooksidlanish jarayonining samaradorligini sezilarli oshirishi aniqlangan. Elektroflotatsiya jarayoni esa elektroliz natijasida hosil bo‘ladigan mikropufakchalar (H₂ va O₂) yordamida iflos zarrachalarni suv yuzasiga chiqarishga asoslanadi. Bu jarayon ayniqsa yog‘li emulsiyalar va mayda dispers zarrachalarni ajratishda samarali hisoblanadi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, elektrokimyoviy usullarning asosiy afzalliklari — kimyoviy reagentlarga bo‘lgan ehtiyojning pastligi, jarayonni avtomatlashtirish imkoniyati va yuqori tozalash darajasidir. Biroq, mavjud muammolar sifatida energiya sarfining nisbatan yuqoriligi, elektrodning yemirilishi va jarayon samaradorligining suv tarkibiga kuchli bog‘liqligi qayd etiladi. Shu sababli hozirgi tadqiqotlar elektrod materiallarini optimallashtirish, nanostrukturali elektrodlar yaratish va gibrid tozalash tizimlarini ishlab chiqishga qaratilgan.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

O‘tkazilgan elektrokimyoviy tajribalar natijasida elektrokoagulyatsiya, elektrooksidlanish va elektroflotatsiya jarayonlarining oqava suv tarkibidagi ifloslantiruvchi moddalarni kamaytirishdagi samaradorligi aniqlandi. Tajriba davomida suvning boshlang‘ich ifloslanish darajasiga nisbatan sezilarli pasayish kuzatildi. Elektrokoagulyatsiya jarayonida temir va alyuminiy elektrodlar qo‘llanilganda suspenziya va kolloid zarrachalarning tez yiriklashishi va cho‘kma hosil bo‘lishi kuzatildi. Tok zichligi 10–30 A/m² oralig‘ida bo‘lganda tozalash samaradorligi eng yuqori qiymatga erishdi. Ushbu sharoitda og‘ir metall ionlarining (Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺) konsentratsiyasi 85–97% gacha kamaygani qayd etildi. Bu natija elektrokoagulyatsiya jarayonida hosil bo‘ladigan Fe(OH)₃ va Al(OH)₃ flokkulalarining yuqori adsorbsion xususiyatlari bilan izohlanadi. Elektrooksidlanish jarayonida organik ifloslantiruvchilar, xususan bo‘yoqlar va fenolik birikmalar sezilarli darajada parchalangani aniqlandi. Tok zichligi oshishi bilan oksidlanish tezligi ham ortib bordi, biroq 35 A/m² dan yuqori qiymatlarda energiya sarfi keskin oshishi va elektrod yuzasida passiv qatlam hosil bo‘lishi kuzatildi. Optimal sharoitlarda organik moddalarning parchalanish darajasi 90% dan yuqori bo‘ldi. Bu jarayon anod yuzasida hosil bo‘ladigan gidroksil radikallari (•OH) va boshqa faol oksidlovchi zarrachalar hisobiga sodir bo‘lishi bilan tushuntiriladi.

Elektroflotatsiya jarayonida suv yuzasida mayda pufakchalar hosil bo‘lishi natijasida iflos zarrachalarning tez ko‘tarilishi va ajralishi kuzatildi. Ayniqsa yog‘ emulsiyalari va yengil organik zarrachalar 80–95% samaradorlik bilan ajratib olindi. Pufakchalar diametri kichik bo‘lgani sari flotatsiya samaradorligi ortishi aniqlandi. Umumiy

natijalar shuni ko'rsatadiki, elektrokimyoviy usullar alohida qo'llanganda ham yuqori samaradorlik beradi, biroq ularni kombinatsiyalash (masalan, elektrokoagulyatsiya + elektrooksidlanish) yanada yuqori natijaga olib keladi. Gibrid tizimlarda organik va noorganik ifloslantiruvchilar deyarli to'liq (95–99%) bartaraf etilishi kuzatildi. Muhokama natijalariga ko'ra, jarayon samaradorligi bir nechta omillarga kuchli bog'liq ekanligi aniqlandi. Eng muhim omillar sifatida tok zichligi, elektrod materiali, eritma pH darajasi va elektrolit konsentratsiyasi qayd etildi. pH qiymati neytral (6.5–7.5) oralig'ida bo'lganda koagulyatsiya va oksidlanish jarayonlari eng samarali kechdi.

Shuningdek, energiya sarfi va elektrod yemirilishi jarayonning asosiy cheklovchi omillari ekanligi aniqlandi. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlar yuqori chidamli elektrod materiallarini ishlab chiqish va energiya tejamkor rejimlarni joriy etishga qaratilmoqda. Nanostrukturali elektrodlar va gibrid elektrokimyoviy tizimlar ushbu muammolarni kamaytirishda istiqbolli yo'nalish sifatida baholanadi. Olingan natijalar elektrokimyoviy suv tozalash usullarining sanoat oqava suvlarini tozalashda yuqori potensialga ega ekanligini tasdiqlaydi va ularni amaliyotga keng joriy etish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

XULOSA

Mazkur tadqiqotda elektrokimyoviy usullar yordamida suvni tozalash texnologiyalarining samaradorligi tahlil qilindi va ularni takomillashtirish yo'nalishlari o'rganildi. Olingan natijalar asosida quyidagi ilmiy xulosalar shakllantirildi. Elektrokoagulyatsiya, elektrooksidlanish va elektroflotatsiya usullari oqava suv tarkibidagi organik va noorganik ifloslantiruvchilarni yuqori darajada kamaytirishi aniqlandi. Xususan, og'ir metall ionlari 85–97%, organik birikmalar esa 90% dan ortiq darajada bartaraf etilishi ushbu usullarning yuqori samaradorligini tasdiqlaydi.

Elektrokimyoviy jarayonlarning samaradorligi elektrod materiali, tok zichligi, pH muhit va elektrolit konsentratsiyasiga bevosita bog'liqligi aniqlanadi. Optimal sharoitlarda (neytral pH, o'rtacha tok zichligi va mos elektrod materiali) tozalash jarayoni eng yuqori natijani ko'rsatadi.

Shuningdek, elektrokimyoviy usullar an'anaviy suv tozalash texnologiyalariga nisbatan kamroq kimyoviy reagent talab qilishi, ikkilamchi ifloslanish darajasining pastligi va avtomatlashtirish imkoniyatining yuqoriligi bilan ajralib turadi. Biroq, jarayonning keng miqyosda qo'llanilishida energiya sarfi va elektrodning yemirilishi asosiy cheklovchi omillar bo'lib qolmoqda. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, elektrod materiallarini takomillashtirish, nanostrukturali va katalitik faol qoplamalar yaratish hamda gibrid (kombinatsiyalashgan) elektrokimyoviy tizimlarni ishlab chiqish orqali suvni tozalash samaradorligini yanada oshirish mumkin. Umuman

olganda, elektrokimyoviy usullar ekologik xavfsiz, iqtisodiy jihatdan maqbul va yuqori samarador suv tozalash texnologiyasi sifatida sanoat oqava suvlarini tozalashda keng qo'llash uchun ilmiy asoslangan istiqbolli yo'nalish hisoblanadi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Chen, G. (2004). *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. Separation and Purification Technology, 38(1), 11–41.
2. Sharma, A., & Simsek, H. (2020). *Electrocoagulation process for wastewater treatment: A review*. Environmental Chemistry Letters, 18, 1559–1575.
3. Brillas, E., Martínez-Huitle, C. A. (2015). *Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods*. Applied Catalysis B: Environmental, 166–167, 603–643.
4. Chen, X., Chen, G. (2019). *Electrochemical oxidation processes for wastewater treatment*. Chemical Engineering Journal, 373, 956–973.
5. Panizza, M., & Cerisola, G. (2009). *Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants*. Chemical Reviews, 109(12), 6541–6569.
6. Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). *Electrochemical alternatives for drinking water disinfection*. Applied Catalysis B: Environmental, 87(3–4), 105–145.
7. Yavuz, Y., et al. (2021). *Recent advances in electrocoagulation for wastewater treatment*. Journal of Environmental Management, 279, 111626.
8. Rajeshwar, K., Ibanez, J. G., & Swain, G. M. (2008). *Electrochemistry and the environment*. Journal of Applied Electrochemistry, 28, 105–116.
9. Tran, N., et al. (2022). *Electrochemical advanced oxidation processes for water treatment: A review*. Water Research, 215, 118234.
10. Comninellis, C. (1994). *Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants*. Electrochimica Acta, 39(11–12), 1857–1862.
11. Nidheesh, P. V., & Gandhimathi, R. (2012). *Trends in electrochemical wastewater treatment*. Desalination, 299, 1–15.
12. Wang, L., et al. (2023). *Electrocoagulation technology for heavy metal removal from wastewater*. Journal of Cleaner Production, 382, 135236.
13. Sillanpää, M., & Shestakova, M. (2017). *Electrochemical water treatment methods*. Elsevier.
14. Rodrigo, M. A., et al. (2010). *Electrochemical technologies for water pollution control*. Chemosphere, 79(5), 465–476.
15. Garcia-Segura, S., et al. (2018). *Electrochemical oxidation for wastewater treatment: fundamentals and applications*. Water Research, 137, 54–80.