

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅՈՒՆ

ԱԿԱԴԵՄԻԿՈՍ Ի. Վ. ԵՂԻԱԶԱՐՈՎԻ ԱՆՎԱՆ ԶՐԱՅԻՆ
ՀԻՄՆԱՀԱՐՑԵՐԻ ԵՎ ՀԻԴՐՈՏԵԽՆԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ ԱՍԱՏՈՒՐ ՍՈՒՐԻԿԻ

ՀԱՆՔԱՅԻՆ ԴՐԵՆԱԺԱՅԻՆ ԶՐԵՐԻ ՉԵՂՈՔԱՑՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅՈՒՆՈՒՄ

Ե23.05-« Զրատնտեսական համակարգեր և դրանց շահագործումը»
մասնագախտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ակադեմիկոս Ի. Վ. Եղիազարովի անվան
ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ քիմ. գիտությունների դոկտոր՝ **Ս.Ս. Հայրապետյան**

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր՝ **Պ. Հ. Բալջյան**
տեխ. գիտ. թեկնածու՝ **Է. Է. Միսակյան**

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Հիդրոէներգետիկա» ՍՊԸ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է փետրվարի 27-ին ժամը 13³⁰ –ին,
Ի.Վ. Եղիազարովի անվան ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտում
գործող «Ջրաբանություն» 055 մասնագիտական խորհուրդում:
Հասցե՝ 0011, ՀՀ, ք. Երևան, Արմենակյան փ. 125/3:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ի.Վ. Եղիազարովի անվան ջրային
հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ հունվարի 23-ին:

055 մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար,
տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր՝



Պ.Վ. Համբարձումյան

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Թեմայի արդիականությունը. Թթվային հանքային դրենաժը (ԹՀԴ, AMD, *Acid Mine Drainage*) կամ թթվային ապարային դրենաժը (ԹՀԴ, ARD, *Acid Rock Drainage*) համարվում է ջրի հիմնական աղտոտիչներից մեկը այն երկրներում, որտեղ իրականացվում է օգտակար հանածոների արդյունահանում: Դրա առաջացումը և շարժունակությունը ներառում է բարդ գործընթացներ, որոնք պայմանավորված են ֆիզիկական, քիմիական և կենսաբանական գործոնների համակցությամբ:

Ընդհանուր առմամբ, ԹՀԴ-ն առաջանում է սուլֆիդային հանքանյութերի օքսիդացմամբ և լուծմամբ: Թթվային դրենաժի վտանգը շրջակա միջավայրի համար չի կարող վերացվել կարճաժամկետ կամ միջնաժամկետ հեռանկարում և, ամենայն հավանականությամբ, կպահպանվի դեռևս երկար ժամանակ: Բացի այդ, այն չի կարող լուծվել մեկ միջամտությամբ. անհրաժեշտ է համալիր մոտեցում՝ տարբեր միջոցների և գործընթացների համակցված կիրառմամբ:

ԹՀԴ -ն լուրջ ազդեցություն է թողնում մարդու կյանքի, ջրային կենսատեսակների վրա, կարող է արգելակել ցամաքային բույսերի աճը, վնասել ճահճային էկոհամակարգերը, աղտոտել ստորերկրյա ջրերը, բարձրացնել ջրի մաքրման ծախսերը, ինչպես նաև վնասել բետոնե և մետաղական կառույցները:

Գոյություն ունի հրատապ և մեծ պահանջարկ՝ նոր հետազոտությունների ու նորարարական տեխնոլոգիաների մշակման ուղղությամբ՝ այդ ջրերի մաքրման արդյունավետ մեթոդների ստեղծման նպատակով: Օրինակ, ակնհայտ է, որ մինչ այժմ մշակված գործընթացների մեծ մասը հանգեցնում է նոր թափոնային հոսքերի առաջացմանը (օրինակ՝ աղաջրեր և գիպս), և, հետևաբար, անհրաժեշտ են շարունակական ջանքեր՝ մշակելու համար զրոյական թափոններով նոր տեխնոլոգիաներ:

Հանքարդյունաբերության հետևանքով առաջացող ԹՀԴ-ն հանգեցնում է էկոլոգիական և տնտեսական խնդիրների: ԹՀԴ-ն հիմնականում պարունակում է այնպիսի մետաղներ, ինչպիսիք են՝ երկաթը (Fe), ալյումինը (Al), պղինձը (Cu), կալցիումը (Ca), մագնեզիումը (Mg), մանգանը (Mn) և ջինկը (Zn):

Թթվային դրենաժի ձևավորումը կանխել հնարավոր չէ, այդ պատճառով վերջին տարիներին մշակվել են ռեկուլտիվացիոն մեթոդներ՝ մետաղների հեռացման և բարձրորակ ջուր ստանալու համար, որը կարելի է կրկին օգտագործել: Մշակման մի քանի տարբերակ գոյություն ունեն, ինչպիսիք են՝ մետաղների ընտրովի նստեցումը, աղսորբցիան, էլեկտրաքիմիական և մեմբրանային գործընթացները:

Աղսորբցիան ներկայումս ամենատարածված մեթոդն է արդյունաբերական կիրառության համար, քանի որ այն կարող է հեռացնել մինչև 99 % մետաղներ: Մեմբրանային գործընթացները համարվում են խոստումնալից՝ լաբորատոր հետազոտությունների արդյունքներով՝ մասնավորապես՝ ստացվող ջրի բարձր որակի շնորհիվ:

ԹՀԴ-ների մաքրումը և ռեկուլտիվացիան առաջիկա տարիներին հանդիսանում են հանքարդյունաբերության համար հիմնական էկոլոգիական և տնտեսական խնդիրներից մեկը:

Տնտեսական խնդիրները հաղթահարելու համար, որը ենթադրում է թթվային դրենաժների մաքրման տեխնոլոգիայի կիրառում, չափազանց կարևոր է կողմնակի արտադրանքների ստացումը, մասնավորապես՝ բարձրորակ ջրի և մետաղների ձևով:

Ամենից շատ ուսումնասիրված և կիրառվող չորս հիմնական տեխնոլոգիաներն են՝

- մետաղների ընտրովի նստեցումը,
- ադսորբցիան,
- էլեկտրաքիմիական գործընթացները,
- մեմբրանային մշակման գործընթացները:

Մետաղների ընտրովի նստեցումը ուսումնասիրվում է արդեն երկար տարիներ և դրսևորել է իրեն որպես ամենաարդյունավետ տարբերակ՝ նստվածքի (շլամի) քանակը նվազեցնելու և ստացվող մետաղի արժեքը բարձրացնելու տեսանկյունից:

Էլեկտրաքիմիական և մեմբրանային գործընթացները համարվում են խոստումնալից այլընտրանքային մեթոդներ: Սակայն մեմբրանային գործընթացները դեռևս պահանջում են լրացուցիչ հետազոտություն՝ այդ թվում նաև այլ տեխնոլոգիաների հետ համակցված կիրառության դեպքում:

Գիտական աղբյուրներում ԹՀ-ի չեզոքացման (թթվայնության չեզոքացման) գործընթացի ուսումնասիրության ժամանակ հիմնական ուշադրությունը դարձվում է երկարժեք երկաթի (Fe^{2+}) օքսիդացմանը եռարժեք երկաթի (Fe^{3+}) և նրա հեռացմանը: Մինչդեռ ալյումինի (Al) հեռացման վերաբերյալ տվյալները գրեթե բացակայում են:

Փորձը ցույց է տալիս, որ ալյումինով հարուստ ԹՀ-ի դեպքում պահանջվում է էականորեն ավելի մեծ քանակությամբ հիմք (ալկալի): Նման տեսակի ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ հիմնականում ալյումինի չեզոքացման վրա է ծախսվում ալկալիի հիմնական մասը:

ԹՀ-ի չեզոքացման սխեմայի ընտրության համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել յուրաքանչյուր ԹՀ-ի անհատական քիմիական կազմը: Դրա համար նախ պետք է որոշել տվյալ ԹՀ-ի քիմիական բաղադրությունը, ապա կառուցել նրա չեզոքացման կորը՝ հիմքի (օրինակ՝ NaOH-ի) օգնությամբ, և այնուհետև անցնել չեզոքացման հաշվարկներին՝ օգտագործելով կալցիումի հիդրօքսիդ և մետաղների ընտրովի նստեցում՝ սուլֆիդների միջոցով:

ԹՀ-ի չեզոքացման անհատական մոտեցումը կախված է ոչ միայն ալյումինի պարունակությունից, այլև այնպիսի տարրերից, ինչպիսիք են ցինկը (Zn), մանգանը (Mn) և մագնեզիումը (Mg):

Հատկապես կարևոր դեր ունեն Zn-ը և Mn-ը: Ինչ վերաբերում է Mg-ին, ապա դրա նստեցումը հաճախ նպատակահարմար չէ, քանի որ մագնեզիումի նստեցման համար անհրաժեշտ է բարձրացնել միջավայրի pH-ն մինչև 12 և բարձր, ինչը դառնում է տնտեսական առումով ոչ արդյունավետ:

Աշխատանքի նպատակը և խնդիրները. Հայաստանի Հանրապետության հանքային դրենաժային ջրերի չեզոքացման արդյունավետության գնահատում:

Աշխատանքի գիտական նորույթը. Առաջին անգամ ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ կիրառվել են բնական ծագման նյութեր (սերպենտիններ) և արդյունաբերական թափոններ՝ էլեկտրամետալուրգիական շլակի տեսքով: Ցույց է տրվել, որ նման նյութերի կիրառությունը կարող է բերել տնտեսական մեծ օգուտներ, բացի այդ՝ լուծելու է էկոլոգիական խնդիրներ:

Աշխատանքի գործնական նշանակությունը. Ուսումնասիրության արդյունքում ստացված արդյունքները կարելի կիրառել տվյալ ԹՀ-ի չեզոքացման անհատական մոտեցումների սխեմաների մշակմանը, նախօրոք կառուցելով դրա չեզոքացման կորերը տարբեր չեզոքացնող նյութերի կիրառմամբ:

Հաջորդ կարևոր խնդիրը դա մետաղներ կլանող մի շարք նյութերի կիրառման արդյունավետության գնահատումն է և այդ սորբցիոն նյութերի հնարավոր վերամշակման հարցը՝ կախված դրանցից մի շարք մետաղների կորզման համար:

Պաշտպանությանն ենթակա դրույթներ.

1. ՀՀ որոշ հանքային ջրահեռացման ջրերի համար չեզոքացման կորերի կառուցում՝ չեզոքացնող նյութի մեթոդների և տեսակի արդյունավետությունը գնահատելու համար:
2. Արդյունավետ կլանող նյութերի ընտրություն տվյալ ԹՀ-ից մի շարք արժեքավոր մետաղների կորզման համար:
3. ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ անհրաժեշտ ավելիակա նյութերի ծախսերի կրճատման համար կիրառվող առանձին սորբցիոն նյութերի արդյունավետության գնահատում:

Շեղինակի անձնական ներդրումը կայանում է նպատակի սահմանման և խնդիրների հետազոտման, մեթոդների ընտրության և դրանց փորձարարական իրականացման եղանակների մշակման, ստացված արդյունքների մեկնաբանման և համակարգման, պաշտպանությանը ներկայացված եզրակացությունների և հիմնական գիտական դրույթների ձևակերպման մեջ:

Ատենախոսության նյութերն զեկուցվել են.

- Ակադեմիկոս Ի.Վ.Եղիազարովի անվան ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտում.
- Հիդրավիկական հետազոտությունների հայկական ազգային ասոցիացիայ խորհրդում.
- «Գեոէկոլոգիա» Համառուսաստանյան ուսանողական գիտաժողովում՝ Մոսկվա 2023թ.:

Հրատարակված աշխատությունները. Ատենախոսության մեջ շարադրված հետազոտության արդյունքները հրապարակված են 3 գիտական հոդվածներում, որոնցից 1-ն առանց համահեղինակների և մեկը՝ SCOPUS համակարգում:

Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը. Ատենախոսական աշխատանքը շարադրված է 102 էջի վրա, բաղկացած է ներածությունից, չորս գլխից, եզրակացություններից և գրականության ցանկից, պարունակում է 26 նկար և 14 աղյուսակ:

Ատենախոսության համառոտ բնութագիրը

Առաջին գլուխը նվիրված է գրականության ուսումնասիրմանը: Այն ընդգրկում է է ԹՀ-ի չեզոքացման արդիական խնդիրները, դրանցից օգտակար նյութերի կորզմանը և դրանց տեխնիկա-տնտեսական հարցերը: ԹՀ-ի չեզոքացման տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկները պետք է ուղղված լինեն արդյունաբերական նշանակության նյութերի վերականգնմանը և հիմնված լինեն այն փաստի վրա, թե որքան պահանջված և մրցունակ են այդ նյութերը շուկայում:

Արդյունաբերական վերամշակման միջոցով թափոնային հոսքերից օգտակար արտադրանքի վերականգնումը կարող է ներառել հետևյալը.

- Մետաղների վերականգնում:
- Վաճառվող արտադրանքների վերականգնում, ինչպիսիք են ծծումբը, ծծմբական թթուն կամ սուլֆատները:
- Էլեկտրաէներգիայի արտադրություն:
- Ալկալիի վերականգնում, օրինակ՝ CaCO₃: Շինարարական և այլ հավելյալ նյութերի, ինչպիսիք են գիպսի և ցեմենտի ստացումը:
- Գյուղատնտեսական օգտագործում (օրինակ՝ որպես պարարտանյութ):

- Աղսորբենտներ, որոնք օգտագործվում են քաղաքային և արդյունաբերական կոյուղաջրերի մաքրման համար:
- Պիզմենտներ (օրինակ՝ երկաթի օքսիդների հիմքով):

Երկրորդ գլուխը նվիրված է ուսումնասիրության առարկաների և մեթոդների հիմնավորմանն ու նկարագրությանը:

Ներկայացված է մետաղների նստեցման համար օգտագործվող նյութերի նկարագրությունը, կիրառված սարք-սարքավորումների և չափման եղանակների նկարագրությունը:

Երրորդ գլխում քննարկվում են ԹՀԴ-ի չեզոքացման արդյունավետության համեմատական ուսումնասիրությունը՝ կաուստիկ և կալցինացված սոդաների կիրառմամբ:

ICP-MS, տուրբիդիմետրիայի և pH-մետրիայի մեթոդներով ուսումնասիրվել են ԹՀԴ-ում տեղի ունեցող գործընթացները՝ pH-ի բարձրացման ընթացքում՝ Na_2CO_3 -ի կիրառմամբ: pH-ի բարձրացումից հետո՝ մինչև pH 6.0, նկատվում է pH-ի հետագա նվազում: pH-ի նվազմանը զուգընթաց դիտվում է նաև ջրի պղտորության աճ:

pH-ի նվազումն ու պղտորության աճը կարելի է բացատրել այն փաստով, որ շվերտմանիտի (schwertmannite) նստեցումը՝ pH 4.5–5.0 միջակայքում, պայմանավորված է երկարժեք երկաթի (Fe^{2+}) անցումով եռարժեք վիճակի (Fe^{3+}), ինչը պահանջում է լրացուցիչ քանակի ալկալի, և այդ պատճառով էլ առաջանում է pH-ի նվազում:

ԹՀԴ -ից Na_2CO_3 -ի միջոցով մետաղների նստեցման դեպքում, ըստ երևույթին, գործում են երկու հիմնական մեխանիզմներ.

1. Առաջին մեխանիզմը հիմնված է առանձին մետաղների կարբոնատների առաջացման վրա:

2. Երկրորդ մեխանիզմը կապված է հիդրօքսիդների առաջացման հետ՝ pH-ի բարձրացման հաշվին:

Հավանաբար այս երկու մեխանիզմները մրցակցային են, և նման բարդ համակարգում դժվար է հստակ գնահատել, թե որ մեխանիզմն է գերակշռում:

NaOH -ի միջոցով pH-ի բարձրացման ժամանակ ԹՀԴ-ում տեղի ունեցող գործընթացների ուսումնասիրություն: ԹՀԴ-ի կայունացման համար ավելացվել է ծծմբական թթու: Այս դեպքում pH-ն նվազել է 3.40-ից մինչև 2.14: Երկու ամիս շարունակ նստեցման գործընթացներ չեն դիտվել, ջուրը մնացել է մաքուր: Այս ընթացակարգը նպատակ ուներ ստանդարտացնել սկզբնական ջուրը փորձերի համար: Երբ ԹՀԴ-ն թթվայնացվել է ծծմբական թթվով մինչև pH 2.14, շվերտմանիտի (schwertmannite) նստեցման գործընթացները չեն դիտվել, ջուրը մնում է մաքուր, այսինքն՝ երկաթ(II)-ից երկաթ(III)-ի փոխակերպման գործընթացները կանգ են առել:

Ջրի երկար պահման ժամանակ pH-ը նվազում է, պղտորությունն աճում է, և շվերտմանիտը նստում է: Պարզվել է, որ այս փոփոխությունները տեղի են ունենում երկաթ(II)-ից երկաթ(III)-ի օքսիդացման արդյունքում:

pH-ի նվազումը կանխում է այս գործընթացը, այսինքն՝ օքսիդացումը արգելափակվում է, և այդ երևույթի հետ կապված գործընթացները դադարում են: Հաջորդ քայլում ջրի pH-ն բարձրացվել է նատրիումի հիդրօքսիդի միջոցով մինչև 3.52 և թողնվել է նստելու 30 օր: Այս դեպքում միջավայրի pH-ն իջնում է գծային կերպով մինչև 2.54, իսկ պղտորությունն աճում է գծային կերպով մինչև 440 FTU :

Երբ սկզբնական pH-ը բարձրացվել է մինչև 3.92, ԹՀ-ի ստատիկ վիճակում pH-ի դիտարկված նվազումը տեղի է ունենում գծային ձևով՝ 3.92-ից 2.54: pH-ի նվազման տարբերությունը կազմել է 0.98:

pH 5.98–3.92 միջակայքում դիտվում է առավելագույն պղտորություն՝ 755 FTU, և այս միջակայքում նկատվում է pH-ի ամենամեծ տարբերությունը՝ ΔpH2.08: Դա, հավանաբար, վկայում է երկաթ(II)-ի ներկայության մասին, այսինքն՝ պղտորության աճը մեծամասամբ կապված է երկաթ(II)-ի երկաթ(III)-ի փոխակերպման հետ: Միևնույն ժամանակ, pH-ի նվազումը առաջին 4 օրերի համար եղել է ոչ գծային:

Եթե ամբողջ էքսպոզիցիայի ժամանակահատվածում (25 օր) pH-ի ընդհանուր նվազումը կազմել է 5.98–3.92 = 2.06, ապա առաջին 4 օրերի ընթացքում տարբերությունը եղել է 5.98–2.54 = 1.54, իսկ հաջորդ 21 օրերի ընթացքում՝ միայն 2.06–1.54=0.52: 4-ից 21 օրերի ընթացքում pH-ի նվազումը եղել է գծային: Առաջին 4 օրերի ընթացքում պղտորությունը նույնպես աճել է գծային: Հետագա ժամանակահատվածում pH-ի նվազման արագությունը դանդաղել է, և պղտորության աճը նույնպես մի փոքր դանդաղել է, սակայն այն համեմատական չէ pH-ի նվազման տեմպերի հետ:

Ենթադրվում է, որ պղտորության աճի մեջ ներգրավված է նաև մեկ այլ մեխանիզմ, որը սկսվում է pH-ի նվազմամբ, սակայն չի դադարում: Այս pH միջակայքը կազմում է 3.92–4.5, ինչը համընկնում է շվերտմանիտի (schwertmannite) և բազալյումինիտի (basaluminite) նստեցման սկզբի հետ: Այսինքն՝ ստեղծվում են նպաստավոր պայմաններ այս միացությունների ձևավորման համար, և pH-ի նվազումը այդքան պարզ չէ: Այս pH-ին հասնելուց հետո շվերտմանիտի և բազալյումինիտի ձևավորումն է պատասխանատու պղտորության աճի համար:

Չորրորդ գլխում քննարկվում են ՌՖ Ստարիյ Օսկոլ քաղաքի էլեկտրամետալուրգիական գործարանի թափոնների և ՀՀ գեղարքունիքի մարզի Շորժայի հանքավայրի սերպենտինիտի կիրառմամբ ԹՀ-ից որոշ մետաղների կորզումը, որի արդյունքում զգալիորեն կրճատվում են չեզոքացնող հիմքերի քանակությունները: Բացի այդ իրականացվել են տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկներ հաշվարկելու նման նյութերի կիրառման արդյունավետությունը գնահատելու համար:

ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ կիրառվող կլանիչները. Ռ-ի Ստարիյ Օսկոլ քաղաքի էլեկտրամետալուրգիական գործարանի շլակների կիրառմամբ իրականացվել է ԹՀ-ի չեզոքացման (ադսորբցիայի եղանակով) փորձարկումներ:

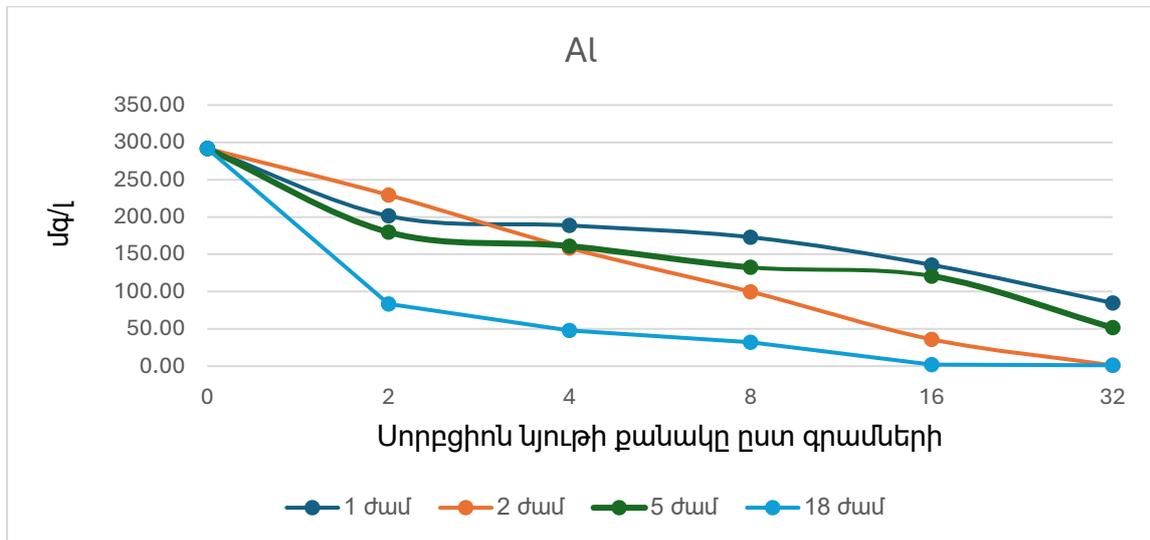
Աղյուսակում 1-ում բերված տվյալներից հետևում է, որ հնարավոր է զգալիորեն կրճատել ԹՀ-ում այնպիսի մետաղների քանակությունը, ինչպիսիք են Al, Ca, Cu, Mn, Fe, Na, W, Zn: Տնտեսական հաշվարկները կհիմնվեն հենց այս մետաղների վերաբերյալ:

Աղյուսակ 1

Մետաղների նստեցումը ըստ տոկոսների 8 և 32 գ սորբցիոն նյութի կիրառման դեպքում

| Մետաղների նստեցումը ըստ տոկոսների 2 ժամ ազդեցության դեպքում | | |
|---|--------------------|---------------------|
| | 8 գ սորբցիոն նյութ | 32 գ սորբցիոն նյութ |
| Al մգ/լ | 65.78 | 99.64 |
| Cu մգ/լ | 52.45 | 95.05 |
| Fe մգ/լ | 99.85 | 100:00 |
| Mn մգ/լ | 33.38 | 43.78 |
| Na մգ/լ | 35.25 | 17.13 |
| W մգ/լ | 39.44 | 65.14 |
| Zn մգ/լ | 34.35 | 64.99 |

Նկ.1-ից հետևում է, որ հնարավոր է կլանել Al ամբողջությամբ՝ կախված սորբալ նյութի քանակությունից և սորբցիայի տևողությունից: Եթե նույնիսկ վերցնենք (4 գրամ և 5 ժամ) պարամետրերով Al-ի հեռացման մակարդակը կազմում է մոտավորապես 200մգ/լ, որը կազմում է Al-ի ԹՀԴ-ում պարունակության $\approx 60\%$ -ը: Ելնելով այս տվյալներից կարող են իրականացվել հաշվարկ, թե ինչպիսի տնտեսական օգուտներ կարող է բերել նման նյութի կիրառումը միայն Al-ի դեպքում:



Նկ. 1 Ալյումինի կորզումը կախված կիրառվող շլամի քանակությունից. 1, 2, 5 և 18 ժամ ազդեցության դեպքում

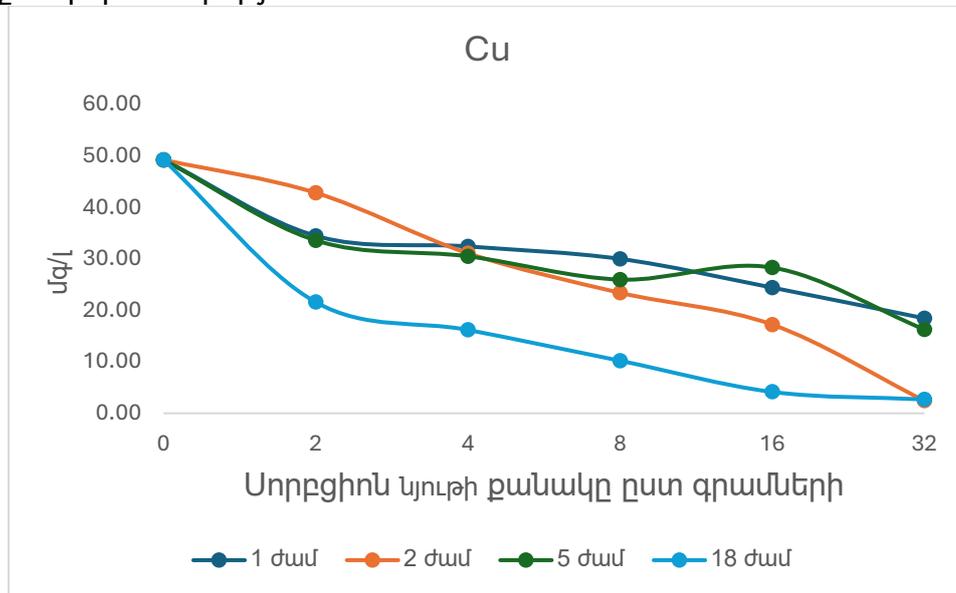
Հարկ է նշել, որ 2-ժամյա էքսպոզիցիայի ժամանակ Al-ի կլանումը գծային կախվածություն ունի կլանող նյութի քանակությունից, այսինքն երբ մեծացվում է կլանող նյութի քանակությունը մինչև 16գ, 300մգ/լ պարունակությամբ ԹՀԴ-ի մեջ Al-ի մնացորդային քանակությունը կազմում է ընդամենը 30մգ/լ, այսինքն գծայնորեն դրա քանակությունը նվազում է մոտ 10 անգամ:

18-ժամյա էքսպոզիցիայի ժամանակ ԹՀԴ-ում Al-ի պարունակության նվազումն արդեն էքսպոնենցիալ է և արդեն 2գրամ սորբցիոն նյութի դեպքում Al-ի մնացորդային պարունակությունը կազմում է մոտ 75մգ/լ, այսինքն՝ Al պարունակությունն արդեն նվազել է 4 անգամ: Կլանող նյութի հետագա ավելացումն էական ազդեցություն չի ունենում Al-ի մնացորդային պարունակության վրա: 8գ-ի դեպքում այն կազմում է 50մգ/լ, 16գ-ի դեպքում՝ 40մգ/լ և 32գ-ի դեպքում այն ունի զրոյական արժեք:

Տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկները նպատակահարմար է իրականացնել 2գ 18 ժամյա և 4գ 2 ժամյա ԹՀԴ-ի էքսպոզիցիայի հաշվարկով: Քանի որ 18 ժամյա էքսպոզիցիան տնտեսապես և գործնականում քիչ կիրառելի է, ավելի նպատակահարմար է դիտարկել 4գ սորբալ նյութի ազդեցությունը 2 ժամում, այդ դեպքում Al կորզումը հասնում է 150մգ/լ, այսինքն մետաղների կորզումը կազմում է մոտ 50%:

Հաջորդ մետաղը, որը էականորեն սորբվում է էլեկտրամետալուրգիական գործարանի շլակների մրջոցով, համարվում է պղինձը: Երկժամյա էքսպոզիցիան 2գ 18 ժամում բերում է մոտ 50% կորզման: Դիտարկելով փորձի արդյունքները միայն 1 և 18ժ էքսպոզիցիայի դեպքում է պղինձի պարունակությունը նվազում հասնելով գրեթե զրոյի: Պղնձի դեպքում ամենաարդյունավետ էքսպոզիցիա/սորբենտ համադրությունը 32 գրամ սորբալ նյութի և 1 ժամ էքսպոզիցիոն է (նկ. 2):

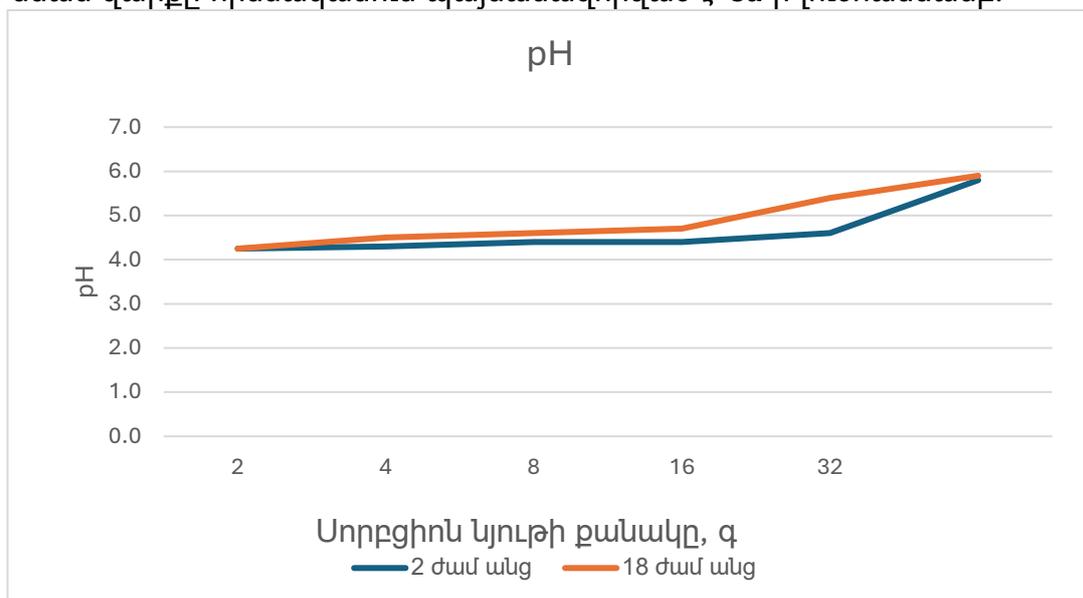
Պղնձի կորզման տեխնիկա-տնտեսական արդյունավետությունից ելնելով կարելի է էքսպոզիցիայի տևողությունը հասցնել 1 ժամ, քանի որ Cu-ն ավելի արժեքավոր մետաղ է: Եթե Al-ի դեպքում հարցը ավելի էկոլոգիական ասպեկտով էր դիտարկվում, ապա Cu-ի դեպքում հնարավոր է որոշ տնտեսական օգուտներ ունենալ: Cu-ի դեպքում պետք է հարցը պետք է քննարկել սորբենտներից դրանց կորզելու տեսանկյունից, այսինքն սորբցիոն նյութի վրա Cu-ի խտացումը և դրա պարունակությունը հանքանյութի մակարդակին հասցնելու և էքսպոզիցիայի տևողությունը պետք է դիտարկել հենց այս տեսանկյունից, այսինքն միավոր քանակի սորբցիոն նյութի վրա Cu-ի քանակությունը հասցնել նվազագույն անհրաժեշտ պարունակության:



Նկ. 2 Պղնձի կորզումը կախված կիրառվող շլամի քանակությունից. 1, 2, 5 և 18 ժամ ազդեցության դեպքում

Որքան էքսպոզիցիան երկար է տևում, այնքան Ca-ի լուծահանման մակարդակն ավելանում է, ինչը ազդում է ԹՀ-ի pH-ի վրա: pH-ը 2գ-ից մինչև 32գ շլամի կիրառման դեպքում աճում է 4.25-ից մինչև 5.8, իսկ 18 ժամյա էքսպոզիցիայի դեպքում նույն քանակությամբ նյութ կիրառելիս 4.25 -ից բարձրանում է 5.9 է (տես նկ. 3):

pH-ի նման վարքը հիմնականում պայմանավորված է Ca-ի լուծահանմամբ:



Նկ. 3 pH-ի կախումը սորբցիոն նյութի քանակությունից

Նմանատիպ փորձեր իրականացվել են նաև սերպենտինիտի հիման վրա՝ որպես կլանիչ նյութ (աղյուսակ 2) : Պետք է նշել, որ սերպենտինիտն ավելի արդյունավետ կլանիչ է, քան վերոհիշյալ շլաքները, օրինակ ալյումինի կլանման ժամանակ: ԹՀ-ի չեզոքացման համար որպես սորբցիոն նյութ օգտագործվել է սերպենտինիտը:

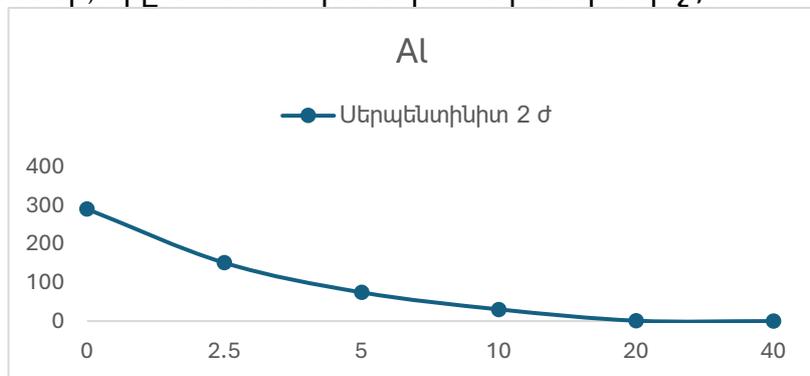
Աղյուսակ 2

40 գ/լ սերպենտինիտի օգտագործման դեպքում մետաղների կորզումը միլիգրամներով և տոկոսներով

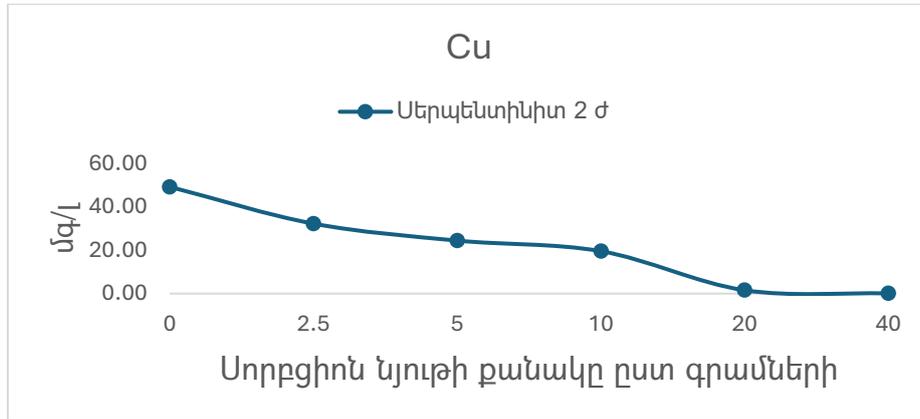
| Սերպենտինիտի օգտագործման դեպքում մետաղների կորզումը միլիգրամներով և տոկոսներով: | | |
|---|--------|--------|
| | մգ | % |
| Al մգ/լ | 295.93 | 100 |
| Cu մգ/լ | 51.15 | 99.82 |
| Fe մգ/լ | 0.52 | 100 |
| K մգ/լ | 0.43 | 32.80 |
| Mn մգ/լ | 24.16 | 45.60 |
| Na մգ/լ | 6.17 | 15.12 |
| Sr մգ/լ | 1.11 | 33.878 |
| W մգ/լ | 1.64 | 90.18 |
| Zn մգ/լ | 95.90 | 88.69 |

2-ժամյա էքսպոզիցիայի ժամանակ 2.5 գ կլանիչի դեպքում արդեն նկատվում է ալյումինի ընդհանուր քանակության 50%-ի կլանում, 5 գրամի դեպքում կլանման աստիճանը հասնում է մինչև $225/300=75\%$ և 10 գ-ի դեպքում 80%, վերջապես 20գ-ի դեպքում ԹՀ-ում ալյումինը ընդհանրապես բացակայում է, տես նկ. 4:

Ալյումինի կլանումը առաջին հերթին կարևորվում է ԹՀ-ի չեզոքացման տեսանկյունից, քանի որ ալկալիների օգտագործման տեսանկյունից Al-ի չեզոքացման համար դրանց կիրառությունն ամենալայնն է: ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ դրա տեխնիկա-տնտեսական հիմնավորումը պետք է հիմնավորել Al-ի հեռացման օպտիմալ քանակությունը, համապատասխան կլանող նյութի մինիմալ քանակը և մինիմալ էքսպոզիցիայի ժամանակի ընտրությունն է: Իհարկե կարելի է այդ երկու պարամետրերի մեծացման հաշվին ապահովել Al-ի լրիվ հեռացում, սակայն այդ դեպքում անհրաժեշտ կլինի ջրի հսկայական ծավալների կուտակման և կլանիչ նյութերի երկար ժամանակ էքսպոզիցիոնի համար, որը տնտեսապես նպատակահարմար չէ :



Նկ. 4 Ալյումինի կորզման կախվածությունը կիրառվող սերպենտինիտի քանակությունից 5 ժամվա ընթացքում:



Նկ. 5 Պղնձի կորզումը կախված կիրառվող սերպենտինիտի քանակությունից 5 ժամվա ընթացքում:

Սերպենտինիտային կլանիչը պղնձի առումով 20գ 2 ժամվա ընթացքում սկզբնական կոնցենտրացիան (51մգ/լ) իջեցնում է համարյա զրոյական մակարդակի (նկ. 5): 10 գ սերպենտինիտի դեպքում 2-ժամյա էքսպոզիցիան Cu-ի կլանումը կազմում է 80% և 50%-անոց կլանում է 2.5գ սերպենտինիտ կիրառելու դեպքում:

Պղնձի կորզումը դիտարկվում է 2 տեսանկյունից: Առաջինը որպես ծանր մետաղի հեռացում, ինչը ենթադրում է, որ դրանից պղնձի առավելագույն չափով մաքրել ԹՀԴ-ն և երկրորդ կարևոր հանգամանքը դա պղնձի կորզումն է, որպես արժեքավոր մետաղ: Այս դեպքում կարևորվում է կլանիչ նյութի վրա պղնձի այնպիսի քանակություն նստեցնել, որպեսզի կլանիչը Cu-ի հետ հանդես գա որպես Cu-ի հանքաքար: Այս դեպքում մշակված կլանիչ նյութը կդիտարկվի որպես Cu-ի հումք և այն կտարամադրվի Cu արդյունահանող գործարանին մետաղական Cu ստանալու համար:

Նկ. 5-ից երևում է, որ Cu-ի կորզման օպտիմալ պարամետրերն են $t=2$ ժամ, $a=5$ գր. Այդ դեպքում Cu-ի կորզումը կազմում է 50%:

ԹՀԴ-ի չեզոքացման տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկներ.

ԹՀԴ -ի նեյտրալիզացման տեխնիկա-տնտեսական հաշվարկները պետք է կենտրոնանան արդյունաբերական նշանակություն ունեցող նյութերի վերականգնման վրա և հիմնված լինեն այն բանի վրա, թե որքան են այդ նյութերը պահանջված և մրցունակ շուկայում:

Ուստի, թափոնային հոսքերից օգտակար արտադրանքների վերականգնման գործընթացը կարող է ներառել հետևյալը՝

- Մետաղների վերականգնում:
- Տեխնիկական արտադրանքների, օրինակ՝ ծծմբի, ծծմբական թթվի կամ սուլֆատի վերականգնում:
- Էլեկտրաէներգիայի արտադրություն:
- Ալկալիայի վերականգնում, օրինակ՝ CaCO_3 :
- Շինարարական և հարակից նյութեր, ինչպես՝ գիպս և ցեմենտ:
- Բնական օգտագործում (օրինակ՝ պարարտանյութ):
- Աղսորբենտներ, որոնք օգտագործվում են քաղաքային և արդյունաբերական կեղտաջրերի մաքրման համար:
- Պիգմենտներ (օրինակ՝ ֆերիհիդրիտ):

Գրական աղբյուրներում հիմնականում, երբ խոսքը գնում է ԹՀ-ի չեզոքացման մասին, առանձնահատուկ ուշադրություն է դարձվում երկարժույթ երկաթի (Fe^{2+}) երեքարժույթ երկաթի (Fe^{3+}) օքսիդացման գործընթացին և դրա հեռացման մեթոդներին: Գրականության տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ գրեթե բացակայում են տվյալներ այլումինի հեռացման վերաբերյալ:

Մեր փորձը ցույց է տալիս, որ այլումինով հարուստ ԹՀ-ն պահանջում է շատ ավելի մեծ քանակությամբ ալկալիներ: Նման ԹՀ-ի չեզոքացման ժամանակ ալկալիների մեծ մասը օգտագործվում է հենց այլումինի չեզոքացման համար:

ԹՀ-ի չեզոքացման սխեմա ընտրելիս անհրաժեշտ է հաշվի առնել ամեն տեսակի ԹՀ-ի առանձնահատկությունները: Դա պահանջում է՝

1. Ունենալ տվյալ ԹՀ-ի քիմիական կազմը,
2. Սկզբից կառուցել դրա ԹՀ-ի չեզոքացման կորը՝ օգտագործելով ալկալի (օրինակ՝ NaOH),
3. Հաջորդը սուլֆիդների օգնությամբ ընտրողական նստեցում:

Կոնկրետ ԹՀ-ի չեզոքացման նկատմամբ մեթոդի ընտրությունը մեծապես կախված է ոչ միայն այլումինի պարունակությունից, այլև այնպիսի տարրերից, ինչպիսիք են Zn, Mn և Mg:

Դա հատկապես վերաբերում է Zn-ին և Mn-ին: Mg-ի նստեցումն չենք դիտարկում, քանի որ դրա նստեցումը պահանջում է pH-ի բարձրացում մինչև 12 և ավելի, ինչը տնտեսական առումով անհետաքրքիր է:

Իսկ նույն արդյունքը ստանալու համար նատրումի հիդրօքսիդի ծախսը կազմում է 0.405տ, որի արժեքը կազմում է 324.3 ԱՄՆ դոլար: Նատրիումի կարբոնատի դեպքում ծախսը կազմում է 0.57տ, որի արժեքը կազմում է 286.39 ԱՄՆ դոլար: Կալցիումի հիդրօքսիդի դեպքում ծախսը կազմում է 0.379տ, որի արժեքը կազմում է 49.3 ԱՄՆ դոլար: Համադրելով վերոնշյալ արդյունքները ստացվում է, որ շլամների կիրառությունը տնտեսապես շատ ավելի արդյունավետ է, քան մնացած դիտարկվող նյութերի կիրառությունը:

Հիմնականում դիտարկվել են հետևյալ մետաղները՝ այլումին, պղինձ, մագնեզիում, երկաթ և ցինկը: Աղյուսակ 3-ում ներկայացված են կորզված մետաղները միլիգրամներով և տոկոսներով: Հիմնականում դիտարկվող բոլոր մետաղների համար նստեցումը սկզբնական պարունակության նկատմամբ կազմում է 50% և ավելի, իսկ որոշ դեպքերում 90 և ավելի %:

Աղյուսակ 3

Էլեկտրամեթալուրգիական կոմբինատի շլամով մեթաղների կորզման դինամիկան

| | 8 գ սորբցիոն նյութ | | 32 գ սորբցիոն նյութ | |
|---------|--------------------|-------|---------------------|-------|
| | Միլիգրամ | Տոկոս | Միլիգրամ | Տոկոս |
| Al մգ/լ | 191.92 | 65.78 | 290.69 | 99.64 |
| Cu մգ/լ | 25.82 | 52.45 | 46.78 | 95.05 |
| Fe մգ/լ | 10.29 | 99.85 | 10.31 | 100 |
| Mn մգ/լ | 16.75 | 33.38 | 21.974 | 43.78 |
| Zn մգ/լ | 32.58 | 34.35 | 61.64 | 64.99 |

Աղ. 4-ում ներկայացված է նատրիումի կարբոնատի, նատրումի հիդրօքսիդի, կալցիումի հիդրօքսիդի և շլամի միջոցով նստեցման համար ծախսվող նյութերի քանակները և արժեքները՝ հաշվարկված շուկայական արժեքներով: Վերոնշյալ նյութերի

քանակները հաշվարկվել է այնպես, որ դրանց տեսականորեն կիրառման ժամանակ կունենանք այն արդյունքը, ինչը ստացել են շլամների կիրառման ժամանակ: Հաշվարկները իրականացվել են 20լ/լ ջրի ծախսի և 2 ժամ ժամանակահատվածի համար:

Ինչպես երևում է աղյուսակ 4-ից շլամի ծախսը կազմում է 8 գ/լ կիրառման դեպքում կազմում է 0.0011տ իսկ 32գ/լ-ի դեպքում 0.0046տ: Ընդհանուր առմամբ այս քանակությամբ շլամի շուկայական արժեքը չի գերազանցում 2 ԱՄՆ դոլարը:

Իսկ նույն արդյունքը ստանալու համար նատրումի հիդրօքսիդի ծախսը կազմում է 0.405տ, որի արժեքը կազմում է 324.3 ԱՄՆ դոլար:

Նատրիումի կարբոնատի դեպքում ծախսը կազմում է 0.57 տ, որի արժեքը կազմում է 286.39 ԱՄՆ դոլար:

Կալցիումի հիդրօքսիդի դեպքում ծախսը կազմում է 0.379 տ, որի արժեքը կազմում է 49.3 ԱՄՆ դոլար:

Աղյուսակ 4

Ծախսված նյութերի քանակները և արժեքները

| - | - | Շուկա - յակա ն Արժեք | Տոննա (8գ սորբցիոն նյութի դեպքում) | Ծախս- ված նյութի արժեքը ԱՄՆ դոլարով | Տոննա (32 գ դեպքու մ) | Ծախսվ ծ նյութի արժեքը ԱՄՆ դոլարով | Տեստեվ ած գումար |
|---|-------------------|-------------------------------|--|--|--------------------------------|---|------------------------|
| - | Na2CO3 | 500 | 0.38 | \$187.66 | 0.57 | \$286.40 | \$285.48 |
| - | NaOH | 800 | 0.27 | \$214.12 | 0.41 | \$324.31 | \$323.39 |
| - | Ca(OH)2 | 130 | 0.25 | \$32.61 | 0.38 | \$49.30 | \$48.38 |
| - | Սորբցիոն նյութ | 200 | 0.0011 | \$0.23 | 0.0046 | \$0.92 | |

Աղյուսակ 5

Նստեցված մետաղների քանակը /տոննաներով / 2 ժամվա ընթացքում

| - | Շուկայական արժեք տ/ԱՄՆ դոլար | Կլանված մետաղի քանակը /տ/ (4գ սորբցիոն նյութ) | Կլանված մետաղի արժեքը ԱՄՆ դոլար | Կլանված մետաղի քանակը /տ/ (16գ սորբցիոն նյութ) | Կլանված մետաղի արժեքը ԱՄՆ դոլար |
|------------|------------------------------------|--|---|---|---|
| Al մգ/լ | 2894 | 0.03 | \$79.98 | 0.04 | \$121.14 |
| Cu մգ/լ | 10944 | 0.00 | \$40.69 | 0.01 | \$73.73 |
| Fe մգ/լ | 103 | 0.00 | \$0.15 | 0.00 | \$0.15 |
| Mn մգ/լ | 1740 | 0.00 | \$4.20 | 0.00 | \$5.51 |
| Zn մգ/լ | 3075 | 0.00 | \$14.43 | 0.01 | \$27.29 |
| Ընդ | | | | | \$227.82 |

Աղյուսակ 5-ում բերված է 2 ժամվա ընթացքում շլամի կիրառությամբ նստեցվող մետաղների քանակները, ըստ տոննաների և դրանց արժեքները հաշվարկված բորսայի գներով: Ստացվում է 2 ժամվա ընթացքում նստեցվող հինգ մետաղների ընդհանուր արժեքը կազմում է 277.82 ԱՄՆ դոլար:

Ինչպես երևում է աղյուսակ 5-ից շլամի ծախսը կազմում է 8 գ/լ կիրառման դեպքում կազմում է 0.0011տ իսկ 32գ/լ-ի դեպքում 0.0046տ: Ընդհանուր առմամբ այս քանակությամբ շլամի շուկայական արժեքը չի գերազանցում 2 ԱՄՆ դոլարը:

Աղյուսակ 6-ում ներկայացված է նատրիումի կարբոնատի, նատրումի հիդրօքսիդի, կալցիումի հիդրօքսիդի և սերպենտինիտի միջոցով նստեցման համար ծախսվող նյութերի քանակները և արժեքները՝ հաշվարկված շուկայական արժեքներով: Վերոնշյալ նյութերի քանակները հաշվարկվել է այնպես, որ դրանց տեսականորեն կիրառման ժամանակ կունենանք այն արդյունքը, ինչը ստացել ենք սերպենտինիտի կիրառման ժամանակ: Հաշվարկները իրականացվել են 20լ/վ ջրի ծախսի և 5 ժամ ժամանակահատվածի համար:

Աղյուսակ 6

Ծախսված նյութերի քանակները և արժեքները

| - | Շուկայական Արժեք | Տոննա (40գ/լ սերպենտինիտի դեպքում) | Ծախսված նյութի թժեքը ԱՄՆ դոլարով | Տնտեսված գումար |
|-------------|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Na2CO3 | 500 | 0.59 | \$354.44 | \$353.29 |
| NaOH | 800 | 0.27 | \$164.93 | \$163.77 |
| Ca(OH)2 | 130 | 0.25 | \$50.19 | \$49.04 |
| Սերպենտինիտ | 200 | 0.012 | \$1.15 | |

Սերպենտինիտի ծախսը 40 գ/լ կիրառման դեպքում կազմում է 0.0011տ, իսկ ընդհանուր առմամբ այս քանակությամբ սերպտոնիտի շուկայական արժեքը չի գերազանցում 1.5 ԱՄՆ դոլարը:

Աղյուսակ 7

Նստեցված մետաղների քանակը 5 ժամվա ընթացքում (տոննա)

| - | Շուկայական արժեք Տոննա/ԱՄՆ դոլար | Նստեցված մետաղի քանակը /տոննա/ (40 գ/լ սերպենտինիտի դեպքում) | Նստեցված մետաղի արժեքը ԱՄՆ դոլար |
|---------|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Al մգ/լ | 2894 | 0.11 | \$308.31 |
| Cu մգ/լ | 10944 | 0.02 | \$40.69 |
| Mn մգ/լ | 1740 | 0.01 | \$4.20 |
| Zn մգ/լ | 3075 | 0.05 | \$14.43 |
| Ընդ. | | | \$367.63 |

Նույն արդյունքը ստանալու համար

- Նատրումի հիդրօքսիդի ծախսը կազմում է 0.59տ, որի արժեքը կազմում է 354.44 ԱՄՆ դոլար:
- Նատրիումի կարբոնատի դեպքում ծախսը կազմում է 0.27տ, որի արժեքը կազմում է 163.93 ԱՄՆ դոլար:
- Կալցիումի հիդրօքսիդի դեպքում ծախսը կազմում է 0.25տ, որի արժեքը կազմում է 50.19 ԱՄՆ դոլար:

Աղյուսակ 7-ում բերված է 2 ժամվա ընթացքում սերպենտինիտի կիրառությամբ նստեցվող մետաղների քանակները, ըստ տոննաների և դրանց արժեքները հաշվարկված բորսայի գներով: Ստացվում է 2 ժամվա ընթացքում նստեցվող չորս մետաղների ընդհանուր արժեքը կազմում է 367.63 ԱՄՆ դոլար:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. ԹՀԴ-ի նատրիումի կարբոնատի միջոցով չեզոքացման ժամանակ ներգրավված են երկու մեխանիզմ. ա- մետաղների նստվածք՝ հիդրօքսիդների տեսքով; բ- մետաղների նստվածք՝ կարբոնատների տեսքով: Սկզբնական pH-ի արժեքի դեպքում՝ pH 3.9–4.5 միջակայքում դիտվում է փոքր pH-ի աճ, որից հետո սկսվում է pH-ի գծային նվազում: Որքան ավելի բարձր է սկզբնական pH-ը, այնքան փոքր է pH-ի տարբերությունը, սակայն պղտորության աճն այդ դեպքում ավելի արագ է տեղի ունենում, այսինքն՝ պղտորության աստիճանի բարձրացումն ուղիղ համեմատական է pH-ի նվազման հետ: Համեմատաբար բարձր pH-ի դեպքում նստվածքի կարբոնատային բնույթը, ամենայն հավանականությամբ, գերակշռում է հիդրօքսիդայինին:
2. Երկարժեք երկաթի կարբոնացման գործընթացները բարձր pH-ների դեպքում ընթանում են ավելի ինտենսիվ, և նստվածքում երկաթը մեծ մասամբ հանդես է գալիս սիդերիտի տեսքով: Սա նշանակում է, որ երկարժեք երկաթի հիդրօքսիդի օքսիդացումը եռարժեքի՝ H^+ իոնների ձևավորմամբ, աստիճանաբար նվազում է, ուստի բարձր pH-ների դեպքում pH-ի անկումը նվազագույն է: Ավելի բարձր pH-ի դեպքում կարբոնատները դառնում են ավելի կայուն, ու լուծույթում երկարժեք երկաթի քանակը նվազում է, քանի որ pH-ի նվազումը պայմանավորված է երկարժեք երկաթի օքսիդացմամբ եռարժեքի, իսկ երկաթի կարբոնատը (սիդերիտը) չի հիդրոլիզվում երկարժեք հիդրօքսիդի և այն հետագայում օքսիդացվում է եռարժեքի, հետևաբար pH-ի նվազումը դառնում է ավելի ու ավելի ցածր:
3. ԹՀԴ-ում նատրիումի հիդրօքսիդի (NaOH) ավելացման պարագայում pH-ն աճում է անհամաչափ՝ համեմատ դրա ավելացված քանակի հետ: Այս փոփոխությունների մեխանիզմները տարբեր են: Մասնավորապես, pH-ի 3.52–2.64 միջակայքում pH-ի նվազումը, հավանաբար, տեղի է ունենում երկաթ(II)-ի երկաթ(III)-ի օքսիդացման արդյունքում: pH-ի 6.2–6.41 միջակայքում, երբ ջրում երկաթ(II)-ի պարունակությունը զգալիորեն ցածր էր, պղտորության ավելացումը չի կարող բացատրվել երկաթ(II)-ի օքսիդացման միջոցով:

4. ԹՀԴ-ն կարող է կայունացվել՝ թթվայնացնելով այն հանքային թթվով (հատկապես ծծմբական թթվով): Կայունացում ասելով նկատի ունենք, որ ծծմբական թթվի ավելացումից հետո ջրում երկար ժամանակ (2 ամիս) գրեթե որևէ տեսանելի գործընթաց (рН-ի նվազում, պղտորության աճ) չի տեղի ունենում: ԹՀԴ-ում նատրիումի հիդրօքսիդի տարբեր քանակների ավելացման ժամանակ դիտվում են տարբեր մեխանիզմներ: рН 6.0–ի դեպքում պղտորության աճի մեխանիզմը պայմանավորված է երկաթ(II)-ի օքսիդացմամբ երկաթ(III)-ի: Բարձր рН արժեքներում (рН 6.0–6.5), երբ ջրում երկաթ(II)-ի պարունակությունը ցածր է, պղտորության աճը պայմանավորված է այլ մետաղների համանստեցումով, որոնք ադսորբվածված են շվերտմանիտի և բազալյումինիտի վրա:
5. Այսինքն դիտարկելով նաև այն հանգամանքը, որ տեսականորեն հնարավոր է նաև կորզել կլանվողմետաղները ամբողջությամբ և ստանալ եկամուտ մետաղների վաճառքից: Այդ իսկ պատճառով այս մեթոդը դառնում է ավելի գրավիչ տնտեսական տեսանկյունից: Համադրելով վերոնշյալ արդյուքները, ստացվում է որ կլանիչների կիրառությունը տնտեսապես կարող է բավականաչափ արդյունավետ համարվել դասական հիմքերի կիրառմամբ ԹՀԴ -ների չեզոքացման համեմատ: Բացի տնտեսական էֆֆեկտից, ԹՀԴ -ների էժան մաքրումը կնպաստի լուծել այն բնապահապանական խնդիրները, որենք առկա են ՀՀ-ի հանքարդյունաբերական տարածքներում, մասնավորապես չշահագործվող և չռեկուլտիվացված հանքերում և դրանց շրջակայքում:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԹԵՄԱՅՈՎ ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

1. Hayrapetyan S.S., Margaryan L.A., Banyan L.S., Simonyan G.S., Arakelyan A.S., Khachatryan H.G. Study of the Processes in Acid Mining Drainage Wastes DURING its Neutralisation with Sodium Hydroxide *Journal of Environmental Protection and Ecology* 25, No 2, 1–1 (2024) (SCOPUS).
2. Arakelyan A.S. Study of Acid Mine Drainage and its Neutralization for the Area of the Abandoned Mine //Bulletin Of High Technology N 1 (33) 2025.-pp. 42-53.
3. Айрапетян М.С., АЙРАПЕТЯН С.С., Аракелян А.С., Маргарян Л.А., Хачатрян А.Г. Сорбционные свойства сорбента на основе бентонита-диатомита по отношению к щелочным металлам //Химический журнал Армении DOI: 10.54503/0515-9628-2023.76.4-330

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ШАХТНЫХ ДРЕНАЖНЫХ ВОД В РЕСПУБЛИКЕ АРМЕНИЯ

РЕЗЮМЕ

Основной целью данной работы являлась оценка эффективности нейтрализации кислотных шахтных дренажных вод в Республике Армения.

Научная новизна работы.

Впервые в процессе нейтрализации кислотного шахтного дренажа были использованы материалы природного происхождения (серпентиниты), а также промышленные отходы в виде электрометаллургического шлака. Показано, что применение подобных материалов может обеспечить значительный экономический эффект и одновременно способствовать решению экологических проблем.

Положения, выносимые на защиту:

Выбор эффективных сорбционных материалов для извлечения ряда ценных металлов из кислотного шахтного дренажа.

Оценка эффективности отдельных сорбционных материалов, применяемых для снижения расхода щелочных реагентов при нейтрализации кислотного шахтного дренажа.

Выводы

При нейтрализации кислотного шахтного дренажа карбонатом натрия задействованы два механизма:

- а) осаждение металлов в виде гидроксидов;
- б) осаждение металлов в виде карбонатов.

При начальных значениях рН в диапазоне 3,9–4,5 наблюдается незначительное повышение рН, после чего начинается его линейное снижение. Чем выше исходное значение рН, тем меньше разница изменения рН, однако рост мутности в этом случае происходит быстрее, то есть увеличение мутности прямо пропорционально снижению рН. При сравнительно высоких значениях рН карбонатный характер осадка, по-видимому, преобладает над гидроксидным.

Процессы карбонизации двухвалентного железа при высоких значениях рН протекают более интенсивно, и железо в осадке преимущественно присутствует в виде сидерита. Это свидетельствует о постепенном снижении окисления гидроксида железа(II) до железа(III) с образованием ионов H^+ , вследствие чего при высоких значениях рН падение рН является минимальным. При более высоких значениях рН карбонаты становятся более устойчивыми, и концентрация двухвалентного железа в растворе уменьшается. Поскольку снижение рН обусловлено окислением железа(II) до железа(III), а карбонат железа (сидерит) не гидролизует с образованием гидроксида железа(II) и не подвергается последующему окислению до железа(III), падение рН становится все менее выраженным.

При добавлении гидроксида натрия (NaOH) в кислотный шахтный дренаж значение рН возрастает неравномерно по отношению к добавляемому количеству реагента. Механизмы данных изменений различны. В частности, в диапазоне рН 3,52–2,64

снижение рН, вероятно, обусловлено окислением железа(II) до железа(III). В диапазоне рН 6,2–6,41, когда содержание железа(II) в воде было значительно ниже, увеличение мутности не может быть объяснено процессами окисления железа(II).

Кислотный шахтный дренаж может быть стабилизирован путем его подкисления минеральной кислотой (в частности, серной кислотой). Под стабилизацией понимается отсутствие в течение длительного времени (до 2 месяцев) каких-либо заметных процессов в воде (снижения рН, увеличения мутности) после добавления серной кислоты.

При добавлении различных количеств гидроксида натрия в кислотный шахтный дренаж наблюдаются различные механизмы:

при рН $\approx 6,0$ рост мутности обусловлен окислением железа(II) до железа(III);

при более высоких значениях рН (6,0–6,5), когда содержание железа(II) в воде низкое, увеличение мутности связано с соосаждением других металлов, адсорбированных на швертманните и базальюмините.

Учитывая, что теоретически возможно полное извлечение сорбируемых металлов с последующей реализацией полученных металлов, данный метод становится более привлекательным с экономической точки зрения.

Сопоставление полученных результатов показывает, что применение сорбентов может быть экономически более эффективным по сравнению с классическими методами нейтрализации кислотного шахтного дренажа с использованием щелочей. Помимо экономического эффекта, недорогая очистка кислотного шахтного дренажа будет способствовать решению экологических проблем, существующих в горнодобывающих районах Республики Армения, особенно в зонах неэксплуатируемых и нерекультивированных месторождений и на прилегающих территориях.

Рекомендации

Осуществлять количественный и качественный мониторинг кислотных дренажных вод на территории Республики Армения.

Разработать и принять законодательные акты, регулирующие очистку и последующее извлечение компонентов из кислотного шахтного дренажа, поскольку в Республике Армения в настоящее время отсутствует нормативно-правовая база в данной сфере.

Разработать и реализовать пилотный проект по очистке кислотного шахтного дренажа и извлечению осажденных металлов.

**ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF MINERAL DRAINAGE WATER
NEUTRALIZATION IN THE REPUBLIC OF ARMENIA**

SUMMARY

The main objective of this study was to evaluate the efficiency of neutralization of acid mine drainage waters in the Republic of Armenia.

Scientific novelty of the study.

For the first time, materials of natural origin (serpentinites) as well as industrial wastes in the form of electrometallurgical slag were applied in the process of acid mine drainage neutralization. It has been demonstrated that the use of such materials can provide significant economic benefits and simultaneously contribute to the solution of environmental problems.

Statements submitted for defense:

Selection of effective sorbent materials for the extraction of a number of valuable metals from acid mine drainage. Evaluation of the efficiency of specific sorbent materials used to reduce the consumption of alkaline reagents during the neutralization of acid mine drainage.

Conclusions

During the neutralization of acid mine drainage with sodium carbonate, two mechanisms are involved:

- (a) precipitation of metals in the form of hydroxides;
- (b) precipitation of metals in the form of carbonates.

At initial pH values in the range of 3.9–4.5, a slight increase in pH is observed, followed by a linear decrease. The higher the initial pH, the smaller the difference in pH change; however, turbidity increases more rapidly under these conditions. Thus, the increase in turbidity is directly proportional to the decrease in pH. At relatively high pH values, the carbonate nature of the precipitate most likely predominates over the hydroxide form.

Carbonation processes of ferrous iron at high pH values proceed more intensively, and iron in the precipitate is predominantly present in the form of siderite. This indicates that the oxidation of ferrous hydroxide to ferric iron with the formation of H^+ ions gradually decreases; therefore, at high pH values, the decrease in pH is minimal. At higher pH values, carbonates become more stable, and the concentration of ferrous iron in solution decreases. Since the decrease in pH is associated with the oxidation of ferrous iron to ferric iron, and iron carbonate (siderite) does not hydrolyze to form ferrous hydroxide and is not subsequently oxidized to ferric iron, the pH decrease becomes progressively smaller.

When sodium hydroxide (NaOH) is added to acid mine drainage, the pH increases nonlinearly with respect to the amount of reagent added. The mechanisms underlying these changes differ. In particular, within the pH range of 3.52–2.64, the decrease in pH is likely caused by the oxidation of iron(II) to iron(III). In the pH range of 6.2–6.41, when the concentration of iron(II) in water is significantly lower, the increase in turbidity cannot be explained by iron(II) oxidation processes.

Acid mine drainage can be stabilized by acidifying it with a mineral acid, particularly sulfuric acid. Stabilization refers to the fact that after the addition of sulfuric acid, no significant visible

processes (pH decrease, increase in turbidity) occur in the water over a prolonged period (up to two months).

Different mechanisms are observed when various amounts of sodium hydroxide are added to acid mine drainage:

- at $\text{pH} \approx 6.0$, the increase in turbidity is caused by the oxidation of iron(II) to iron(III); at higher pH values (6.0–6.5), when the concentration of iron(II) in water is low, turbidity increase is due to the co-precipitation of other metals adsorbed on schwertmannite and basaluminite.

Considering that, in theory, it is possible to completely extract the sorbed metals and generate income from the sale of the recovered metals, this method becomes more attractive from an economic perspective.

A comparison of the obtained results indicates that the application of sorbents can be economically more efficient than classical neutralization of acid mine drainage using alkaline reagents.

In addition to the economic effect, low-cost treatment of acid mine drainage will contribute to solving environmental problems existing in the mining regions of the Republic of Armenia, particularly in abandoned and non-reclaimed mines and their surrounding areas.

Recommendations

Conduct quantitative and qualitative monitoring of acid drainage waters throughout the territory of the Republic of Armenia.

Develop and adopt legislation regulating the treatment and subsequent recovery of components from acid mine drainage, as there is currently no regulatory framework governing this field in the Republic of Armenia.

Develop and implement a pilot project for the treatment of acid mine drainage and the recovery of precipitated metals.

