NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-9]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

02.00.00-KIMYO FANLARI
journal.namdu.uz
CHEMICAL SCIENCES

UO‘K 628.316:546.48

MAHALLIY XOMASHYODAN OLINADIGAN TEMIR(III) XLORID ERITMALARI YORDAMIDA SUVLI ERITMALARDAN KADMIY(II) IONLARINI ZARARSIZLANTIRISH

Oljayev Dilshod Nurmurodovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti tayanch doktoranti, Navoiy, O‘zbekiston. E-mail: dilshodoljaev88@mail.ru
Nurmurodov Tulkin Isamurodovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, t.f.d., professor, Navoiy, O‘zbekiston. E-mail: nurmurodovtukin71@mail.ru
Temirov Uktam Shavkatovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, t.f.d., professor, Navoiy, O‘zbekiston. E-mail: temirov.uktam.1985@gmail.com. Scopus Author ID: 57216740749

Annotatsiya: *Ishning maqsadi konsentratsiyasi 27,04–41,30 % bo‘lgan temir(III) xlorid eritmalari bilan suvli eritmalardan kadmiy(II) ionlarini zararsizlantirish qonuniyatlarini aniqlashdan iborat. $Cd(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$ ning model eritmalarida (C_0 = 50,08–250,06 mg/l) beshta reagent konsentratsiyasi va to‘rtta massa nisbati (100: 0,05–0,2) bo‘yicha 180 ta tajriba o‘tkazildi. Kadmiyning zararsizlanish darajasi reagent miqdoriga kuchli bog‘liq ekani ko‘rsatildi: C_0 = 100,29 mg/l da 27,04 % li eritma bilan nisbatni 100: 0,05 dan 100: 0,1 ga oshirish darajani 61,22 dan 84,54 % gacha, 100: 0,2 gacha oshirish esa 96,82 % gacha oshiradi; 100: 0,2 nisbatda reagentlar orasidagi farq 1,81 foiz punktdan oshmaydi (96,82–98,63 %). Kichik boshlang‘ich konsentratsiyalarda qolgan kadmiy 0,56–0,72 mg/l dan pastga tushmaydi. Ajratilgan kadmiyning temirga molyar nisbati 0,42–0,60 ni tashkil etib, gidratlangan temir oksidining sorbsion markazlari miqdoridan oshadi, bu adsorbsiya bilan birga birgalikda cho‘kish va supuruvchi koagulyatsiya mexanizmlarini ko‘rsatadi. Usul kuchli ifloslangan oqova suvlarni dastlabki reagentli tozalash bosqichi sifatida tavsiya etiladi.*

Kalit so‘zlar: *kadmiy, temir(III) xlorid, koagulyatsiya, og‘ir metallar, oqova suv, zararsizlantirish darajasi, birgalikda cho‘kish.*

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ИОНОВ КАДМИЯ(II) В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ РАСТВОРАМИ ХЛОРИДА ЖЕЛЕЗА(III), ПОЛУЧАЕМЫМИ ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ

Аннотация: *Цель работы – установить закономерности обезвреживания ионов кадмия(II) в водных растворах растворами хлорида железа(III) концентрацией 27,04–41,30 %. На модельных растворах $Cd(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$ (C_0 = 50,08–250,06 мг/л) выполнено 180 опытов при пяти концентрациях реагента и четырёх массовых соотношениях (100: 0,05–0,2). Показано, что степень обезвреживания кадмия сильно зависит от количества реагента: при C_0 = 100,29 мг/л и 27,04 %-ном растворе увеличение соотношения со 100: 0,05 до 100: 0,1 повышает степень с 61,22 до 84,54 %, до 100: 0,2 – до 96,82 %; при 100: 0,2 различие между реагентами не превышает 1,81 п.п. (96,82–98,63 %). При малых исходных концентрациях остаточный кадмий не опускается ниже 0,56–0,72 мг/л. Мольное отношение удалённого кадмия к железу 0,42–0,60 превышает число сорбционных центров гидратированного оксида железа, что указывает на соосаждение и «вымётывающую» коагуляцию. Метод рекомендован как стадия предварительной реагентной очистки сильно загрязнённых сточных вод.*

Ключевые слова: *кадмий, хлорид железа(III), коагуляция, тяжёлые металлы, сточные воды, степень обезвреживания, соосаждение.*

REMOVAL OF CADMIUM(II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY IRON(III) CHLORIDE SOLUTIONS OBTAINABLE FROM LOCAL RAW MATERIALS

Abstract: *The study establishes how cadmium(II) is removed from aqueous solutions by iron(III) chloride solutions of 27.04–41.30 % concentration. In model $Cd(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$ solutions (C_0 = 50.08–250.06 mg/L), 180 runs covered five reagent concentrations and four mass ratios (100: 0.05–0.2). Removal depended strongly on reagent amount: at C_0 = 100.29 mg/L with the 27.04 % solution, raising the ratio from 100: 0.05 to 100: 0.1 increased removal from 61.22 to 84.54 %, and to 100: 0.2 increased it to 96.82 %; at 100: 0.2 the reagents differed by no more than 1.81 percentage points (96.82–98.63 %). At low initial concentrations residual cadmium did*

not fall below 0.56–0.72 mg/L. The removed Cd/Fe molar ratio of 0.42–0.60 exceeds the site density of hydrous ferric oxide, indicating co-precipitation and sweep coagulation in addition to adsorption. The method is recommended as a pre-treatment stage for heavily contaminated wastewater.

Keywords: *cadmium, iron(III) chloride, coagulation, heavy metals, wastewater, removal efficiency, co-precipitation.*

KIRISH

Kadmiy inson salomatligi uchun eng xavfli og‘ir metallardan biri bo‘lib, Jahon sog‘liqni saqlash tashkiloti ichimlik suvida uning uchun 0,003 mg/l yo‘l-yo‘riq qiymatini belgilagan [1], O‘zbekiston Respublikasining SanPiN № 0211-06 sanitariya qoidalari esa markazlashgan ichimlik suvida 0,001 mg/l ni talab qiladi [2]. Kadmiy rangli metallurgiya, galvanika, akkumulyator ishlab chiqarish va konchilik korxonalarining oqova suvlarida uchraydi va kichik konsentratsiyalarda ham suv ekotizimlariga xavf tug‘diradi.

Og‘ir metallarni oqova suvlardan ajratishning eng keng tarqalgan va arzon usuli temir(III) va alyuminiy tuzlari bilan koagulyatsiyadir. Temir(III) xlorid suvga qo‘shilganda gidrolizlanib, $Fe^{3+} \rightarrow Fe(OH)^{2+} \rightarrow Fe(OH)_2^{+} \rightarrow Fe(OH)_3 \rightarrow Fe(OH)_4^{-}$ ketma-ketligida gidrokso-komplekslar va amorf gidroksid cho‘kmasini hosil qiladi [3]. Fe(III) gidrolizining termodinamik konstantalari [4] va xlorid eritmalarida polimer zarralarining yiriklashishi hamda akaganeit hosil bo‘lishi [5] adabiyotda batafsil tavsiflangan. Hosil bo‘lgan gidratlangan temir oksidi (ferrigidrit) sirtida og‘ir metallar adsorbsiyalanadi, bu jarayon sirt komplekslanish modellari bilan miqdoriy tavsiflanadi [6].

Biroq turli metallar ferrigidrit sirtiga turlicha bog‘lanadi. He va hammualliflar 2-chiziqli ferrigidritda pH 5,6 da qo‘rg‘oshin uchun 1,20 mmol/g (≈ 249 mg/g), kadmiy uchun esa atigi 0,047 mmol/g (≈ 5,3 mg/g) adsorbsion sig‘imni aniqlagan va Pb > Cu > Zn > Cd > Ni tartibini ko‘rsatgan [7]. Demak, kadmiyni temir koagulyanti bilan ajratish qo‘rg‘oshinga qaraganda qiyinroq va reagent dozasi hamda pH ga ko‘proq bog‘liq bo‘lishi kutiladi. Johnson va hammualliflar birlamchi tozalash bosqichida koagulyatsiya va flokulyatsiya og‘ir metallarni ajratishni kuchaytirishini ko‘rsatgan [8].

O‘zbekistonda temir(III) xlorid koagulyanti ishlab chiqarilmaydi, shuning uchun mahalliy temir rudasidan olinadigan eritmalarning og‘ir metallarni zararsizlantirish qobiliyatini baholash amaliy ahamiyatga ega. Oldingi bosqichda Tebinbuloq koni rudasini va undan ajratilgan temir gidroksidini 28 % li xlorid kislota bilan qayta ishlab tarkibida 32,81 va 34,04 % $FeCl_3$ bo‘lgan suyuq mahsulotlar olingan edi. Ushbu ishning maqsadi shu konsentratsiyalar oralig‘ini qamrab oluvchi $FeCl_3$ eritmalari bilan kadmiy(II) ionlarini zararsizlantirishga reagent konsentratsiyasi, reagent nisbati va kadmiyning boshlang‘ich konsentratsiyasining ta’sirini aniqlashdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Koagulyatsiya-flokulyatsiya jarayoni suv tozalashda markaziy o‘rin tutadi: u zaryadni neytrallash, gidroksid cho‘kmasi bilan «supurish» va polimer ko‘priklar orqali dispers zarralarni yiriklashtiradi [9, 10]. Duan va Gregory sharhiga ko‘ra Fe^{3+} ioni birinchi gidrat qobig‘ida oltita suv molekulasi bilan oktaedrik koordinatsiyalangan bo‘lib, yuqori zaryad ta’sirida koordinatsiyalangan suv proton yo‘qotadi va gidrolizlangan shakllar hosil bo‘ladi. Neytral sohada asosiy mahsulot amorf gidroksid bo‘lib, u katta solishtirma sirt va ko‘p sonli sirt gidroksil guruhlariga ega.

Dzombak va Morel modeli bo‘yicha gidratlangan temir oksidining umumiy sorbsion markazlari miqdori bir mol temirga taxminan 0,2 mol (0,1–0,3) ni tashkil etadi. Bu qiymat muhim mezon bo‘lib xizmat qiladi: agar eritmadan ajratilgan metallning temirga molyar nisbati 0,2 dan sezilarli oshsa, metallning faqat sirt adsorbsiyasi bilan chiqarilishini tushuntirib bo‘lmaydi va birgalikda cho‘kish yoki metall gidroksidining mustaqil cho‘kishi ham hisobga olinishi kerak.

Temir koagulyantlarini chiqindilardan olish bo‘yicha ishlarda mahsulotning og‘ir metallarni ajratish qobiliyati ham baholangan. Almeida va Schneider temir rudasi chiqindisidan olingan $FeCl_3$ koagulyanti tarkibidagi «istalmagan metallar»ning (Mn, Pb, Cu, Cr, Zn, As) (Fe + Al) ga molyar nisbatini sifat mezoni sifatida taklif etgan [11]. Mahlohla va hammualliflar nordon shaxta suvidan olingan $FeCl_3$ bilan oqova suvni tozalagan [12]. Yevropa Ittifoqining 2020/2184 Direktivasi suv tayyorlash reagentlari inson salomatligini bevosita yoki bilvosita xavf ostiga qo‘ymasligini talab qiladi [13], shuning uchun mahalliy reagentning o‘zi ham og‘ir metallar manbai bo‘lmasligi kerak. Shu bilan birga, turli konsentratsiyali $FeCl_3$ eritmalari bilan kadmiyni zararsizlantirishning keng boshlang‘ich konsentratsiyalar oralig‘idagi tizimli ma’lumotlari kam.

METODLAR

Model eritmalar $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ning distillangan suvdagi eritmalari sifatida tayyorlandi. Kadmiyning boshlang‘ich konsentratsiyasi C_0 to‘qqiz darajada: 50,08; 75,19; 100,29; 125,31; 150,28; 174,86; 199,89; 225,15 va 250,06 mg/l qilib olindi; haqiqiy boshlang‘ich konsentratsiya har bir tajribada analitik usulda aniqlandi.

Reagent sifatida konsentratsiyasi 27,04; 31,96; 34,49; 38,37 va 41,30 mass. % bo‘lgan $FeCl_3$ eritmalari ishlatildi. Ulardan 31,96 va 34,49 % li eritmalar 28 % li xlorid kislota bilan 120 min davomida mos ravishda rudadan (suyuq fazada 32,81 % $FeCl_3$) va temir gidroksididan (34,04 %) olingan mahsulotlarga yaqin, 38,37 % li eritma 32 % li kislota bilan olingan

eng konsentrlangan eritmalarga (38,01–38,47 %) mos keladi, 27,04 % li eritma suyultirilgan, 41,30 % li eritma esa tijorat mahsulotiga yaqin variantni ifodalaydi. Ishlov berilayotgan eritma va $FeCl_3$ eritmasining massa nisbati 100: 0,05; 100: 0,1; 100: 0,15 va 100: 0,2 qilib olindi. Shunday qilib, 5 × 9 × 4 = 180 ta tajriba o‘tkazildi. 100: 0,2 nisbat 1 l eritmaga (zichligi 1 g/sm³ deb qabul qilinganda) 2 g reagent eritmasiga, ya’ni 0,541 (27,04 %) – 0,826 g (41,30 %) sof $FeCl_3$ ga yoki 3,33–5,09 mmol/l Fe ga mos keladi.

Model eritmaga hisoblangan miqdordagi reagent qo‘shildi, aralashtirildi, hosil bo‘lgan cho‘kma tindirildi va ajratildi. Ishlov berilgandan keyin eritmada qolgan kadmiy konsentratsiyasi C (mg/l) aniqlandi va zararsizlanish darajasi quyidagicha hisoblandi:

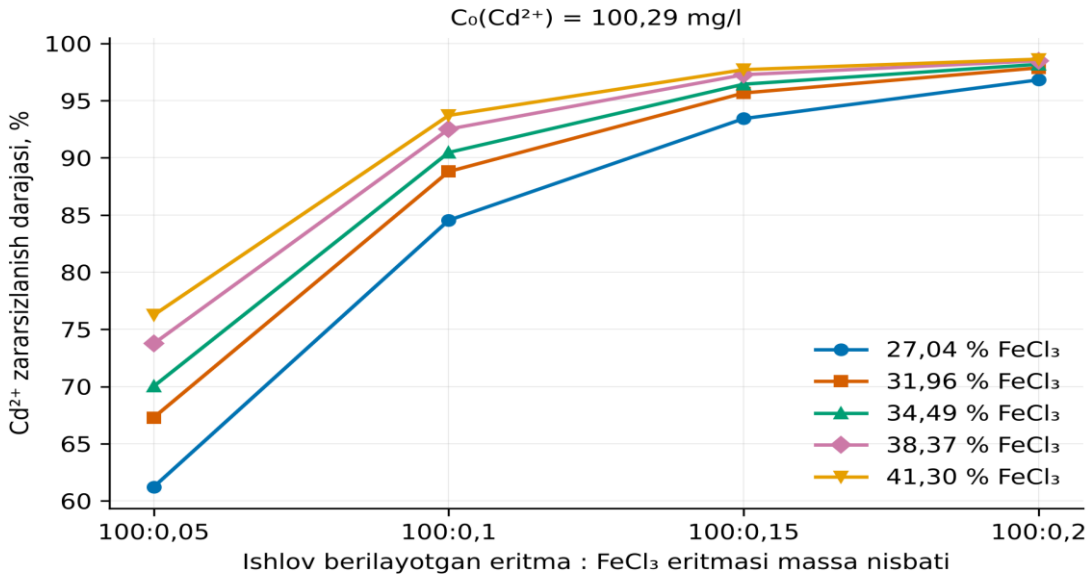
$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100\ \% \qquad (1)$$

Eritmadan ajratilgan kadmiy miqdori $C_0 - C$ (mg/l), 1 kg sof $FeCl_3$ ga to‘g‘ri keladigan ajratilgan kadmiy massasi hamda hosil bo‘ladigan $Fe(OH)_3$ cho‘kmasining hisobiy miqdori (temirning to‘liq cho‘kishi farazida, yuqori baho) va ajratilgan kadmiyning temirga molyar nisbati mualliflar tomonidan hisoblandi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Reagent nisbatining ta’siri.

Kadmiyning zararsizlanish darajasiga reagent nisbati hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatadi (1-rasm, 1-jadval). C_0 = 100,29 mg/l da 27,04 % li eritma bilan nisbat 100: 0,05 bo‘lganda daraja 61,22 % ni tashkil etadi va eritmada 38,89 mg/l kadmiy qoladi. Nisbatni 100: 0,1 ga oshirish darajani 84,54 % gacha (23,32 foiz punktga), 100: 0,15 gacha 93,43 % gacha (yana 8,89 foiz punkt) va 100: 0,2 gacha 96,82 % gacha (yana 3,39 foiz punkt) oshiradi; qolgan kadmiy mos ravishda 15,50; 6,59 va 3,19 mg/l ga kamayadi. Demak, kadmiy uchun nisbatning birinchi qadami keyingilaridan ancha katta samara beradi.



1-rasm. C_0 = 100,29 mg/l da Cd^{2+} zararsizlanish darajasining reagent nisbati va $FeCl_3$ eritmasi konsentratsiyasiga bog‘liqligi

Bu qonuniyat qo‘rg‘oshin bilan o‘tkazilgan parallel tajribalardan farq qiladi: shu sharoitda qo‘rg‘oshin uchun nisbatning har bir 0,05 qadami darajani deyarli teng, 4,30–4,50 foiz punktga oshiradi. Kadmiyning birinchi qadamdagi keskin o‘sishi reagent miqdori ma’lum chegaradan oshgandan keyin cho‘kmaning hajmi va sirti kadmiyni birgalikda cho‘ktirish uchun yetarli bo‘lishi bilan izohlanadi; keyingi qadamlarda esa qolgan kadmiy kichik bo‘lgani uchun absolyut o‘sish kamayadi.

1-jadval

Cd^{2+} zararsizlanish darajasiga (%) $FeCl_3$ eritmasi konsentratsiyasi va nisbatning ta’siri

$FeCl_3$, %	C_0, mg/l	100: 0,05	100: 0,1	100: 0,15	100: 0,2
27,04	50,08	74,85	93,05	97,48	98,55
27,04	100,29	61,22	84,54	93,43	96,82
27,04	150,28	53,22	77,81	89,16	94,40
27,04	250,06	43,74	68,13	81,74	89,33
31,96	50,08	80,30	95,40	98,24	98,78
31,96	100,29	67,29	88,80	95,67	97,87
31,96	150,28	59,21	82,98	92,51	96,34
31,96	250,06	49,30	74,02	86,42	92,64

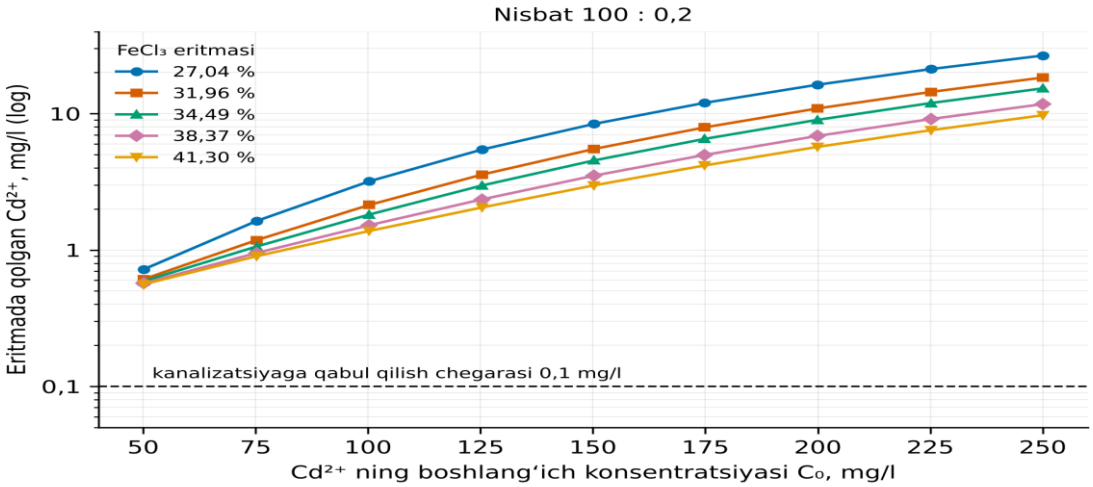
$FeCl_3$, %	C_0, mg/l	100: 0,05	100: 0,1	100: 0,15	100: 0,2
34,49	50,08	82,61	96,22	98,46	98,83
34,49	100,29	70,02	90,47	96,44	98,18
34,49	150,28	61,98	85,12	93,76	96,98
34,49	250,06	51,93	76,60	88,31	93,87
38,37	50,08	85,60	97,11	98,66	98,87
38,37	100,29	73,75	92,51	97,27	98,49
38,37	150,28	65,86	87,86	95,21	97,67
38,37	250,06	55,71	80,04	90,66	95,30
41,30	50,08	87,49	97,58	98,75	98,88
41,30	100,29	76,25	93,71	97,71	98,63
41,30	150,28	68,51	89,56	96,03	98,02
41,30	250,06	58,36	82,28	92,09	96,11

Reagent konsentratsiyasining ta'siri.

Reagent konsentratsiyasining ta'siri kichik nisbatlarda kuchli, katta nisbatlarda esa kuchsiz. C_0 = 100,29 mg/l va 100: 0,05 nisbatda zararsizlanish darajasi 27,04 % li eritma bilan 61,22 %, 31,96 % li bilan 67,29 %, 34,49 % li bilan 70,02 %, 38,37 % li bilan 73,75 % va 41,30 % li bilan 76,25 % ni tashkil etadi, ya'ni farq 15,03 foiz punkt. 100: 0,2 nisbatda esa bu qiymatlar 96,82; 97,87; 98,18; 98,49 va 98,63 % bo'lib, farq atigi 1,81 foiz punktga teng. Bu natija shuni ko'rsatadiki, bir xil massa nisbatida konsentrlangan reagent ko'proq temir kiritadi, lekin temir miqdori yetarli bo'lgandan so'ng uning qo'shimcha ortishi kadmiyni ajratishni deyarli oshirmaydi. Amaliy jihatdan bu muhim: rudadan olinadigan 31,96–34,49 % li eritmalar 100: 0,15 nisbatda tijoratga yaqin 41,30 % li eritmaning 100: 0,1 nisbatdagi natijasidan yuqori natija beradi (C_0 = 100,29 mg/l da 95,67–96,44 % ga nisbatan 93,71 %).

Boshlang'ich konsentratsiyaning ta'siri.

Boshlang'ich konsentratsiya ortishi bilan zararsizlanish darajasi kamayadi, kamayish esa kichik nisbatlarda kuchliroq. 27,04 % li eritma va 100: 0,05 nisbatda C_0 ni 50,08 dan 250,06 mg/l gacha oshirish darajani 74,85 dan 43,74 % gacha (31,11 foiz punkt), 100: 0,2 nisbatda esa 98,55 dan 89,33 % gacha (9,22 foiz punkt) kamaytiradi. 41,30 % li eritma va 100: 0,2 nisbatda pasayish 98,88 dan 96,11 % gacha, ya'ni 2,77 foiz punkt bo'ladi. Shu sharoitda qolgan kadmiy 0,56 mg/l dan 9,74 mg/l gacha ortadi (2-rasm).



2-rasm. 100: 0,2 nisbatda eritmada qolgan kadmiy miqdorining boshlang'ich konsentratsiyaga bog'liqligi

2-rasmdan ko'rinadiki, C_0 = 50,08 mg/l da barcha reagentlar bilan qolgan kadmiy 0,56–0,72 mg/l oralig'ida bo'lib, reagent konsentratsiyasini oshirish uni bu darajadan pastga tushirmaydi. Bu «qoldiq chegarasi» kadmiyning eruvchanligi va pH ga bog'liq bo'lishi mumkin: adabiyotga ko'ra kadmiyning temir gidroksidiga adsorbsiyasi pH oshishi bilan kuchayadi, $FeCl_3$ ning gidrolizi esa eritmani nordonlashtiradi. Yakuniy pH qiymati ushbu ishda tahlil qilinmagani sababli bu taxminni tasdiqlash uchun qo'shimcha tajribalar talab etiladi. Berilgan zararsizlanish darajasiga erishiladigan eng yuqori boshlang'ich konsentratsiya bo'yicha tahlil ham shuni ko'rsatadi: 95 % dan yuqori darajaga 27,04 % li eritma bilan 100: 0,2 nisbatda faqat $C_0 \le 125{,}31$ mg/l da, 41,30 % li eritma bilan esa o'rganilgan butun oraliqda ($C_0 \le 250{,}06$ mg/l) erishiladi.

Zararsizlantirish mexanizmi va reagent sarfi.

Hisoblar bo‘yicha 100: 0,2 nisbatda 1 m³ suvga 0,541–0,826 kg sof $FeCl_3$ sarflanadi va 0,356–0,544 kg/m³ quruq $Fe(OH)_3$ cho‘kmasi hosil bo‘lishi mumkin (yuqori baho). C_0 = 250,06 mg/l da 1 kg sof $FeCl_3$ 290,9 g (41,30 % li eritma) dan 413,1 g (27,04 % li eritma) gacha kadmiyni ajratadi; C_0 = 100,29 mg/l da bu ko‘rsatkich 119,7–179,5 g ni tashkil etadi. Suyultirilgan reagentda bir kilogramm $FeCl_3$ hisobiga ko‘proq kadmiy ajratilishi temir kamroq kiritilganda uning har bir moli «to‘liqroq ishlatilishini» ko‘rsatadi.

Cho‘kmaga nisbatan hisoblangan ko‘rinma sorbsion sig‘im C_0 = 100,29 mg/l da 182–273 mg/g, C_0 = 250,06 mg/l da 442–627 mg/g ni, ajratilgan kadmiyning temirga molyar nisbati esa C_0 = 250,06 mg/l da 0,42–0,60 ni tashkil etadi. Bu qiymatlar ferrigidritda kadmiy uchun aniqlangan adsorbsion sig‘imdan (≈ 5,3 mg/g) 34–118 marta yuqori va Dzombak–Morel modeli bo‘yicha sorbsion markazlar miqdoridan (taxminan 0,2 mol/mol Fe) 2–3 marta katta. Demak, kadmiy faqat tayyor gidroksid sirtiga adsorbsiyalanmaydi: u temir gidroksidi hosil bo‘layotgan paytda uning tarkibiga birgalikda cho‘kish yo‘li bilan kiradi va flokulalar bilan «supurilib» chiqariladi. Shu bilan birga, bu xulosa cho‘kma va kadmiyning kimyoviy shaklini bevosita tahlil qilish (masalan, XRD, XPS yoki ketma-ket ekstraksiya) bilan tasdiqlanishi lozim.

Ekologik baholash.

Eng yaxshi sharoitda ham (41,30 % li eritma, 100: 0,2, C_0 = 50,08 mg/l) qolgan kadmiy (0,56 mg/l) JSST ichimlik suvi yo‘l-yo‘riq qiymatidan (0,003 mg/l) [14] 187 marta, SanPiN № 0211-06 talabidan (0,001 mg/l) 560 marta, Yevropa Ittifoqi Direktivasi qiymatidan (0,005 mg/l) 112 marta, Vazirlar Mahkamasining 11-son qarori bo‘yicha kanalizatsiya tarmog‘iga qabul qilish chegarasidan (0,1 mg/l) [15] 5,6 marta yuqori. C_0 = 100,29 mg/l da qolgan kadmiy 1,38 mg/l (41,30 %, 100: 0,2) dan 4,34 mg/l (31,96 %, 100: 0,15) gacha bo‘lib, kanalizatsiyaga qabul qilish chegarasidan 13,8–43,4 marta yuqori. Demak, usul yuqori darajada ifloslangan oqova suvlarni dastlabki reagentli tozalash bosqichi sifatida qo‘llanilishi, me’yoriy talablarga erishish uchun esa pH ni tuzatish yoki sorbsion tozalash bilan to‘ldirilishi lozim. Reagent bilan suvga xlorid ham kiritiladi (muallif hisobi bo‘yicha 41,30 % li eritmaning 100: 0,2 nisbatida taxminan 0,54 g/l Cl^-), shuning uchun dozani ortiqcha oshirish maqsadga muvofiq emas.

Tavsiyalar quyidagicha: boshlang‘ich konsentratsiyasi 100 mg/l atrofida bo‘lgan suvlar uchun rudadan olinadigan 31,96–34,49 % li reagent va 100: 0,15 nisbat (95,67–96,44 %), 250 mg/l gacha bo‘lgan kadmiyli suvlar uchun 38,37–41,30 % li eritma va 100: 0,2 nisbat (95,30–96,11 %). Ishning cheklovlari: tajribalar faqat kadmiy nitratining distillangan suvdagi eritmalarida o‘tkazilgan; real oqova suvlarda raqobatlashuvchi ionlar, organik moddalar va bufer sig‘imi natijani o‘zgartirishi mumkin. Bu masalalar real oqova suvlar bilan o‘tkaziladigan keyingi tadqiqotlarda ko‘rib chiqiladi [16].

XULOSA

Konsentratsiyasi 27,04–41,30 % bo‘lgan $FeCl_3$ eritmalari bilan kadmiy(II) ionlarini zararsizlantirish 180 ta tajribada o‘rganildi. Zararsizlanish darajasi reagent nisbatiga kuchli bog‘liq: C_0 = 100,29 mg/l da 27,04 % li eritma bilan nisbatni 100: 0,05 dan 100: 0,1 ga oshirish darajani 61,22 dan 84,54 % gacha (23,32 foiz punkt), 100: 0,2 gacha esa 96,82 % gacha oshiradi.

Reagent konsentratsiyasining ta’siri kichik nisbatlarda katta (100: 0,05 da 61,22–76,25 %), 100: 0,2 da esa kichik (96,82–98,63 %). Boshlang‘ich konsentratsiya 50,08 dan 250,06 mg/l gacha oshganda daraja 41,30 % li eritma va 100: 0,2 nisbatda 98,88 dan 96,11 % gacha kamayadi; kichik konsentratsiyalarda qolgan kadmiy 0,56–0,72 mg/l dan pastga tushmaydi.

Ajratilgan kadmiyning temirga molyar nisbati (0,42–0,60) gidratlangan temir oksidining sorbsion markazlari miqdoridan oshadi, bu birgalikda cho‘kish va supuruvchi koagulyatsiya mexanizmlarini ko‘rsatadi. Mahalliy xomashyodan olinadigan 31,96–34,49 % li eritmalar 100: 0,15 nisbatda 100 mg/l atrofidagi kadmiyni 95,67–96,44 % ga zararsizlantiradi va kuchli ifloslangan oqova suvlarni dastlabki tozalash uchun tavsiya etiladi.

MUALLIFLAR HISSASI, MANFAATLAR TO‘QNASHUVI VA MOLIYALASHTIRISH

Oljayev D.: tajribalarni o‘tkazish, ma’lumotlarni qayta ishlash, qo‘lyozma loyihasini yozish. Temirov U.Sh.: tadqiqot konsepsiyasi va metodologiyasi, natijalarni tahlil qilish, qo‘lyozmani tahrirlash. Mualliflar manfaatlar to‘qnashuvi yo‘qligini bildiradi. Tadqiqot tashqi moliyalashtirishsiz bajarilgan. Qo‘lyozmani tayyorlashda matnni tuzish va tahrirlash uchun sun’iy intellekt vositasidan (Claude, Anthropic) foydalanilgan; barcha tajriba ma’lumotlari mualliflarning dissertatsiya materiallaridan olingan.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. World Health Organization. Cadmium in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality. – Geneva: WHO, 2011. – URL: https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cadmium-chemical-fact-sheet.pdf
2. СанПиН РУз № 0211-06. Гигиенические критерии и контроль качества воды централизованных систем хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Узбекистана. – Ташкент, 2006. – URL: https://lex.uz/docs/1934624
3. Duan J., Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts // Advances in Colloid and Interface Science. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 475–502. – DOI: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2

4. Stefánsson A. Iron(III) hydrolysis and solubility at 25 °C // Environmental Science & Technology. – 2007. – Vol. 41. – P. 6117–6123. – DOI: 10.1021/es070174h
5. Flynn C.M., Jr. Hydrolysis of inorganic iron(III) salts // Chemical Reviews. – 1984. – Vol. 84, № 1. – P. 31–41. – DOI: 10.1021/cr00059a003
6. Dzombak D.A., Morel F.M.M. Surface Complexation Modeling: Hydrous Ferric Oxide. – New York: John Wiley & Sons, 1990. – 393 p.
7. He B., Zhang W., Diao Y., Sun S., Zhang Y., Zhao W., Wen F., Yang G. Mechanistic study of the adsorption capabilities of heavy metals on the surface of ferrihydrite: batch sorption, modeling, and density functional theory // RSC Advances. – 2025. – Vol. 15. – DOI: 10.1039/d4ra07426b
8. Johnson P.D., Girinathannair P., Ohlinger K.N., Ritchie S., Teuber L., Kirby J. Enhanced removal of heavy metals in primary treatment using coagulation and flocculation // Water Environment Research. – 2008. – Vol. 80, № 5. – P. 472–479. – DOI: 10.2175/106143007X221490
9. Jiang J.-Q. The role of coagulation in water treatment // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 8. – P. 36–44. – DOI: 10.1016/j.coche.2015.01.008
10. Lee C.S., Robinson J., Chong M.F. A review on application of flocculants in wastewater treatment // Process Safety and Environmental Protection. – 2014. – Vol. 92, № 6. – P. 489–508. – DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.010
11. Almeida V.O., Schneider I.A.H. Production of a ferric chloride coagulant by leaching an iron ore tailing // Minerals Engineering. – 2020. – Vol. 156. – Art. 106511. – DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106511
12. Mahlohla M.B., Masindi V., Tekere M., Foteinis S. Treatment of wastewater using ferric chloride synthesized from Fe(III) recovered from acid mine drainage // Water Resources and Industry. – 2026. – Vol. 35. – Art. 100358. – DOI: 10.1016/j.wri.2026.100358
13. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). – URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng
14. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. – Geneva: WHO, 2022. – 614 p.
15. O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2010 yil 3 fevraldagi 11-son «Kommunal xo‘jaligi sohasida tabiatni muhofaza qilish faoliyatini takomillashtirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi qarori. – URL: https://faolex.fao.org/docs/pdf/uzb103024.pdf
16. Olzhaev D., Nurmurodov T., Khurramov N., Barakayev M., Mansurova Sh., Ganiev K. Modern methods of industrial wastewater treatment and softening // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – Art. 02003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202452502003

REFERENCES

1. World Health Organization. Cadmium in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva: WHO; 2011. Available from: https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cadmium-chemical-fact-sheet.pdf
2. SanPiN RUz No. 0211-06. Gigienicheskie kriterii i kontrol’ kachestva vody tsentralizovannykh sistem khozyaistvenno-pit’evogo vodosnabzheniya naseleniya Uzbekistana [Hygienic criteria and quality control of water of centralized drinking water supply systems of Uzbekistan]. Tashkent; 2006. (In Russ.). Available from: https://lex.uz/docs/1934624
3. Duan J, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts. Advances in Colloid and Interface Science. 2003;100–102:475–502. doi:10.1016/S0001-8686(02)00067-2
4. Stefánsson A. Iron(III) hydrolysis and solubility at 25 °C. Environmental Science & Technology. 2007;41:6117–6123. doi:10.1021/es070174h
5. Flynn CM Jr. Hydrolysis of inorganic iron(III) salts. Chemical Reviews. 1984;84(1):31–41. doi:10.1021/cr00059a003
6. Dzombak DA, Morel FMM. Surface Complexation Modeling: Hydrous Ferric Oxide. New York: John Wiley & Sons; 1990. 393 p.
7. He B, Zhang W, Diao Y, Sun S, Zhang Y, Zhao W, Wen F, Yang G. Mechanistic study of the adsorption capabilities of heavy metals on the surface of ferrihydrite: batch sorption, modeling, and density functional theory. RSC Advances. 2025;15. doi:10.1039/d4ra07426b
8. Johnson PD, Girinathannair P, Ohlinger KN, Ritchie S, Teuber L, Kirby J. Enhanced removal of heavy metals in primary treatment using coagulation and flocculation. Water Environment Research. 2008;80(5):472–479. doi:10.2175/106143007X221490
9. Jiang J-Q. The role of coagulation in water treatment. Current Opinion in Chemical Engineering. 2015;8:36–44. doi:10.1016/j.coche.2015.01.008

10. Lee CS, Robinson J, Chong MF. A review on application of flocculants in wastewater treatment. Process Safety and Environmental Protection. 2014;92(6):489–508. doi:10.1016/j.psep.2014.04.010
11. Almeida VO, Schneider IAH. Production of a ferric chloride coagulant by leaching an iron ore tailing. Minerals Engineering. 2020;156:106511. doi:10.1016/j.mineng.2020.106511
12. Mahlohla MB, Masindi V, Tekere M, Foteinis S. Treatment of wastewater using ferric chloride synthesized from Fe(III) recovered from acid mine drainage. Water Resources and Industry. 2026;35:100358. doi:10.1016/j.wri.2026.100358
13. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). Available from: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng
14. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO; 2022. 614 p.
15. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 11 of 03.02.2010 «On additional measures to improve environmental protection activities in the communal sector». (In Uzbek). Available from: https://faolex.fao.org/docs/pdf/uzb103024.pdf
16. Olzhaev D, Nurmurodov T, Khurramov N, Barakayev M, Mansurova Sh, Ganiev K. Modern methods of industrial wastewater treatment and softening. E3S Web of Conferences. 2024;525:02003. doi:10.1051/e3sconf/202452502003