



NOORGANIK TUZLAR SAQLOVCHI OQOVA SUVLARNI ELEKTROKIMYOVIY TOZALASH JARAYONIGA pH VA HARORATNING TA'SIRI

Ahmedov Sultan Mukaramovich
Kimyo fanlari nomzodi Qo'qonDU

Annotatsiya: Mazkur maqolada noorganik tuzlar saqlovchi sanoat oqova suvlarini elektrokimyoviy usulda tozalash jarayoniga muhit pH ko'rsatkichi va haroratning ta'siri ilmiy-texnologik jihatdan tahlil qilindi. Elektrokimyoviy tozalash jarayonlari, xususan elektrokoagulyatsiya, elektrokimyoviy oksidlanish, elektroflotatsiya va elektrodializ sanoat oqova suvlaridan erigan ionlar, og'ir metallar, sulfatlar, xloridlar, fosfatlar, nitratlar, suspenziyalar va kolloid zarrachalarni ajratishda istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Zamonaviy tadqiqotlarda elektrokimyoviy tozalash samaradorligiga pH, tok zichligi, eritma elektr o'tkazuvchanligi, elektrod materiali, aralastirish sharoiti va jarayon davomiyligi kuchli ta'sir ko'rsatishi ko'rsatilgan. Ayniqsa pH qiymati metall gidroksidlarining hosil bo'lishi, flokulyatsiya, zaryad neytrallanishi, anod va katod yuzasidagi passivlanish, xlorli va kislorodli faol oksidlovchi zarrachalar hosil bo'lishi hamda ionlarning cho'kish shakliga bevosita ta'sir qiladi. Harorat esa eritma qovushqoqligi, diffuziya tezligi, elektr o'tkazuvchanlik, elektrod reaksiyalari kinetikasi, gaz pufakchalari hosil bo'lishi va energiya sarfi bilan bog'liq muhim parametrdir. Tadqiqotda pH va haroratning yakka holdagi emas, balki o'zaro bog'langan ta'siri tahlil qilinib, noorganik tuzlar bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalashda optimal sharoitlar umumiy qoida sifatida emas, balki ion tarkibi, elektrod turi, tok zichligi va kerakli yakuniy suv sifati asosida belgilanishi zarurligi asoslandi. Maqolada pH 6,5–8,5 oralig'i ko'plab elektrokoagulyatsion tizimlar uchun qulay bo'lishi mumkinligi, kuchli kislotali sharoit ayrim elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarini faollashtirishi, yuqori ishqoriy muhit esa metall gidroksidlari cho'kishini kuchaytirishi bilan birga elektrod passivlanishi va energiya sarfini oshirishi mumkinligi ko'rsatildi. Harorat bo'yicha esa ko'pchilik sanoat tizimlarida atrof-muhit haroratida ishlash iqtisodiy jihatdan maqbul bo'lib, sun'iy qizdirish faqat reaksiya tezlik, diffuziya yoki oksidlovchi zarrachalar hosil bo'lishidagi yutuq energiya sarfini oqlagan hollarda maqsadga muvofiq hisoblanadi. Natijada pH va haroratni nazorat qilish elektrokimyoviy tozalashning yordamchi omili emas, balki jarayon samaradorligi, elektr energiyasi sarfi, elektrod yemirilishi, ikkilamchi cho'kma miqdori va ekologik xavfsizlikni belgilovchi asosiy boshqaruv parametrlaridan biri ekani ilmiy asoslandi.

Kalit so'zlar: oqova suv, noorganik tuzlar, elektrokimyoviy tozalash, elektrokoagulyatsiya, pH, harorat, og'ir metallar, xloridlar, sulfatlar, elektrod, tok zichligi, elektr o'tkazuvchanlik, flokulyatsiya, energiya sarfi.

Kirish

Sanoat korxonalarida hosil boʻladigan oqova suvlar tarkibi koʻpincha murakkab boʻlib, ularda organik moddalar bilan bir qatorda erigan noorganik tuzlar, ogʻir metall ionlari, sulfat, xlorid, nitrat, fosfat, karbonat, gidrokarbonat, ammoniy, kalsiy, magniy, natriy, kaliy va temir birikmalari uchraydi. Bunday oqova suvlar kimyo, neft-gaz, metallurgiya, galvanika, konchilik, toʻqimachilik, qogʻoz-sellyuloza, mineral oʻgʻitlar ishlab chiqarish, charm sanoati, energetika va mashinasozlik korxonalarida hosil boʻladi. Noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarning xavfi shundaki, ular suv havzalarining mineralizatsiyasini oshiradi, tuproqning shoʻrlanishiga olib keladi, suvning qattiqligini kuchaytiradi, biologik tozalash tizimlariga salbiy taʼsir koʻrsatadi va ayrim ionlar, xususan ogʻir metallar, ftoridlar, nitritlar hamda yuqori konsentratsiyadagi xloridlar tirik organizmlar uchun toksik taʼsir koʻrsatadi. Anʼanaviy tozalash usullari — kimyoviy neytrallash, reagentli choʻktirish, ion almashinish, membranali ajratish, adsorbsiya va biologik tozalash — maʼlum sharoitlarda samarali boʻlsa-da, ularning har biri alohida cheklovga ega: reagent sarfi yuqori boʻlishi, koʻp miqdorda ikkilamchi choʻkma hosil qilishi, membranalar tez ifloslanishi, yuqori minerallashtirilgan suvda biologik jarayonlar sustlashishi yoki tozalash tannarxi oshishi mumkin. Shu nuqtayi nazardan elektrokimyoviy tozalash usullari sanoat oqova suvlarini qayta ishlashda muhim alternativ yoʻnalish sifatida qaraladi. Elektrokoagulyatsiya jarayonida alyuminiy yoki temir kabi eruvchan anodlardan metall ionlari hosil boʻlib, ular suv muhitida gidrolizlanadi va metall gidroksid floklarini hosil qiladi; bu floklar erigan va kolloid ifloslantiruvchilarni adsorbsiya, zaryad neytrallanishi, koagulyatsiya va choʻktirish orqali ajratadi. Elektrokimyoviy oksidlanishda esa anod yuzasida yoki eritmada gidroksil radikallari, faol xlor shakllari, persulfatlar va boshqa oksidlovchi zarrachalar hosil boʻlishi mumkin; bu jarayonlar murakkab ifloslantiruvchilarni parchalash, rang, hid, toksiklik va kimyoviy kislorod sarfini kamaytirish uchun ishlatiladi. Elektrokimyoviy texnologiyalarning afzalligi shundaki, koagulant modda bevosita jarayon ichida hosil boʻladi, reagent dozasini elektr toki orqali boshqarish mumkin, qurilma ixcham boʻladi va ayrim holatlarda yuqori avtomatlashtirish darajasiga erishiladi. Biroq bu texnologiyalarni haddan tashqari ideal koʻrsatish xato boʻladi: ularning samaradorligi elektrod materiali, tok zichligi, pH, harorat, elektr oʻtkazuvchanlik, elektroliz vaqti, elektrodlar oraligʻi, suvdagi ionlar tarkibi, aralashtirish intensivligi va elektrod yuzasining passivlanish holatiga kuchli bogʻliq. Ilmiy adabiyotlarda elektrokoagulyatsiya tizimiga pH, tok zichligi, eritma elektr oʻtkazuvchanligi, elektrod materiali va aralashtirish sharoiti kabi parametrlar taʼsir qilishi alohida qayd etilgan. Demak, noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalashda pH va haroratni oddiy yordamchi parametr sifatida emas, balki butun jarayon mexanizmini belgilovchi boshqaruv omillari sifatida baholash kerak. pH qiymati metall ionlarining eruvchanligi, gidroksidlar choʻkishi, amfoter gidroksidlarning qayta erishi, elektrod yuzasida passiv qatlam hosil boʻlishi, karbonat-bikarbonat muvozanati, xloridli suvda faol xlor shakllarining ulushi va ogʻir metallarni choʻktirish darajasiga bevosita taʼsir koʻrsatadi. Masalan, alyuminiy asosidagi elektrokoagulyatsiyada Al^{3+} ionlari gidrolizlanib $Al(OH)_3$ floklarini hosil qiladi, lekin juda kislotali sharoitda koagulant shakllari yetarli barqaror boʻlmasligi,

juda ishqoriy sharoitda esa alyuminat komplekslari hosil bo'lib, cho'kma samaradorligi pasayishi mumkin. Temir elektrodlarida esa Fe^{2+} va Fe^{3+} ionlarining gidrolizi, oksidlanishi va gidroksid shaklida cho'kishi pHga bog'liq bo'lib, og'ir metallar va fosfatlarni ajratishda pH oraliq'i hal qiluvchi ahamiyatga ega. Haroratning ta'siri ham ikki tomonlama: harorat oshganda diffuziya tezlashadi, eritma qovushqoqligi kamayadi, elektr o'tkazuvchanlik ortadi va elektrod reaksiyalari kinetikasi faollashadi, ammo bir vaqtning o'zida gaz ajralishi, elektrod yemirilishi, passivlanish, cho'kma strukturasi o'zgarishi va energiya xarajatlari oshishi mumkin. Ayrim elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida harorat ijobiy ta'sir ko'rsatsa-da, zamonaviy sharhlarda ko'plab tizimlar uchun ortiqcha qizdirish iqtisodiy jihatdan har doim ham o'zini oqlamasligi, odatda atrof-muhit haroratida ishlash afzal ekani ta'kidlanadi. Ushbu maqolaning maqsadi noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalash jarayonida pH va haroratning nazariy, texnologik va amaliy ta'sir mexanizmlarini tahlil qilish, ularning tozalash samaradorligi, energiya sarfi, elektrod materiallari yemirilishi va ikkilamchi cho'kma hosil bo'lishiga ta'sirini ilmiy asoslash hamda sanoat amaliyoti uchun optimal boshqaruv yondashuvini ishlab chiqishdan iborat.

Materiallar va metodlar

Tadqiqot nazariy-tahliliy va ilmiy-uslubiy yondashuv asosida olib borildi, bunda noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalash jarayonlari elektrokoagulyatsiya, elektrokimyoviy oksidlanish va elektroflotatsiya mexanizmlari doirasida o'rganildi. Obyekt sifatida tarkibida xlorid, sulfat, nitrat, fosfat, karbonat, gidrokarbonat, kalsiy, magniy, temir, alyuminiy, mis, rux, nikel, xrom, qo'rg'oshin va kadmiy ionlari mavjud bo'lishi mumkin bo'lgan sanoat oqova suvlari qabul qilindi. Bunday tizimlarda pH mustaqil ko'rsatkich emas, balki ionlarning gidrolizlanish, komplekslanish, cho'kish va oksidlanish-qaytarilish muvozanatini belgilovchi integral parametr sifatida baholandi. Tadqiqot metodikasida pHning ta'siri uchta asosiy zonaga ajratib tahlil qilindi: kislotali muhit, ya'ni $pH < 6$; neytralga yaqin muhit, ya'ni $pH 6-8,5$; ishqoriy muhit, ya'ni $pH > 8,5$. Kislotali muhitda vodorod ionlari konsentratsiyasi yuqori bo'lgani sababli katodda vodorod ajralishi kuchayadi, ayrim metall gidroksidlari to'liq cho'kmasligi mumkin, lekin elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida kuchli oksidlovchi zarrachalar hosil bo'lishi qulaylashishi mumkin. Neytralga yaqin muhitda alyuminiy va temir gidroksid floklari hosil bo'lishi, koagulyatsiya va adsorbsiya jarayonlari uchun nisbatan qulay sharoit yuzaga keladi. Ishqoriy muhitda ko'plab og'ir metall ionlari gidroksid sifatida cho'kadi, ammo amfoter metallar, jumladan alyuminiy, rux va xromning ayrim shakllari yuqori pHda qayta eruvchan komplekslarga o'tishi mumkin. Harorat ta'siri esa $15-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ va $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan yuqori sharoitlar bo'yicha tahlil qilindi. Bunda haroratning eritma elektr o'tkazuvchanligi, ionlar harakatchanligi, elektrod potentsiali, anod erishi, katodda gaz hosil bo'lishi, floklarning zichligi va cho'kish tezligiga ta'siri baholandi. Elektrokimyoviy jarayonning asosiy miqdoriy ko'rsatkichlari sifatida tozalash samaradorligi, elektrod sarfi, energiya sarfi, pHning jarayon davomida o'zgarishi, haroratning vaqt bo'yicha barqarorligi va hosil bo'lgan cho'kma miqdori qabul qilindi. Tozalash samaradorligi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$\eta = (C_0 - C_t) / C_0 \cdot 100\%$ $\eta = (C_0 - C_t) / C_0 \cdot 100\%$, bu yerda C_0 — ion yoki ifloslantiruvchi moddaning boshlang'ich konsentratsiyasi, C_t — elektrolizdan keyingi konsentratsiya, η — tozalash samaradorligi. Elektrod materialining nazariy sarfi Faradey qonuni asosida baholandi: $m = I \cdot t \cdot M / (z \cdot F)$, bu yerda m — erigan elektrod massasi, I — tok kuchi, t — elektroliz vaqti, M — elektrod materialining molyar massasi, z — elektronlar soni, F — Faradey doimiysi. Energiya sarfi esa $E = U \cdot I \cdot t / V$ orqali hisoblandi, bunda U — kuchlanish, I — tok kuchi, t — vaqt, V — tozalanayotgan suv hajmi. Ushbu formulalar orqali pH va haroratning ta'siri faqat sifat jihatdan emas, balki jarayonning energiya va material balansiga bog'lab baholandi. Masalan, pH optimal bo'lmasa, kerakli tozalash darajasiga erishish uchun elektroliz vaqti uzayadi, tok zichligi oshiriladi yoki ko'proq elektrod eriydi; bu esa energiya sarfini ham, ikkilamchi cho'kma miqdorini ham ko'paytiradi. Harorat optimal bo'lmasa, eritma qarshiligi oshishi yoki floklarning cho'kish xususiyati yomonlashishi mumkin. Tadqiqotda shuningdek xlorid, sulfat va fosfat ionlarining alohida ta'siri hisobga olindi, chunki xlorid ionlari elektrod erishini va faol xlor shakllarini hosil qilishni kuchaytirishi, sulfat ionlari elektr o'tkazuvchanlikni oshirishi va ayrim sharoitlarda persulfat hosil bo'lishiga sharoit yaratishi, fosfat ionlari esa temir yoki alyuminiy gidroksidlari bilan kuchli bog'lanib cho'kishi mumkin. Alyuminiy elektrodli elektrokoagulyatsiya bo'yicha tadqiqotlarda pH va qo'llab-quvvatlovchi elektrolit turi alyuminiyning anod erishiga ta'sir qilishi, xlorid ionlari pitting korroziyani kuchaytirishi, fosfatlar esa alyuminiy gidroksid/fosfat passiv qatlami hosil qilib erishni cheklashi ko'rsatilgan. Demak, metodik tahlilda pH va haroratni faqat laboratoriya shkalasidagi parametr sifatida emas, balki real sanoat oqova suvlaridagi ionlararo raqobat, elektrod yuzasi holati va energiya samaradorligi bilan bog'liq kompleks omillar sifatida o'rganish zarur. Shu sababli ushbu maqolada optimal pH va haroratni yagona raqam bilan emas, balki oqova suvning kimyoviy tarkibi, maqsadli ifloslantiruvchi modda, tanlangan elektrod turi va jarayonning texnik-iqtisodiy shartlariga bog'liq ilmiy oraliq sifatida baholash yondashuvi qo'llanildi.

Natijalar

Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalash jarayonida pHning ta'siri eng avvalo metall ionlari va elektrod mahsulotlarining gidrolizlanish holati bilan belgilanadi. Alyuminiy elektrodlar ishlatilganda anodda Al^{3+} ionlari hosil bo'ladi va ular suvda $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$ hamda yuqori pHda $Al(OH)_4^-$ shakllariga o'tishi mumkin; shu sababli koagulyatsiya uchun eng qulay holat ko'pincha amorf $Al(OH)_3$ floklari barqaror hosil bo'ladigan neytralga yaqin muhitda kuzatiladi. Temir elektrodlarida esa Fe^{2+} va Fe^{3+} ionlari hosil bo'lib, ular $Fe(OH)_2$ va $Fe(OH)_3$ shaklida cho'kadi hamda fosfatlar, xromatlar, sulfidlar va og'ir metall ionlarini bog'lashda faol ishtirok etadi. pH juda past bo'lganda metall gidroksidlarning cho'kishi susayadi, chunki ortiqcha H^+ ionlari gidroksidlar hosil bo'lishini cheklaydi; natijada elektrod erishi bo'lsa ham, hosil bo'lgan koagulant flok shaklida yetarlicha ajralmasligi mumkin. pH juda yuqori bo'lganda esa bir tomondan ko'plab og'ir metallar gidroksid sifatida cho'kadi, ikkinchi

tomondan amfoter gidroksidlar qayta erishi, elektrod yuzasida passiv qatlam hosil bo'lishi va elektr qarshilik ortishi kuzatilishi mumkin. Shu sababli elektrokoagulyatsiyada "pH qancha yuqori bo'lsa, tozalash shuncha yaxshi" degan fikr noto'g'ri; ayrim og'ir metallar uchun ishqoriy muhit foydali bo'lsa, alyuminiy koagulyatsiyasi yoki elektrod barqarorligi uchun bu holat samarasiz bo'lishi mumkin. Og'ir metallarni elektrokoagulyatsiya orqali ajratish bo'yicha 2024-yilgi tadqiqotda alyuminiy anod va zanglamas po'lat katod ishtirokida qo'rg'oshin, kadmiy, rux, xrom, nikel, marganes va mis ionlarini olib tashlashda yuqori samaradorlikka erishilgan, biroq aralash ionli real suvlar individual eritmalarga nisbatan murakkabroq natija bergani qayd etilgan. Bu holat noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlar uchun muhim xulosani beradi: laboratoriyada bitta ion uchun topilgan optimal pH real sanoat oqovasida bir nechta ionlar raqobati sababli o'zgarishi mumkin. Elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida pHning ta'siri boshqacha mexanizmga ega. Kislotali muhitda ayrim anodlarda gidroksil radikallari va boshqa kuchli oksidlovchi zarrachalar samaraliroq hosil bo'lishi mumkin, ishqoriy muhitda esa karbonat va gidrokarbonat ionlari radikallarni yutib, oksidlanish samaradorligini pasaytiradi. Real petro-kimyoviy oqova suvlarni MMO elektrodlar yordamida elektrokimyoviy oksidlash bo'yicha tadqiqotda pH 5 dan past bo'lganda COD kamayishi yuqoriroq bo'lgani, ishqoriy oqova suvda esa jarayon samaradorligi qoniqarsiz bo'lgani ko'rsatilgan. Noorganik tuzlar saqlovchi suvlar uchun bu xulosa ayniqsa ahamiyatli, chunki karbonat, gidrokarbonat, sulfat va xlorid ionlari oksidlovchi zarrachalar bilan raqobatli reaksiyaga kirishib, elektr energiyasining bir qismini maqsadli ifloslantiruvchini yo'qotishga emas, yon reaksiyalarga sarflashi mumkin. Harorat bo'yicha olingan tahliliy natijalar shuni ko'rsatadiki, harorat oshishi bilan eritmaning elektr o'tkazuvchanligi odatda ortadi va hujayra qarshiligi kamayadi, bu esa ma'lum darajada energiya sarfini kamaytirishi mumkin. Shu bilan birga, yuqori harorat elektrod yuzasidagi reaksiyalarni tezlashtiradi, ionlarning diffuziya tezligini oshiradi va floklar hosil bo'lish jarayonini jadallashtiradi. Biroq yuqori harorat har doim ijobiy natija bermaydi, chunki u gaz pufakchalari ko'payishi, koagulant floklarning maydalanishi, passiv qatlamlarning fizik-kimyoviy xususiyati o'zgarishi, elektrod yemirilishining kuchayishi va qo'shimcha issiqlik energiyasi sarfiga olib keladi. Elektrokimyoviy oksidlanish bo'yicha zamonaviy sharhda harorat ayrim hollarda oksidlanish samaradorligini oshirishi mumkinligi, lekin qo'shimcha qizdirish xarajatlari va erigan kislorod miqdori kamayishi sababli ko'pincha atrof-muhit haroratida ishlash afzal ekani qayd etilgan. Bu natija sanoat amaliyoti uchun juda muhim: agar oqova suv texnologik jarayondan allaqachon 35–45 °C haroratda chiqayotgan bo'lsa, bu issiqlikdan foydalanish mumkin, lekin sovuq oqova suvni faqat elektrokimyoviy tozalash uchun sun'iy qizdirish har doim ham iqtisodiy asoslanmaydi. pH va haroratning birgalikdagi ta'sirida esa yanada murakkab holat kuzatiladi. Harorat oshganda suvning ion mahsuloti, gidroliz tezligi va cho'kma hosil bo'lish kinetikasi o'zgaradi; bu esa bir xil pH qiymatida turli haroratlarda turlicha flok strukturasi hosil qilishi mumkin. Masalan, 20–25 °C da barqaror yirik flok hosil qiladigan pH oralig'i 40–45 °C da maydaroq yoki kamroq cho'kuvchan flok berishi mumkin. Shu sababli optimal pHni belgilashda harorat doimiy ushlab turilishi yoki hech bo'lmaganda

nazorat qilinishi shart. Pulp va qog'oz sanoati oqova suvlarini elektrokoagulyatsiya orqali tozalash bo'yicha tadqiqotda pH, elektr o'tkazuvchanlik va haroratni boshqaruv ostida ushlab turish COD chiqarilishini oshirib, energiya sarfini kamaytirgani ko'rsatilgan; nazorat qilingan sharoitda COD olib tashlash 31,67% ga oshgan, energiya iste'moli esa 48,30% ga kamaygan. Bu natija maqola mavzusi uchun prinsipial ahamiyatga ega, chunki pH va haroratni "o'lchab qo'yiladigan" emas, balki "boshqariladigan" parametr sifatida olish energiya va tozalash samaradorligini bir vaqtda yaxshilashi mumkin. Natijalar asosida noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalash uchun quyidagi ilmiy xulosa shakllanadi: elektrokoagulyatsiya jarayonida ko'p holatlarda neytralga yaqin muhit asosiy boshlang'ich diapazon sifatida olinadi, og'ir metall gidroksidlarini chuqur cho'ktirish uchun pH bosqichma-bosqich ishqoriy tomonga siljirilishi mumkin, elektrokimyoviy oksidlanishda esa maqsadli ifloslantiruvchi va elektrod turiga qarab kislotali muhit afzal bo'lishi mumkin; harorat esa odatda 20–35 °C oralig'ida energiya-tejamkor va texnologik jihatdan barqaror hisoblanadi, yuqoriroq harorat faqat mavjud chiqindi issiqlikdan foydalanilganda yoki jarayon kinetikasi sezilarli yaxshilanganda maqsadga muvofiq bo'ladi.

Muhokama

Noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalashda pH va haroratni optimallashtirish masalasi oddiy laboratoriya tanlovidan ko'ra ancha murakkab bo'lib, u kimyoviy muvozanat, elektrod kinetikasi, massaalmashinish, energiya sarfi va sanoat ekspluatatsiyasi talablarini birgalikda hisobga olishni talab qiladi. Bu yerda eng ko'p uchraydigan ilmiy-uslubiy xato shuki, tadqiqotlarda "optimal pH" bitta ion yoki bitta model eritma uchun topiladi, keyin esa u real sanoat oqova suviga bevosita ko'chiriladi. Real oqova suvda esa bir vaqtning o'zida xlorid, sulfat, karbonat, fosfat, kalsiy, magniy, og'ir metallar va ba'zan organik kompleks hosil qiluvchi moddalar mavjud bo'ladi. Bunday sharoitda ionlar bir-biri bilan raqobat qiladi, elektrod yuzasida turli passiv qatlamlar hosil qiladi va koagulyant sarfini o'zgartiradi. Masalan, xlorid ionlari alyuminiy elektrodlarida pitting korroziyani kuchaytirib, koagulyant hosil bo'lishini tezlashtirishi mumkin, lekin ayni vaqtda faol xlor shakllari hosil bo'lib, yon mahsulotlar xavfini ham oshiradi. Fosfat ionlari esa temir va alyuminiy bilan yaxshi cho'kadi, lekin elektrod yuzasida fosfat-gidroksid qatlamlari hosil qilib passivlanishni kuchaytirishi mumkin. Shuning uchun pHni tanlashda "eng yuqori tozalash foizi" bilan cheklanmaslik kerak; elektrod sarfi, cho'kma hajmi, suvning yakuniy mineralizatsiyasi, qoldiq alyuminiy yoki temir miqdori, xlorli yon mahsulotlar ehtimoli va energiya sarfi ham birgalikda baholanishi shart. Elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida ham pH tanlovi xavfli darajada soddalashtiriladi. Agar oqova suvda xlorid ko'p bo'lsa, kislotali muhitda faol xlor shakllari kuchayishi mumkin; bu oksidlanish samaradorligini oshiradi, ammo ayrim sharoitlarda xlorli organik yon mahsulotlar hosil bo'lish ehtimolini ham ko'paytiradi. Agar suvda karbonat va gidrokarbonat ko'p bo'lsa, ishqoriy muhitda gidroksil radikallari karbonat radikallariga aylanishi yoki neytrallanishi mumkin, bu esa maqsadli oksidlanish samaradorligini kamaytiradi. Shu sababli noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlar uchun elektrokimyoviy oksidlanish jarayonida pHni tanlash

faqat COD yoki rang kamayishi bilan emas, balki ion tarkibi va hosil bo'lishi mumkin bo'lgan ikkilamchi mahsulotlar bilan bog'liq xavf tahlili orqali amalga oshirilishi kerak. Harorat masalasida ham xuddi shunday qat'iy yondashuv zarur. Nazariy jihatdan haroratni oshirish reaksiyalar tezligini oshiradi, Arrenius qonuniga ko'ra ko'plab kimyoviy jarayonlarda harorat ortishi tezlik konstantasini ko'paytiradi. Lekin elektrokimyoviy tozalashda umumiy samaradorlik faqat reaksiyon tezlik bilan belgilanmaydi; elektr qarshilik, gaz ajralishi, elektrod qoplamasi barqarorligi, massaalmashinish, floklarning cho'kish xususiyati va isitish xarajati ham muhim. Agar haroratni 25 °C dan 45 °C ga oshirish tozalash vaqtini 20% kamaytirsa, lekin suvni qizdirish uchun qo'shimcha energiya sarfi jarayon energiyasini 40% oshirsa, bunday "tezlashish" sanoat uchun foydali emas. Aksincha, agar oqova suv texnologik jarayondan issiq holda chiqsa va uni sovitmasdan elektrokimyoviy reaktorga berish mumkin bo'lsa, mavjud issiqlikdan foydalanish energiya samaradorligini oshiradi. Demak, harorat bo'yicha eng to'g'ri strategiya sun'iy qizdirish emas, balki korxonaning umumiy issiqlik balansiga integratsiya qilishdir. Elektrokoagulyatsiyada pH va haroratni boshqarishning yana bir muhim tomoni jarayon davomida pHning o'z-o'zidan o'zgarishidir. Katodda suvning qaytarilishi natijasida OH⁻ ionlari hosil bo'ladi va muhit pH ko'tarilishi mumkin; anodda esa metall ionlari gidrolizlanib H⁺ hosil qilishi mumkin. Natijada reaktor ichida lokal pH zonalari paydo bo'ladi: katod yaqinida ishqoriy, anod yaqinida esa nisbatan kislotali muhit hosil bo'lishi mumkin. Agar aralashtirish yetarli bo'lmasa, umumiy o'lgangan pH jarayonning haqiqiy lokal sharoitini aks ettirmaydi. Bu esa natijalarni noto'g'ri talqin qilishga olib keladi. Shu sababli sanoat reaktorlarida pH datchiklari faqat chiqish oqimida emas, balki zarur hollarda reaktor bo'ylab joylashtirilishi, aralashtirish va oqim rejimi esa elektrokimyoviy jarayon mexanizmiga mos tanlanishi kerak. Tok zichligi ham pH va harorat bilan bog'liq. Yuqori tok zichligi ko'proq koagulyant hosil qiladi, lekin elektrod yuzasida gaz ajralishini kuchaytiradi, passivlanishni tezlashtiradi va energiya sarfini oshiradi. Past tok zichligi energiya tejamkor ko'rinishi mumkin, ammo jarayon vaqti haddan tashqari uzaysa, umumiy energiya sarfi baribir yuqori bo'lishi mumkin. Shuning uchun optimal rejim "past tok" yoki "yuqori tok" emas, balki kerakli tozalash darajasiga minimal umumiy energiya va minimal elektrod sarfi bilan erishadigan rejimdir. Amaliy tavsiya sifatida noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni tozalashda bir bosqichli sxemadan ko'ra ikki bosqichli sxema samaraliroq bo'lishi mumkin: birinchi bosqichda pH neytralga yaqin ushlab turilib elektrokoagulyatsiya orqali kolloidlar, fosfatlar, metall ionlari va suspenziyalar ajratiladi; ikkinchi bosqichda suv tarkibidagi qoldiq ionlar yoki oksidlanishi kerak bo'lgan moddalar uchun elektrokimyoviy oksidlanish yoki membranali ajratish qo'llanadi. Agar oqova suvda og'ir metallar ko'p bo'lsa, pHni bosqichma-bosqich oshirish orqali metallarni fraksion cho'ktirish mumkin. Agar xlorid ko'p bo'lsa, faol xlor hosil bo'lishi nazorat qilinishi, zarur hollarda anod materiali va pH sharoiti shunday tanlanishi kerakki, oksidlanish samaradorligi oshib, xavfli yon mahsulotlar minimal bo'lsin. Agar sulfat ko'p bo'lsa, elektr o'tkazuvchanlik yuqori bo'lishi energiya sarfini kamaytirishi mumkin, lekin yuqori sulfat sharoitida cho'kma tarkibi va korroziya xavfi ham baholanishi zarur. Muhokama natijalaridan kelib chiqib, pH va haroratni boshqarishning eng maqbul

ilmiy-amaliy modeli quyidagicha ifodalanadi: dastlab oqova suvning ion tarkibi aniqlanadi, keyin maqsadli ajratiladigan komponentlar belgilanadi, soʻng pH boʻyicha kichik oraliqli tajribalar oʻtkaziladi, harorat real sanoat sharoitiga mos holda tanlanadi, energiya va elektrod sarfi hisoblanadi, yakuniy suv sifati hamda choʻkma xavfsizligi baholanadi. Faqat shundan keyingina optimal pH va harorat haqidagi xulosa asosli boʻladi. Aks holda elektrokimyoviy tozalash jarayoni laboratoriyada samarali koʻringan, lekin sanoatda energiya sarfi yuqori, elektrod yemirilishi kuchli va choʻkma boshqaruvi murakkab texnologiyaga aylanib qoladi.

Xulosa

Noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlarni elektrokimyoviy tozalash jarayonida pH va harorat asosiy boshqaruv parametrlaridan biri boʻlib, ular tozalash samaradorligi, elektrod sarfi, elektr energiyasi isteʼmoli, choʻkma hosil boʻlishi, ionlarning kimyoviy shakli va jarayon barqarorligiga bevosita taʼsir koʻrsatadi. Tadqiqot natijalari shuni koʻrsatdiki, elektrokoagulyatsiya jarayonida pH metall gidroksid floklarining hosil boʻlishi va ifloslantiruvchi ionlarning adsorbsiya yoki choʻkma shaklida ajralishini belgilaydi. Neytralga yaqin muhit koʻplab alyuminiy va temir elektrodli tizimlar uchun qulay boshlangʻich sharoit boʻlsa-da, ogʻir metall ionlari, fosfatlar, xromatlar yoki amfoter metallar mavjudligida optimal pH alohida tajriba asosida aniqlanishi kerak. Kuchli kislotali muhit ayrim elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida yuqori samaradorlik berishi mumkin, biroq metall gidroksidlar choʻkishini cheklaydi va elektrod korroziyasi xavfini oshiradi. Kuchli ishqoriy muhit ayrim metall ionlarini choʻktirishda foydali boʻlsa-da, amfoter birikmalarning qayta erishi, passiv qatlamlar hosil boʻlishi va radikal oksidlanish samaradorligi pasayishi mumkin. Haroratning oshishi diffuziya va elektrod reaksiyalarini tezlashtiradi, eritma elektr oʻtkazuvchanligini oshiradi va ayrim holatlarda tozalash vaqtini qisqartiradi, lekin sunʼiy qizdirish qoʻshimcha energiya sarfini talab qiladi va har doim ham iqtisodiy jihatdan oʻzini oqlamaydi. Shu sababli sanoat sharoitida eng maqbul yondashuv oqova suvni maxsus qizdirish emas, balki mavjud texnologik issiqlikdan foydalanish va jarayonni odatda 20–35 °C atrofidagi barqaror haroratda olib borishdir. Maqolada asoslangan ilmiy xulosaga koʻra, pH va haroratni optimallashtirish faqat yakuniy tozalash foizi bilan baholanmasligi kerak; energiya sarfi, elektrod yemirilishi, choʻkma hajmi, qoldiq ionlar, ikkilamchi ifloslanish xavfi va reaktorning sanoat barqarorligi ham hisobga olinishi shart. Amaliy jihatdan noorganik tuzlar saqlovchi oqova suvlar uchun quyidagi yondashuv maqsadga muvofiq: avval suvning ion tarkibi va elektr oʻtkazuvchanligi aniqlanadi, keyin pH boʻyicha optimal oraliq laboratoriya tajribalari orqali belgilanadi, harorat esa real sanoat sharoitiga mos tanlanadi, jarayon davomida pHning oʻzgarishi onlayn nazorat qilinadi, yakuniy suv va hosil boʻlgan choʻkma tarkibi alohida baholanadi. Umumiy xulosa shuki, pH va haroratni ilmiy asoslangan boshqarish elektrokimyoviy tozalash texnologiyasining samaradorligini oshiradi, energiya sarfini kamaytiradi, elektrod materiallaridan foydalanishni optimallashtiradi va noorganik tuzlar bilan ifloslangan sanoat oqova suvlarini ekologik xavfsiz qayta ishlash imkoniyatini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar roʻyxati

1. Boinpally S., Kolla A., Kainthola J., Kodali R., Vemuri J. **A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment.** Water Cycle, 2023. Elektrokoagulyatsiya jarayoniga pH, tok zichligi, elektr o'tkazuvchanlik, elektrod materiali va aralash tirish sharoitlari ta'siri bo'yicha asosiy manba.
2. Mirshafiee A., Nourollahi M., Shahriary A. **Application of electro oxidation process for treating wastewater from petrochemical with mixed metal oxide electrode.** Scientific Reports, 2024. MMO elektrodlar yordamida real neft-kimy oqova suvlarini elektrokimyoviy oksidlashda pH ta'siri, COD kamayishi va energiya sarfi bo'yicha tadqiqot.
3. Valenzuela L. va boshqalar. **An Overview of the Advantages of Combining Photo- and Electrooxidation Processes in Actual Wastewater Treatment.** Catalysts, 2024. Elektrokimyoviy oksidlanish jarayonlarida tok zichligi, pH, harorat va atrof-muhit haroratida ishlash afzalliklari bo'yicha sharh.
4. Al-Marri J. S., Abouedwan A. B., Ahmad M. I., Bensalah N. **Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor from produced wastewaters.** Frontiers in Water, 2023. Alyuminiy elektrodlarida pH, xlorid va fosfat ionlarining anod erishi hamda koagulyant hosil bo'lishiga ta'siri bo'yicha tadqiqot.
5. Bakry S. A., Matta M. E., Noureldin A. M., Zaher K. **Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of heavy metals from wastewater using aluminum electrodes under variable operating conditions.** Desalination and Water Treatment, 2024. Alyuminiy anodli elektrokoagulyatsiyada og'ir metall ionlarini ajratish samaradorligi bo'yicha eksperimental tadqiqot.
6. 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.
7. Axmedov, S. M. "GALVANIK QOPLAMLAR." World scientific research journal 26.2 (2024): 97-99.
8. Ahmedov, Sultan, and Shahzodbek Abdunazarov. "POLIMER CHIQUINDILARNI QAYTA ISHLASH MUAMMOLARI." Empowerment of youth intellectual success (EYIS) 2.3 (2025): 31-34.
9. Axmedov, Sultan. "CONSTRUCTION MATERIALS CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE CORROSION ANALYSIS." Развитие педагогических технологий в современных науках 4.6 (2025): 33-36.
10. Kushmatov, O. E., and S. M. Axmedov. "Применение методов пром-инжиниринга для генерации учебных материалов и использование их в преподавании дисциплин по направлению «химическая технология»." Строительство и образование 4.6 (2025): 159-165.
11. Usmonjonovna, Otakuziyeva Vazira, Mamadjanov Iskandar Baxtiyorovich, and Xasanov Diyorbek Ramish ogli. "YUQORI XROMLI PO'LATLARNING TUZILISHI VA XOSSALARI." Science Promotion 1.1 (2023): 5-9.

12. Usmonjonovna, Otakuziyeva Vazira. "KIMYO SANOATIDA KO'MIR KULINI OLISH VA QAYTA ISHLASH." " ENGLAND" MODERN PSYCHOLOGY AND PEDAGOGY: PROBLEMS AND SOLUTION 10.1 (2023).

13. Usmonjonovna, 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.

14. Shaxzodbek G'ofurjon o'g, Vahobov, and Otakuziyeva Vazira Usmonjonovna. "PLASTMASSALAR ISHLAB CHIQRISH TEXNOLOGIYASINI TAKOMILASHTIRISH." " ENGLAND" MODERN PSYCHOLOGY AND PEDAGOGY: PROBLEMS AND SOLUTION 10.1 (2023).

15. Usmonjonovna, Otakuziyeva Vazira. "ATROF MUHITNI CHIQINDILARDAN QISMAN TOZALASH VA POLIMER MODDALAR BOLGAN PLASTMASSALARNI QAYTA." " ENGLAND" MODERN PSYCHOLOGY AND PEDAGOGY: PROBLEMS AND SOLUTION 10.1 (2023).