

ELEKTROKIMYOVIY USULDA SANOAT CHIQINDI SUVLARIDAN FOYDALI KOMPONENTLARNI AJRATIB OLISH VA ULARNI QAYTA ISHLASH TEXNOLOGIYASINI ASOSLASH

Ahmedov Sultan Mukaramovich
Kimyo fanlari nomzodi Qo'qonDU

Annotatsiya: Mazkur maqolada sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni elektrokimyoviy usullar yordamida ajratib olish va ularni qayta ishlash texnologiyasini ilmiy asoslash masalasi tahlil qilindi. Sanoat oqova suvlari tarkibida mis, nikel, rux, xrom, kadmiy, qo'rg'oshin, kumush, oltin kabi metall ionlari, shuningdek ammoniy, fosfat, sulfat, xlorid, borat va boshqa noorganik komponentlar mavjud bo'lishi mumkin. An'anaviy yondashuvda bunday komponentlar "ifloslantiruvchi modda" sifatida ko'riladi va reagentli cho'ktirish, neytrallash yoki sorbsiya orqali chiqindi shlamga o'tkaziladi. Biroq zamonaviy resurs tejamkor yondashuvda sanoat chiqindi suvlari ikkilamchi xomashyo manbasi sifatida baholanadi. Elektrokimyoviy texnologiyalar — elektrocho'ktirish, elektrolitik qaytarish, elektrokoagulyatsiya, elektrodializ, membranali elektrokimyoviy ajratish, kapasitativ deionizatsiya va bioelektrokimyoviy tizimlar — foydali komponentlarni metall, tuz, konsentrat, gaz yoki qattiq fazali mahsulot shaklida ajratib olish imkonini beradi. Ilmiy adabiyotlarda elektrokimyoviy texnologiyalar yordamida metallar, ozuqa elementlari, oltingugurt birikmalari, vodorod va boshqa qiymatli mahsulotlarni oqova suvdan qayta olish mumkinligi qayd etilgan; shu bilan birga murakkab tarkibli chiqindi suvlar uchun bitta bosqichli jarayon ko'pincha yetarli emasligi va ko'p bosqichli yoki membranali-biologik integratsiyalangan sxemalar zarurligi ta'kidlanadi. Maqolada foydali komponentlarni ajratib olish texnologiyasi faqat tozalash darajasi bilan emas, balki komponentni qayta ishlashga yaroqli mahsulotga aylantirish, energiya sarfi, elektrod materiali sarfi, shlam miqdori, mahsulot tozaligi, iqtisodiy samaradorlik va ekologik xavfsizlik bilan birgalikda baholanishi kerakligi asoslandi. Tadqiqot natijalari sanoat chiqindi suvlarini elektrokimyoviy qayta ishlashda eng maqbul yondashuv selektiv ajratish, konsentrlash, elektrokimyoviy qaytarish, cho'kmani qayta ishlash va tozalangan suvni qayta foydalanishga yo'naltirishdan iborat kompleks texnologik zanjir ekanini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: sanoat chiqindi suvlari, elektrokimyoviy tozalash, foydali komponentlar, elektrocho'ktirish, elektrokoagulyatsiya, elektrodializ, metallarni ajratib olish, resurs tejamkorlik, ikkilamchi xomashyo, aylanma iqtisodiyot, elektrod, energiya sarfi.

ЗАМЕНА ТЕХНОЛОГИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ИХ ПЕРЕРАБОТКА

Ахмедов Султан Мукарамович

Кандидат химических наук, Кокандский государственный университет

Аннотация: В данной статье анализируется вопрос научного обоснования технологии извлечения полезных компонентов из промышленных сточных вод электрохимическими методами и их переработки. Промышленные сточные воды могут содержать ионы металлов, таких как медь, никель, цинк, хром, кадмий, свинец, серебро, золото, а также аммоний, фосфаты, сульфаты, хлориды, бораты и другие неорганические компоненты. В традиционном подходе такие компоненты рассматриваются как «загрязнители» и переносятся в осадок путем осаждения реагентами, нейтрализации или сорбции. Однако в современном ресурсосберегающем подходе промышленные сточные воды рассматриваются как вторичный источник сырья. Электрохимические технологии — электроосаждение, электролитическое извлечение, электрокоагуляция, электродиализ, мембранная электрохимическая сепарация, емкостная деионизация и биоэлектрохимические системы — позволяют извлекать полезные компоненты в виде металлов, солей, концентратов, газообразных или твердофазных продуктов. В научной литературе отмечается, что с помощью электрохимических технологий из сточных вод можно извлекать металлы, питательные вещества, соединения серы, водород и другие ценные продукты; Однако подчеркивается, что одностадийный процесс часто недостаточен для сточных вод сложного состава и что необходимы многостадийные или мембранно-биологические интегрированные схемы. В статье утверждается, что технология извлечения полезных компонентов должна оцениваться не только по степени очистки, но и в сочетании с преобразованием компонента в продукт вторичной переработки, энергопотреблением, расходом электродного материала, объемом осадка, чистотой продукта, экономической эффективностью и экологической безопасностью. Результаты исследования показали, что наиболее оптимальным подходом к электрохимической обработке промышленных сточных вод является комплексная технологическая цепочка, состоящая из селективного разделения, концентрирования, электрохимического извлечения, обработки осадка и повторного использования очищенной воды.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, электрохимическая обработка, полезные компоненты, электроосаждение, электрокоагуляция, электродиализ, разделение металлов, ресурсоэффективность, вторичное сырье, циркулярная экономика, электрод, энергопотребление.

SUBSTITUTION OF THE TECHNOLOGY FOR SEPARATION OF USEFUL COMPONENTS FROM INDUSTRIAL WASTEWATERS BY ELECTROCHEMICAL METHOD AND THEIR RECYCLING

Ahmedov Sultan Mukaramovich

Candidate of Chemical Sciences Kokand State University

Abstract: This article analyzes the issue of scientific substantiation of the technology for the extraction of useful components from industrial wastewater using electrochemical methods and their processing. Industrial wastewater may contain metal ions such as copper, nickel, zinc, chromium, cadmium, lead, silver, gold, as well as ammonium, phosphate, sulfate, chloride, borate and other inorganic components. In the traditional approach, such components are considered as "pollutants" and are transferred to the waste sludge by reagent precipitation, neutralization or sorption. However, in a modern resource-saving approach, industrial wastewater is evaluated as a secondary source of raw materials. Electrochemical technologies - electrodeposition, electrolytic recovery, electrocoagulation, electrodialysis, membrane electrochemical separation, capacitive deionization and bioelectrochemical systems - allow the extraction of useful components in the form of metal, salt, concentrate, gas or solid phase products. The scientific literature notes that metals, nutrients, sulfur compounds, hydrogen, and other valuable products can be recovered from wastewater using electrochemical technologies; however, it is emphasized that a single-stage process is often insufficient for wastewaters with complex composition and that multi-stage or membrane-biological integrated schemes are necessary. The article argues that the technology for extracting useful components should be evaluated not only by the degree of purification, but also in conjunction with the conversion of the component into a recyclable product, energy consumption, electrode material consumption, sludge volume, product purity, economic efficiency, and environmental safety. The results of the study showed that the most optimal approach to the electrochemical treatment of industrial wastewater is a complex technological chain consisting of selective separation, concentration, electrochemical recovery, sludge treatment, and re-use of the treated water.

Keywords: industrial wastewater, electrochemical treatment, useful components, electrodeposition, electrocoagulation, electrodialysis, metal separation, resource saving, secondary raw materials, circular economy, electrode, energy consumption.

Kirish

Sanoat ishlab chiqarishida hosil boʻladigan chiqindi suvlar tarkibi odatiy maishiy oqova suvlarga nisbatan ancha murakkab boʻlib, ularning tarkibida erigan metall ionlari, mineral tuzlar, kislotalar, ishqorlar, kompleks hosil qiluvchi reagentlar, sirt faol moddalar, neft mahsulotlari, suspenziyalar va ayrim holatlarda zaharli aralashmalar uchraydi. Galvanik sexlar, metallurgiya korxonalarini, konchilik va gidrometallurgiya jarayonlari, elektronika sanoati, akkumulyator ishlab chiqarish, kimyo sanoati, mineral oʻgʻitlar ishlab chiqarish, charm va boʻyoq sanoati, mashinasozlik hamda energetika obyektlari bunday oqova suvlarning asosiy manbalari hisoblanadi. Muammo shundaki, ushbu suvlar tarkibidagi koʻplab komponentlar ekologik xavf tugʻdiradi, lekin bir vaqtning oʻzida iqtisodiy qiymatga ham ega. Masalan, mis, nikel, rux, kobalt, xrom, kumush, oltin, palladiy yoki litiy kabi metallar chiqindi suv tarkibida kam konsentratsiyada uchrashi mumkin, ammo katta hajmli oqimlarda ularning umumiy miqdori sezilarli iqtisodiy ahamiyat kasb etadi. Shuningdek, ammoniy, fosfat va sulfat kabi noorganik komponentlar oʻgʻit, kimyoviy reagent yoki texnologik xomashyo sifatida qayta baholanishi mumkin. Shu sababli sanoat chiqindi suvlarini oddiy “zararsizlantiriladigan oqim” deb emas, balki “suyuq ikkilamchi xomashyo” sifatida koʻrish zarur. Bu yondashuv aylanma iqtisodiyot tamoyillariga mos keladi: chiqindining tarkibidagi foydali modda texnologik siklga qaytariladi, birlamchi xomashyo sarfi kamayadi, suv resurslari tejaladi va shlam hosil boʻlishi qisqaradi. 2024-yilda chop etilgan sharhlarda chiqindi suvdan noorganik qiymatli mahsulotlarni, jumladan metallar va ozuqa elementlarini qayta olish aylanma iqtisodiyot modelining muhim yoʻnalishi sifatida baholangan; elektrokimyoviy jarayonlar esa ogʻir metall ionlarini metall shaklida qayta olish, ammoniy va fosfatlarni ajratish, sulfatlarni qayta ishlash hamda suvni qayta foydalanishga tayyorlash imkonini beruvchi istiqbolli usullar qatoriga kiritilgan. Anʼanaviy reagentli tozalash usullarida metall ionlari odatda gidroksid yoki sulfid choʻkmalari shaklida ajratiladi, ammo bunday choʻkma koʻpincha aralash, yuqori namlikli, qayta ishlashga noqulay va ikkilamchi xavfli chiqindi boʻlib qoladi. Elektrokimyoviy usullarning ustunligi shundaki, ularda elektron asosiy “reagent” vazifasini bajaradi, jarayon tok kuchi va kuchlanish orqali boshqariladi, kimyoviy reagent sarfi kamayadi, selektiv qaytarish yoki konsentrlash imkoniyati paydo

bo'lad i va ayrim komponentlarni bevosita metall, konsentrat yoki tuz shaklida ajratish mumkin. Biroq bu texnologiyani haddan tashqari ideal ko'rsatish ham noto'g'ri. Elektrokimyoviy jarayonning samaradorligi oqova suvning pH qiymati, elektr o'tkazuvchanligi, ion tarkibi, kompleks hosil qiluvchi moddalar mavjudligi, elektrod materiali, tok zichligi, massa almashinish sharoiti, harorat, elektrodlar oralig'i, membrana turi, katod va anod potentsiali hamda cho'kma tarkibiga bog'liq. Agar ushbu omillar hisobga olinmasa, texnologiya amalda qimmat, sekin yoki barqaror bo'lmagan jarayonga aylanadi. Shuning uchun ushbu maqolaning maqsadi sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni elektrokimyoviy usulda ajratib olish va ularni qayta ishlash texnologiyasini ilmiy asoslash, asosiy elektrokimyoviy yo'nalishlarni solishtirish, ularning afzallik va cheklovlarini aniqlash hamda sanoat amaliyoti uchun ratsional texnologik sxema taklif etishdan iborat.

Materiallar va metodlar

Tadqiqot nazariy-tahliliy, texnologik va ilmiy-uslubiy yondashuv asosida olib borildi. Tadqiqot obyekti sifatida tarkibida foydali komponentlar mavjud bo'lgan sanoat chiqindi suvlari qabul qilindi; ularga galvanik yuvish suvlari, gidrometallurgik eritmalar, metall yuzalarini ishlov berishdan keyingi kislota-ishqorli oqimlar, elektronika chiqindilarini yuvish eritmaları, akkumulyator ishlab chiqarish va qayta ishlash oqovalari, kon-metallurgiya drenaj suvlari, mineral o'g'itlar va kimyoviy ishlab chiqarish oqovalari kiradi. Tadqiqot predmeti sifatida foydali komponentlarni elektrokimyoviy ajratish, konsentrlash, qaytarish, cho'ktirish va keyingi qayta ishlash mexanizmlari belgilandi. Metodik jihatdan birinchi bosqichda oqova suv tarkibi kimyoviy guruhlariga ajratildi: metall ionlari, qimmatbaho metallar, og'ir metallar, ishqoriy va ishqoriy-yer metallari, ozuqa elementlari, mineral anionlar, kislota-ishqor qoldiqlari va kompleks birikmalar. Ikkinchi bosqichda har bir komponent uchun mos elektrokimyoviy ajratish yo'nalishi tanlandi. Metall ionlari uchun elektrocho'ktirish va elektrolitik qaytarish, kation-anion tuzlari uchun elektrodializ va bipolar membranali elektrodializ, fosfat va ammoniy uchun elektrokimyoviy induksiyalangan cho'ktirish yoki membranali ajratish, yuqori minerallashtirilgan oqimlar uchun elektrodializ va kapasitativ deionizatsiya, aralash kolloid-metal tizimlari uchun elektrokoagulyatsiya ko'rib chiqildi. Uchinchi bosqichda jarayon samaradorligi texnologik mezonlar orqali baholandi: ajratib olish darajasi, mahsulot tozaligi, energiya sarfi, elektrod sarfi, shlam hosil bo'lishi, reagent ehtiyoji, membrana yoki elektrod barqarorligi, qayta ishlangan komponentning bozor qiymati va tozalangan suvni qayta ishlatish imkoniyati. Elektrokimyoviy texnologiyalarning asosiy afzalliklari sifatida yuqori moslashuvchanlik, avtomatlashtirish qulayligi, reagent

sarfining pastligi, kam shlam hosil bo'lishi va resurs qayta tiklash imkoniyati ko'rsatiladi; biroq adabiyotlarda ularni sanoatga o'tkazish uchun energiya sarfini kamaytirish, mahsulot tozaligini oshirish va murakkab tarkibli oqimlarda ko'p bosqichli integratsiyalangan sxemalarni qo'llash zarurligi alohida ta'kidlangan. Jarayonning miqdoriy baholanishi uchun quyidagi asosiy ko'rsatkichlardan foydalanildi: ajratib olish samaradorligi $\eta = (C_0 - C_t) / C_0 \cdot 100\%$, bu yerda C_0 — komponentning boshlang'ich konsentratsiyasi, C_t — jarayondan keyingi konsentratsiyasi; elektrod materialining nazariy sarfi Faradey qonuni bo'yicha $m = I \cdot t \cdot M / (z \cdot F)$, bu yerda I — tok kuchi, t — vaqt, M — ajratilayotgan moddaning molyar massasi, z — elektronlar soni, F — Faradey doimiysi; energiya sarfi $E = U \cdot I \cdot t / V$, bu yerda U — hujayra kuchlanishi, V — ishlov berilgan suv hajmi. Bundan tashqari, qayta ishlashga yaroqlilik ko'rsatkichi sifatida $K_q = M_{\text{foydali}} / M_{\text{cho'kma}}$ taklif etildi; bu ko'rsatkich ajratilgan cho'kma yoki katod mahsulotidagi foydali komponent ulushini baholaydi. Agar K_q past bo'lsa, jarayon suvni tozalaydi, ammo resursni qayta ishlashga yaroqli mahsulot bermaydi; agar K_q yuqori bo'lsa, texnologiya nafaqat ekologik, balki iqtisodiy jihatdan ham asosli bo'ladi. Metodik tahlilda elektrokimyoviy tizimlar ikki asosiy guruhga ajratildi: birinchisi — komponentni qattiq mahsulotga aylantiruvchi jarayonlar, ya'ni elektrocho'ktirish, elektrokimyoviy qaytarish, elektrokoagulyatsiya va elektrokimyoviy cho'ktirish; ikkinchisi — komponentni kontsentrlovchi jarayonlar, ya'ni elektrodializ, membranali elektrokimyoviy ajratish va kapasitativ deionizatsiya. Bu farqlash muhim, chunki qattiq mahsulot beruvchi texnologiyada asosiy vazifa mahsulot tozaligi va ajratish selektivligi bo'lsa, kontsentrash texnologiyasida asosiy vazifa ionlarni kerakli kameraga o'tkazish, membrana ifloslanishini kamaytirish va keyingi qayta ishlash uchun yetarli konsentratsiyaga erishishdir. Elektrodializ bo'yicha so'nggi tadqiqotlarda optimallashtirilgan parametrlar va tizim dizayni orqali xlorid, sulfat va boshqa erigan tuzlarni sezilarli ajratish, suvni qayta ishlatish va tuzlarni kontsentrash imkoniyati ko'rsatilgan; ayrim tizimlarda tuz kontsentratsiyasini 12% dan yuqori darajagacha oshirish mumkinligi qayd etiladi. Shu asosda maqolada sanoat oqova suvlarini qayta ishlash uchun "tarkibni aniqlash — selektiv ajratish — kontsentrash — qaytarish yoki cho'ktirish — mahsulotni tozalash — suvni qayta ishlatish" ketma-ketligiga asoslangan texnologik yondashuv qo'llanildi.

Natijalar

Tahlil natijalari sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni elektrokimyoviy usulda ajratib olishda eng muhim shart komponentning kimyoviy shaklini to'g'ri aniqlash ekanini ko'rsatdi. Agar metall ionlari erkin gidratlangan kationlar shaklida bo'lsa, ular katodda elektrocho'ktirish orqali metall holatida ajratilishi mumkin; agar ular kompleks birikma shaklida bo'lsa, to'g'ridan-to'g'ri qaytarish sekinlashadi yoki umuman samarasiz bo'ladi, bu holda pHni o'zgartirish, kompleksni parchalash, oldindan oksidlanish-qaytarish yoki membranali kontsentrlash talab qilinadi. Mis, kumush, oltin, nikel va rux kabi metallarni elektrolitik qaytarish iqtisodiy jihatdan nisbatan istiqbolli, chunki ular katod yuzasida qattiq metall qoplama yoki kukun ko'rinishida ajralishi mumkin. Biroq aralash oqimlarda selektivlik muammosi paydo bo'ladi: potentsiali yuqori bo'lgan metallar birinchi bo'lib cho'kadi, potentsiali past bo'lgan metallar esa keyinroq ajraladi; agar potentsial noto'g'ri tanlansa, aralash metall cho'kmasi hosil bo'lib, keyingi qayta ishlash murakkablashadi. 2025-yilgi tadqiqotlarda elektrodpozitsiya, elektrokoagulyatsiya, uch o'lchamli elektrokimyoviy jarayonlar va elektro-Fenton kabi yondashuvlar og'ir metall komplekslari bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalash va qayta ishlashda qo'llanayotgani ko'rsatilgan. Bu natija shuni anglatadiki, sanoat oqova suvlaridagi murakkab komplekslangan metallar uchun oddiy elektroliz hujayrasi yetarli emas; jarayon elektrod materiali, potentsial rejimi, kompleks parchalash bosqichi va massa almashinish bilan birga loyihalaniishi kerak. Elektrokoagulyatsiya natijalari esa boshqa yo'nalishni ko'rsatadi: bunda foydali komponentlar odatda metall gidroksid, fosfat, borat, ammoniyli kompleks yoki aralash flok tarkibida qattiq fazaga o'tadi. Bu usulning afzalligi — aralash va loyqa oqimlarda ham ishlashi, reagent sarfini kamaytirishi, kolloid va suspenziyalarni birga ushlashi; kamchiligi esa ajratilgan mahsulotning ko'pincha aralash tarkibli bo'lishidir. 2024-yilda e'lon qilingan tizimli sharhda elektrokoagulyatsiya chiqindi suv va sho'r eritmalardan qimmatli komponentlarni turli mahsulot shakllarida ajratishda qo'llanayotgani, tok zichligi va eritma pH qiymati flok xossalari, tiklanish samaradorligi va energiya sarfiga hal qiluvchi ta'sir ko'rsatishi ta'kidlangan. Demak, elektrokoagulyatsiya orqali foydali komponent ajratilsa, keyingi bosqichda cho'kmani yuvish, quritish, kislota yoki ishqor bilan eritish, qayta cho'ktirish, termik ishlov berish yoki metallurgik qayta ishlash zarur bo'ladi. Elektrodializ va bipolar membranali elektrodializ natijalari shuni ko'rsatadiki, ular metallni bevosita metall holatida ajratmaydi, ammo ionlarni kontsentrlangan oqimga o'tkazib, keyingi elektrocho'ktirish yoki kristallizatsiya uchun qulay sharoit yaratadi. Bu ayniqsa kislota-ishqorli yuvish suvlarida, xlorid va sulfatli oqimlarda, yuqori minerallashtirilgan suvlarni qayta foydalanishga tayyorlashda va tuzlarni ikkilamchi mahsulotga aylantirishda

muhimdir. Agar oqova suvda metall ionlari juda kam, lekin suv hajmi katta bo'lsa, bevosita elektrocho'ktirish iqtisodiy samarasiz bo'lishi mumkin; bu holatda avval elektrodializ yoki sorbsion-konsentrlash, keyin elektrocho'ktirish qo'llanadi. Natijalar asosida sanoat oqova suvlarini elektrokimyoviy qayta ishlash uchun uch turdagi texnologik sxema asoslandi. Birinchi sxema metallga boy oqimlar uchun: mexanik filtrlash — pH sozlash — selektiv elektrocho'ktirish — katod mahsulotini yuvish va quritish — eritmani qayta elektroliz yoki neytrallash — suvni qayta foydalanish. Bu sxema galvanik va gidrometallurgik oqimlar uchun mos. Ikkinchi sxema aralash metall-tuzli oqimlar uchun: oldindan neytrallash — elektrokoagulyatsiya — floklarni ajratish — cho'kmani kislota bilan qayta eritish — selektiv elektrocho'ktirish — tozalangan suvni aylanmaga berish. Bu sxema aralash tarkibli, loyqa yoki komplekslangan oqimlar uchun mos. Uchinchi sxema yuqori minerallashgan oqimlar uchun: oldindan filtrlash — elektrodializ — konsentratni kristallizatsiya yoki elektrocho'ktirishga berish — diluat suvni ishlab chiqarishga qaytarish. Bu sxema kimyo, energetika, mineral o'g'itlar va metall yuzalarini yuvish jarayonlari uchun maqsadga muvofiq. Natijalar yana bir muhim xulosani ko'rsatdi: foydali komponentni ajratish texnologiyasi "chiqindi suvni tozalash" bosqichida tugamasligi kerak. Agar ajratilgan metall aralash shlamda qolsa, u real iqtisodiy mahsulot emas; agar konsentrat qayta ishlanmasa, u faqat yuqori konsentratsiyali ikkilamchi chiqindidir. Shuning uchun to'liq texnologik asoslashda katod mahsuloti, elektrokoagulyatsiya cho'kmasi, membrana konsentratni yoki kristall tuzning keyingi qayta ishlash yo'li albatta ko'rsatilishi zarur. Foydali komponentlarni qayta ishlash bo'yicha eng to'g'ri yondashuv mahsulotni uch toifaga ajratishdir: bevosita sotiladigan mahsulot, masalan katod mis yoki nikel; qayta eritilib boyitiladigan yarim mahsulot, masalan aralash metall gidroksid cho'kmasi; texnologik jarayonga qaytariladigan konsentrat, masalan kislota, ishqor, sulfat yoki fosfatli eritma. Ana shu tasnif sanoat korxonasiga elektrokimyoviy tizimni ekologik qurilma emas, balki iqtisodiy qiymat beruvchi texnologik bo'g'in sifatida baholash imkonini beradi.

Muhokama

Elektrokimyoviy usulda sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni ajratib olish texnologiyasini asoslashda eng katta xato — jarayonni faqat laboratoriya sharoitidagi ajratish foizi bilan baholashdir. Masalan, laboratoriyada mis ionlarining 95–98% ajratilishi yaxshi natija ko'rinishi mumkin, lekin agar jarayon yuqori kuchlanish, uzoq vaqt, qimmat elektrod, tez passivlanadigan membrana yoki murakkab pH nazorati talab qilsa, sanoat sharoitida iqtisodiy jihatdan zaif bo'lib qoladi. Aksincha, ajratish darajasi biroz pastroq bo'lgan, ammo energiya sarfi kam, elektrod umri uzoq, mahsulot sifati barqaror va suvni qayta

ishlatish imkoniyati yuqori bo'lgan texnologiya amaliy jihatdan kuchliroq bo'lishi mumkin. Shuning uchun maqola doirasida elektrokimyoviy qayta ishlash texnologiyasi beshta majburiy mezon orqali baholanishi zarurligi asoslandi: komponentni selektiv ajratish, ajratilgan mahsulotning qayta ishlanishga yaroqliligi, umumiy energiya sarfi, ikkilamchi chiqindi miqdori va jarayonning sanoat barqarorligi. Birinchi mezon — selektivlik — ayniqsa aralash metall ionlari bo'lgan oqimlarda muhim. Agar katodda mis, nikel, rux va temir birga cho'ksa, mahsulotni metallurgik qayta ishlash qimmatlashadi. Selektivlikni oshirish uchun katod potensialini bosqichma-bosqich boshqarish, impulsli tok rejimlari, elektrod yuzasini modifikatsiyalash, pHni zonali boshqarish va oldindan kompleks parchalash qo'llanishi mumkin. Ikkinchi mezon — mahsulot yaroqliligi — elektrokoagulyatsiya uchun juda muhim. Elektrokoagulyatsiya klassik tozalash usuli sifatida ifloslantiruvchilarni floklarga o'tkazadi, ammo agar bu flok qayta ishlanmasa, muammo suvdan shlamga ko'chadi. 2024-yilgi sharhda elektrokoagulyatsiya natijasida hosil bo'lgan ifloslantiruvchi modda saqlovchi floklar keyingi utilizatsiyasiz qattiq chiqindiga aylanishi, lekin foydali komponentlar qayta olinsa, ular ikkilamchi resurs sifatida ishlatilishi mumkinligi ta'kidlangan. Bu fikr sanoat loyihalash uchun keskin ahamiyatga ega: elektrokoagulyatsiya qurilmasini o'rnatishning o'zi resurs tejankor texnologiya emas; resurs tejankorlik faqat cho'kma tarkibidagi foydali komponent qayta ishlanganda yuzaga keladi. Uchinchi mezon — energiya sarfi — elektrokimyoviy jarayonlarning asosiy zaif nuqtalaridan biridir. Tok zichligi oshirilganda jarayon tezlashadi, lekin kuchlanish va yon reaksiyalar ko'payadi; tok zichligi pasaytirilganda energiya tejankorlik oshgandek ko'rinadi, ammo jarayon vaqti uzayib, umumiy sarf kamaymasligi mumkin. Demak, optimal rejim “maksimal ajratish foizi” emas, balki “maqsadli mahsulot sifatiga minimal umumiy energiya va minimal elektrod sarfi bilan erishish” bo'lishi kerak. To'rtinchi mezon — ikkilamchi chiqindi — ayniqsa gidroksid shlamlari, membrana yuvish eritmalari, sarflangan elektrodlar va filtr qoldiqlarida namoyon bo'ladi. Agar texnologiya asosiy oqova suvni tozalasa, lekin yuqori xavfli konsentrat hosil qilsa va bu konsentrat uchun qayta ishlash yo'li bo'lmasa, texnologiya ekologik jihatdan to'liq asoslanmagan bo'ladi. Beshinchi mezon — sanoat barqarorligi — real oqova suv tarkibi vaqt bo'yicha o'zgarishi bilan bog'liq. Galvanik sexda bir smenada nikel ko'p, keyingi smenada xrom yoki rux ko'p bo'lishi mumkin; konmetallurgiya oqimlarida pH va sulfat miqdori mavsumiy o'zgaradi; kimyoviy ishlab chiqarishda esa yuvish suvlari turli reagentlar bilan aralashadi. Shuning uchun elektrokimyoviy tizim adaptiv boshqaruvga ega bo'lishi kerak: pH, elektr o'tkazuvchanlik, oksidlanish-qaytarilish potentsiali, tok zichligi, katod potentsiali,

oqim tezligi va harorat onlayn nazorat qilinishi lozim. Sanoat chiqindi suvlarini tozalash texnologiyalariga bag'ishlangan keng qamrovli sharhlarda ham oqova suvlarning tarmoq bo'yicha tarkibi farqli bo'lgani sababli mos tozalash texnologiyasini tanlash uchun ularning xususiyatlarini chuqur tushunish zarurligi ta'kidlanadi. Elektrokimyoviy usulning yana bir muhim ustunligi — uni boshqa texnologiyalar bilan kombinatsiyalash mumkinligi. Masalan, elektrodializ metall ionlarini kontsentrlaydi, keyin elektrocho'ktirish ularni metall holatida ajratadi; elektrokoagulyatsiya kolloid va kompleks birikmalarni ushlaydi, keyin cho'kma gidrometallurgik eritmaga o'tkazilib, selektiv elektroliz qilinadi; elektrooksidlanish kompleks hosil qiluvchi organik reagentlarni parchalaydi, keyin metall ionlari katodda osonroq qaytariladi. Bunday integratsiya bitta bosqichli jarayonga nisbatan murakkabroq, ammo mahsulot tozaligi, suvni qayta ishlatish va barqarorlik bo'yicha kuchliroq. Liu va hammualliflarining sharhida ham murakkab tarkibli oqova suvdan qiymatli resurslarni ajratishda bir bosqichli elektrokimyoviy jarayon ko'pincha samarasiz bo'lishi, ko'p bosqichli yoki membranali-biologik integratsiyalangan texnologiyalar zarurligi qayd etilgan. Demak, ushbu maqola uchun asosiy ilmiy pozitsiya quyidagicha: sanoat chiqindi suvidan foydali komponent olish texnologiyasi "tozalash qurilmasi" emas, balki "suv, metall, tuz va energiya oqimlarini boshqaruvchi ishlab chiqarish moduli" sifatida loyihalaniishi kerak. Bunda iqtisodiy asoslash ham real bo'lishi zarur. Agar chiqindi suvda foydali komponent konsentratsiyasi juda past bo'lsa, uni bevosita elektrocho'ktirish maqsadga muvofiq emas; avval kontsentrlash kerak. Agar oqim hajmi kichik, lekin metall qiymati yuqori bo'lsa, selektiv elektrocho'ktirish afzal. Agar oqim hajmi katta va mineral tuzlar ko'p bo'lsa, elektrodializ va suvni qayta ishlatish iqtisodiy jihatdan muhimroq. Agar oqim tarkibi barqaror bo'lmasa, universal, lekin mahsulot tozaligi past bo'lgan elektrokoagulyatsiya boshlang'ich bosqich sifatida ishlatiladi. Mana shu differensial yondashuvsiz "elektrokimyoviy usul foydali" degan umumiy xulosa ilmiy jihatdan zaif bo'ladi.

Xulosa

Sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni elektrokimyoviy usulda ajratib olish va ularni qayta ishlash texnologiyasi ekologik tozalash, resurs tejankorlik va iqtisodiy samaradorlikni birlashtiruvchi istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, elektrokimyoviy usullar an'anaviy reagentli tozalashga nisbatan bir qator ustunliklarga ega: kimyoviy reagent sarfi kamayadi, jarayon tok va kuchlanish orqali aniq boshqariladi, ayrim metallar bevosita katod mahsuloti sifatida olinadi, mineral ionlar kontsentrlanadi, suvni ishlab chiqarishga qaytarish imkoniyati ortadi va chiqindi oqimlar ikkilamchi xomashyo manbasiga aylanishi mumkin. Biroq ushbu texnologiyaning

muvaffaqiyati faqat tozalash darajasiga emas, balki ajratilgan komponentning qayta ishlanishga yaroqliligi, mahsulot tozaligi, energiya sarfi, elektrod va membrana barqarorligi, shlam miqdori, oqova suv tarkibining o'zgaruvchanligi va yakuniy iqtisodiy natijaga bog'liq. Metallga boy oqimlar uchun selektiv elektrocho'ktirish, aralash kolloid-metal oqimlar uchun elektrokoagulyatsiya va cho'kmani keyingi qayta eritish, yuqori minerallashtirilgan oqimlar uchun elektrodializ yoki membranali kontsentrash eng maqbul yo'nalishlar sifatida baholandi. Texnologik jihatdan eng asosli sxema quyidagi ketma-ketlikdan iborat bo'lishi kerak: oqova suv tarkibini tahlil qilish, pH va elektr o'tkazuvchanlikni sozlash, foydali komponentni selektiv ajratish yoki kontsentrash, ajratilgan mahsulotni yuvish-quritish-tozalash, kerak bo'lsa qayta eritish yoki kristallizatsiya qilish, tozalangan suvni ishlab chiqarish sikliga qaytarish va hosil bo'lgan ikkilamchi qoldiqni xavfsiz boshqarish. Maqolada asoslangan ilmiy xulosaga ko'ra, elektrokimyoviy texnologiyalar sanoat chiqindi suvlarini faqat zararsizlantirish vositasi sifatida emas, balki metallar, tuzlar, ozuqa elementlari va suvni qayta olishga xizmat qiluvchi resurs qayta tiklash tizimi sifatida loyihalaniishi kerak. Amaliy tavsiya sifatida sanoat korxonalarida chiqindi suvlar tarkibini doimiy monitoring qilish, oqimlarni aralashtirib yubormasdan manba bo'yicha ajratish, yuqori qiymatli komponentlar uchun selektiv elektroliz rejimlarini ishlab chiqish, elektrokoagulyatsiya cho'kmalarini qayta ishlash yo'lini oldindan belgilash, elektrodializ kontsentratlarini kristallizatsiya yoki elektrocho'ktirishga yo'naltirish hamda texnologiyaning energiya-material balansini hisoblash zarur. Umumiy xulosa shuki, sanoat chiqindi suvlaridan foydali komponentlarni elektrokimyoviy usulda ajratib olish texnologiyasi faqat laboratoriya darajasidagi innovatsion g'oya emas, balki to'g'ri loyihalansa, sanoat korxonalarida ekologik yuklamani kamaytiruvchi, qimmatli xomashyoni qaytaruvchi, suv sarfini qisqartiruvchi va aylanma iqtisodiyotga xizmat qiluvchi amaliy texnologik yechimga aylanishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Kang Z. va boshqalar. Research Progress on the Application of Electrodialysis Technology for Clean Discharge Water Treatment from Power Plants. *Water*, 2025. Manbada elektrodializ texnologiyasining xlorid, sulfat va boshqa erigan tuzlarni ajratish, suvni qayta ishlatish va tuzlarni kontsentrashdagi imkoniyatlari bayon qilingan.
2. Хамидов, А. Ф., А. А. Набиев, and С. М. Ахмедов. "КАЛИЙ ХЛОРИДИ ЭЛЕКТРОЛИЗИДА УНУМДОРЛИККА ТАЪСИР ЭТУВЧИ БАЪЗИ ОМИЛЛАРНИ ЎРГАНИШ." *Development and innovations in science* 3.2 (2024): 131-134.

3. Axmedov, S. M. "GALVANIK QOPLAMLAR." World scientific research journal 26.2 (2024): 97-99.
4. Ahmedov, Sultan, and Shahzodbek Abdunazarov. "POLIMER CHIQINDILARNI QAYTA ISHLASH MUAMMOLARI." Empowerment of youth intellectual success (EYIS) 2.3 (2025): 31-34.
5. Axmedov, Sultan. "CONSTRUCTION MATERIALS CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE CORROSION ANALYSIS." Развитие педагогических технологий в современных науках 4.6 (2025): 33-36.
6. Kushmatov, O. E., and S. M. Axmedov. "Применение методов промт-инжиниринга для генерации учебных материалов и использование их в преподавании дисциплин по направлению «химическая технология»." Строительство и образование 4.6 (2025): 159-165.
7. Otakuziyeva Vazira, Mamadjanov Iskandar Baxtiyorovich, and Xasanov Diyorbek Ramish ogli. "YUQORI XROMLI PO'LATLARNING TUZILISHI VA XOSSALARI." Science Promotion 1.1 (2023): 5-9.
8. Otakuziyeva Vazira. "KIMYO SANOATIDA KO'MIR KULINI OLISH VA QAYTA ISHLASH." " ENGLAND" MODERN PSYCHOLOGY AND PEDAGOGY: PROBLEMS AND SOLUTION 10.1 (2023).
9. Otakuziyeva Vazira, Mamadjanov Iskandar Baxtiyorovich, and Abdunazarov Shahzodbek. "9-12% Cr O'Z ICHIGA OLGAN MARTENSITLI PO'LATLARGA ISSIQLIK BILAN ISHLOV BERISH." Science Promotion 1.1 (2023): 1-4.
10. Shaxzodbek G'ofurjon o'gli, Vahobov, and Otakuziyeva Vazira Usmonjonovna. "PLASTMASSALAR ISHLAB CHIQRISH TEXNOLOGIYASINI TAKOMILASHTIRISH." " ENGLAND" MODERN PSYCHOLOGY AND PEDAGOGY: PROBLEMS AND SOLUTION 10.1 (2023).