

Р.А. Аубакирова¹, Н.В. Серая², Г.К. Даумова^{2*}, Ш.К. Саньязова¹

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070010, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Қазақстан көшесі, 55

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070010, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Серікбаев көшесі, 19

*e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru

ТАЙЖУЗГЕН КЕН ОРНЫНЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІРІЛГЕН ЦЕОЛИТІНІҢ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Жұмыста ӨМК «Қазмырыш» ЖШС металлургиялық кәсіпорнының ағынды суларын мыс (II), мырыш (II) және қорғасын (II) сияқты металл иондарынан тазарту зерттелді. Тайжүзген кен орнының (Шығыс Қазақстан) механикалық белсендірілген табиғи цеолитінің көмегімен металл иондарынан ағынды суларды тазарту мүмкіндігі негізделген. Цеолиттің фракциялық құрамына байланысты оның адсорбциялық қабілеті зерттелді. Сорбенттерді модификациялаудың тиімді әдісі - механикалық белсендіру көрсетілген. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері бойынша табиғи цеолит негізінде алынған механикалық белсендірілген сорбент металлургиялық кәсіпорындардың көп компонентті ағынды суларын терең тазарту үшін келешегі зор болып табылатыны анықталды. Цеолиттің сорбциялық белсенділігі сорбенттің механикалық белсендіру дәрежесіне тікелей байланысты екендігі анықталды. Өнеркәсіптік ағынды суларды Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} иондарынан (сәйкесінше 53,85%, 88,52% және 92,11%) тазартудың ең үлкен дәрежесіне механикалық белсендірілген сорбенттің ағынды сумен 3 сағаттық байланысы (оңтайлы ірілік 50-100 мкм өлшемінде) және (1-2) г:100 см³ қатынасы арқылы қол жеткізіледі. Мыс (II), мырыш (II) және қорғасын (II) иондарының адсорбциялық изотермалары алғаш рет Тайжүзген кен орнының механикалық белсендірілген цеолитінде Ленгмюр және Фрейндлих модельдеріне сәйкес салынған.

Түйін сөздер: ағынды сулар, металл иондары, сорбция, цеолит, механикалық белсендіру, изотерма.

Кіріспе

Құрамында ауыр металдары бар ағынды сулар қоршаған орта үшін ең қауіпті болып саналады. Мұндай тазартылмаған немесе жеткіліксіз тазартылған суларды су бассейндеріне төгу су айдындарының экожүйесіне теріс әсер етеді. Ағынды суларды тазарту Шығыс Қазақстан облысы (ШҚО) үшін де өзекті, оның тарихи ластануы металлургия өнеркәсібінен туындаған судың сапасына үлкен әсер етеді. Ағынды суларды тазартудың дәстүрлі әдістері ағынды суларды металл иондарынан терең тазартуға мүмкіндік бермейді, өйткені олардың қалдық мөлшері ШРК нормасынан 10 немесе одан да көп есе асады. Ағынды суларды ауыр металдардан тазарту әдістерінің ішінде сорбциялық әдістер ең тиімді болып табылады. Сорбциялық тазартудың тиімділігі сорбенттің химиялық сипатына, оның құрылымына және сорбциялық бетінің мөлшеріне байланысты. Ауыр металдарды тазарту үшін ең көп таралған сорбциялық материалдар жасанды сорбенттер, белсендірілген көмір, синтетикалық цеолит, саз минералдары [1-3] болып келеді. Синтетикалық және көміртекті сорбенттердің кең қолданылуын шектейтін бірқатар кемшіліктері бар екенін атап өткен жөн. Кемшіліктерге жоғары шығындар, сондай-ақ шектеулі көлемдер жатады.

Соңғы кездері суды ауыр металл иондарынан тазарту үшін табиғи сорбент ретінде сорбциялық сыйымдылығы жеткілікті жоғары, катион алмасу қасиеттері, салыстырмалы түрде төмен құны және қол жетімділігі бар, әсіресе кен орындары өнеркәсіптік кәсіпорындарға жақын болған жағдайларда табиғи цеолиттер қолданылуда [4]. Жоғарыда аталған сипаттамалардың арқасында пайдалы қасиеттері құрылымның ерекшеліктерімен және бірегей ион алмасу қабілетімен анықталатын цеолиттер [5] бейорганикалық және органикалық қоспалардан [6] суды тазарту үшін тиімді қолданылады.

Табиғи күйдегі сорбенттердің көпшілігі көптеген сыртқы факторларға айтарлықтай тәуелді төмен сорбциялық қабілеттерге ие. Сондықтан оны қолданар алдында бастапқы шикізатты модификациялау қажеттілігі туындайды.

Соңғы онжылдықтарда табиғи цеолиттердің беткі қабатын ұлғайту немесе олардың белгілі бір затқа немесе заттар тобына селективтілігін анықтау мақсатында оларды өзгерту бойынша көптеген зерттеулер жүргізілді. Табиғи цеолиттерді белсендірудің жиі қолданылатын әдістері бір немесе аралас термиялық немесе химиялық модификацияны қамтиды [7].

Мысалы, зерттеушілер [8] әртүрлі өңдеу әдістерінің табиғи цеолиттерге (Түркия), соның ішінде ион алмасуға, қышқылды шаймалауға, термиялық және бумен өңдеуге әсерін зерттеген болатын. Цеолиттер ион алмасуымен (0,5M NH₄NO₃ көмегімен) және қышқылды шаймалау (1M HCl) арқылы өзгертілді. Деалюминация мен декатионизацияны тудыратын, сондай-ақ кристалдық құрылымның жоғалуына, фазалардың күйеженектелуіне және аморфты материалдың түзілуіне әкелетін бу мен қышқылды өңдеу ерекше маңызды болды.

Қазақстандық зерттеушілер [9] Шанқанай кен орнындағы цеолиттердің ауыр металдарға қатысты адсорбциялық қабілетін зерттеп, оның термиялық белсендіруден кейін айтарлықтай өскенін анықтады. Оңтайлы белсендіру температурасы 2 сағат бойы ұсталған кезде 550 °C болды. 550 °C дейін қыздырылған кезде адсорбция никель үшін 87%, мыс пен кадмий үшін 99% және қорғасын үшін 100% құрады, ал 500 °C температурада бұл көрсеткіштер сәйкесінше 78, 98, 83 және 88 % болды. Сонымен қатар, термиялық өңдеу арқылы цеолиттерді белсендіру экономикалық тұрғыдан тиімсіз және қымбат болып келеді.

Зерттеулер көрсеткендей, табиғи цеолиттерді қышқылдармен, негіздермен немесе тұздармен өңдеу олардың катиондарды адсорбциялау қабілетін және ауыр металдарды әкету тиімділігін арттырады [10]. Алайда, бұл реагенттерді шамадан тыс қолдану адсорбциялық қабілетінің төмендеуіне әкелетін цеолиттердің кристалдылығына теріс әсер етуі мүмкін.

Тұз қышқылы цеолиттерді белсендіру үшін ең көп қолданылатындардың бірі екені белгілі. Мысалы, келесі зерттеуде [11] Сокирницкий кен орнынан (Закарпатия облысы, Украина) құрамында шамамен 75% клиноптилолит бар табиғи цеолитті тұз қышқылымен (2M HCl) өңдеу бетінің 13 м²/г-ден 78 м²/г-ға дейін едәуір ұлғаюына әкелгені анықталды.

Келесі жұмыста [12] 3 сағат ішінде 70 °C температурада 15% күкірт қышқылын қолдана отырып, Сангареди бокситтерінен (Гвинея Республикасы) цеолитті белсендірудің оңтайлы шарттары зерттелді. Белсендірілген үлгілерді қышқылмен өңдеу меншікті беттің ұлғаюына (орта есеппен 72-130,25 м²/г дейін) және кеуектілікке (0,07%-0,3% дейін) әкелетіні анықталды.

Басқа жұмыста [13] Чили цеолитін NaCl, NaOH, Na₂CO₃ және NH₄Cl активаторларымен белсендіру оның табиғи цеолитпен салыстырғанда сулы ерітінділерден марганец иондарын адсорбциялау қабілетін арттырғаны көрсетілген.

Отандық зерттеушілер [14] табиғи цеолиттерді лимон қышқылымен 100 °C температурада 30 минут бойы (1:(1-2) компоненттерінің қатынасында), содан кейін глицидилметакрилатпен (25-33 мас. %) 1 сағат ішінде, және соңында 3-4 сағат ішінде 100-140 °C температурада термиялық өңдеу арқылы модификациялады. Бұл әдістің басты кемшілігі - модификациялау үшін қымбат реагенттерді қолдану. Сондай-ақ, модификация үшін қолданылатын химиялық реагенттер қайталама ластануды тудыратынын атап өтуге болады.

Келесі зерттеушілер [15] табиғи сорбенттердің сорбциялық сипаттамаларын механикалық белсендіру арқылы арттыруға болатынын анықтаған болатын, бұл кристалдық тордың ішінара бұзылуы және сорбенттің меншікті бетінің дамуы арқылы қамтамасыз етіледі.

Жаңа сорбенттерді әзірлеу олардың тиімділігін арттыру және механикалық қасиеттерін жақсарту қажеттілігіне байланысты. Материалдардың белсенділігін арттыруға арнайы агрегаттарда диспергация және ұнтақтау нәтижесінде қол жеткізіледі. Ұнтақтау фазалық өзгерістерге және кристалдардың аморфталуына әкеліп, химиялық белсенділікке әсер етеді.

Осыған байланысты жүргізілген зерттеу ШҚО Тайжүзген кен орнының цеолиттері негізінде жаңа тиімді сорбентті синтездеуге арналған. Ағынды суларды тазарту саласындағы зерттеу әлемдік экологиялық жағдай мәселелерін шешуде басым міндет болып табылады. Оның өзектілігі антропогендік әсерді азайтуға мүмкіндік беретін жаңа, тиімді және келешегі зор әдістерді зерттеу мен әзірлеу болып табылады. Бұл жұмыста ӨМК "Қазмырыш" ЖШС мысалында металлургиялық кәсіпорынның ағынды суларының ауыр металл иондарынан тазарту үшін табиғи механикалық белсендірілген цеолиттер зерттелді.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Жұмыста сорбциялық қасиеттерін зерттеу үшін ШҚО Тайжүзген кен орнының цеолиті пайдаланылды. Механикалық белсендірілген сорбент алу үшін эксперименттік зерттеулер жүргізілмес бұрын цеолит алдымен +1 мм ұсақтаудан өтіп, содан кейін ұнтақтағышта қосымша өңделді. Алынған полидисперсті қоспаны -50, 50-100, 100-500, +500 мкм фракциялары бөліп,

жеке қойды. Экспериментте -50, 50-100, 100-500 мкм фракциялары қолданылды. Сорбциялық процестерді зерттеу модельдік ерітінділермен қатар, ӨМК "Қазмырыш" ЖШС металлургиялық кәсіпорнының ағынды суларымен де жүргізілді.

Модельдік металл ерітінділерінің концентрациясы 0,1-ден 20 мг/дм³ аралығында алынды. Барлық зерттелетін ерітінділерді өңдеу статикалық режимде жүргізілді. Цеолиттің шығыны 0,5; 1; 100 см³ модельдік ерітіндіге 2 г сорбентті құрады. Құрамында ауыр металл иондары бар ерітіндінің табиғи сорбентпен жанасу уақыты 30 минуттан 24 сағатқа дейін болды. Түзілген қойыртпақ тұндырылды, содан кейін қатты фазадан сұйықты центрофугирлау арқылы бөлінді. Ерітіндідегі металл иондарының құрамындағы өзгерістерді бақылау бүкіл үдеріс барысында жүзеге асырылды. Металл иондарының концентрациясын өлшеу үшін флуориметриялық және атомдық-абсорбциялық талдау әдістері қолданылды.

Бұл жұмыста цеолиттің сорбциялық қасиеттерін зерттеу үшін мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондары таңдалды. Бұл таңдау Шығыс Қазақстан облысының кен орындарын игеруге және полиметалл кендерін өндіруге байланысты болып келеді. Ағынды су сынамаларын алу әдістемеге [16] сәйкес ӨМК "Қазмырыш" ЖШС өнеркәсіптік алаңына іргелес ағынды су айдындарында жүргізілді. Су сынамалары көсіп алу арқылы алынып, 4 °С дейін салқындатылды, содан кейін азот қышқылымен (3 см³ HNO₃ 1 дм³ суға) рН 2 дейін сақталды.

Жасалған эксперименттік тәжірибелер бойынша тазалау дәрежесі келесі (1) өрнек арқылы есептелінді:

$$\alpha = \frac{C_o - C}{C_o} \cdot 100, \% \quad (1)$$

мұнда, C_o – ерітіндідегі компоненттің бастапқы мөлшері, мг/дм³;

C – ерітіндідегі компоненттің қалдық концентрациясы, мг/дм³.

Металл сорбциясының изотермаларын құру үшін сорбция мөлшері (Г) келесі формула (2) арқылы анықталды:

$$\Gamma = \frac{(C_{алф} - C_{т-т}) \cdot V}{m} \quad (2)$$

мұнда, C_{алф} - ерітіндідегі металдың бастапқы концентрациясы, ммоль/дм³; C_{т-т} - ерітіндідегі металдың тепе-теңдік концентрациясы, ммоль/дм³; V - ерітіндінің көлемі, дм³; m - сорбенттің массасы, г.

Модельдік ерітінділердегі металл иондарының бастапқы және тепе-теңдік концентрациялары (моль/дм³) ерітінділердің концентрациясынан (мг/дм³) келесі формула (3) арқылы есептелді:

$$C = \frac{m(\text{мг})}{M \cdot V(\text{л})} \quad (3)$$

Мономолекулалық адсорбция изотермасы Лэнгмюр теңдеуі (4) арқылы сипатталып, анықталынды:

$$\Gamma = \Gamma_{max} \cdot \frac{K_L \cdot C}{(1 + K_L \cdot C)} \quad (4)$$

Аталған модельдің көмегімен сорбатпен белсенді әрекеттесетін сорбент молекуласындағы сорбциялық орталықтардың санын сипаттайтын Г_{max} коэффициентін, сондай-ақ белгілі бір сорбент пен сорбат арасындағы жақындық дәрежесін көрсететін K_L параметрі есептелді. Г_{max} және K_L сандық мәндерін алу үшін Лэнгмюр (5) теңдеуі келесі түрде қолданылды:

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{max}} + \frac{1}{K_L \cdot \Gamma_{max} \cdot C} \quad (5)$$

Сорбент пен сорбат арасындағы химиялық байланыстардың беріктігі мен түзілу жылдамдығын талдау үшін еріген заттардың адсорбциясының концентрацияға (орташа концентрация аймағында) тәуелділігі Фрейндлихтің эмпирикалық теңдеуімен (6) сипатталды:

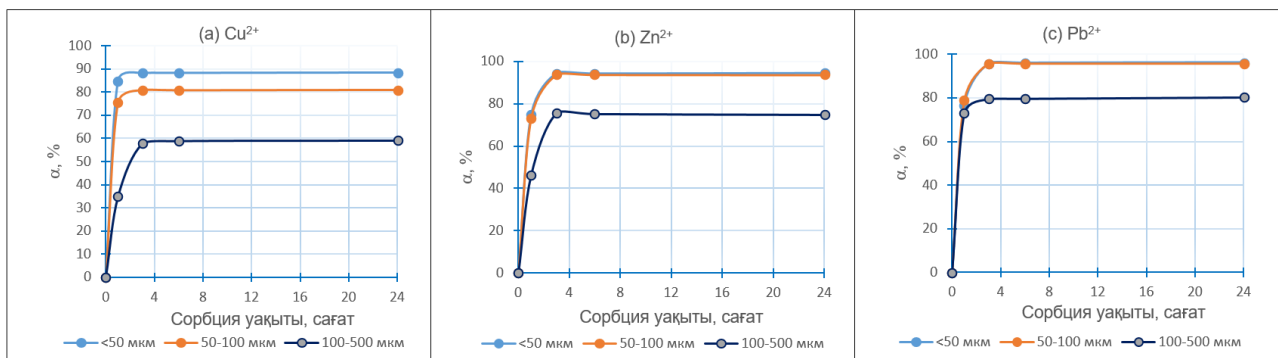
$$\Gamma = K_F \cdot C^{1/n} \quad (6)$$

Адсорбцияның болжамды есептеулерін жүргізу үшін логарифмдік формада Фрейндлихтің эмпирикалық теңдеуі (7) қолданылды:

$$\ln \Gamma = \ln K_F + (1/n) \cdot \ln C \quad (7)$$

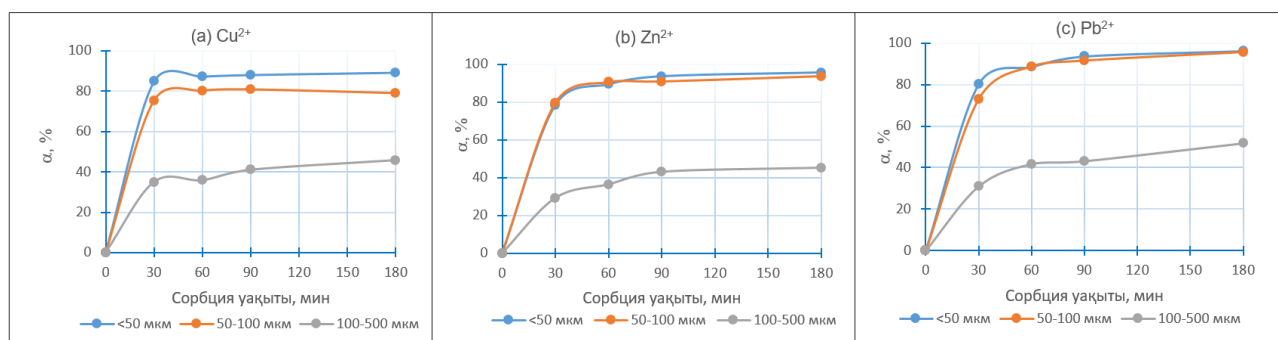
Зерттеу нәтижелері және талқылау

Тазалау дәрежесінің әртүрлі дисперстік құрамдағы сорбентпен сорбция уақытына тәуелділігін зерттеу үшін құрамы 5 мг/дм³ концентрациялы мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондарынан тұратын 100 см³ модельді ерітінділер дайындалды. Тәжірибелер <50, 50-100 және 100-500 мкм диапазонындағы ұнтақтау өлшемдерімен әзірленген механикалық белсендірілген сорбент – цеолитпен жүргізілді. Модельдік ерітінділерді металл иондарынан тазалау үшін массасы 1 г сорбент қолданылды. Ерітіндінің сорбентпен байланыс уақыты 1-24 сағатты құрады. Алынған эксперименттік мәліметтер негізінде металл иондарынан тазалау дәрежесінің ерітінді мен сорбент арасындағы байланыс уақытына графикалық тәуелділігі құрылды (1-сурет). Нәтижелер модельдік ерітінділердегі зерттелетін металл иондарымен цеолиттің әрекеттесуінің алғашқы 3 сағатында сорбция белсенді түрде өтетінін көрсетті. Бұл жағдайда сорбциялық тепе-теңдікке жетудің максималды уақыты – 3 сағат. Сонымен қатар, сорбенттің механикалық белсендіру дәрежесі модельдік ерітінділерден металл иондарының негізгі тазалануы жүретін сорбция уақытына әсер етпейтіні анықталынды. Сондықтан кейінгі зерттеулер үшін ерітінділер мен сорбенттің байланыс уақытын 3 сағатқа дейін, атап айтқанда 30, 60, 90 және 180 минутқа дейін пайдалану туралы шешім қабылданды.



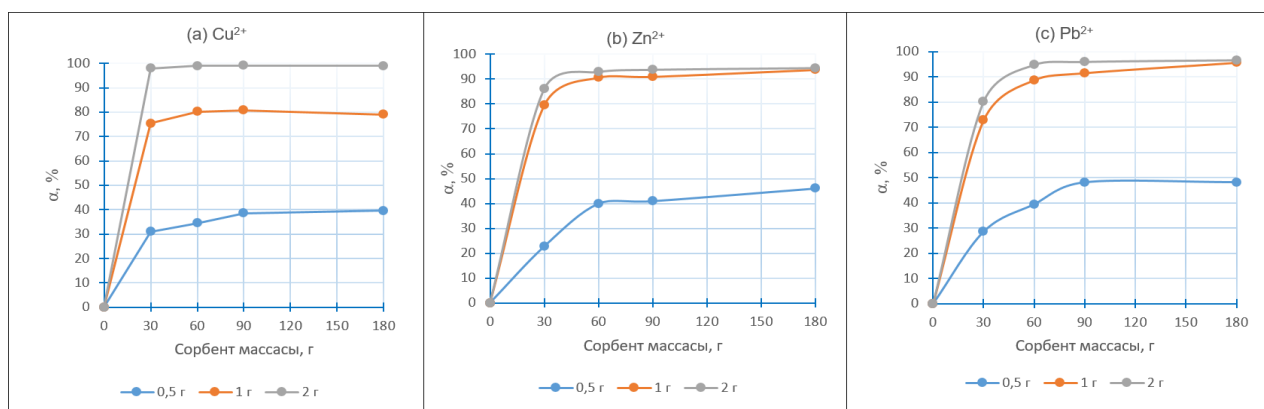
Сурет 1 – Дисперстілігі әртүрлі механикалық белсендірілген сорбентпен металл иондарынан тазалау дәрежесінің сорбция уақытына тәуелділігі

Алынған нәтижелер механикалық белсендірудің цеолиттің сорбциялық белсенділік дәрежесіне айтарлықтай әсерін көрсетті (1-сурет). 2-суретте келтірілген графиктегі тәуелділік негізінде ең кіші фракциясы бар ұнтақтың (<50 мкм) ерітіндіден металл иондарын тазалаудың ең жоғары көрсеткіштерін көрсететіні анықталды. Дегенмен, бұл үлгіні пайдалану сұйық фазаны қатты (коллоидты) фазадан бөлуде қиындықтарды тудырып, тазалау үдерісінің құнын арттыруы мүмкін. Сондай-ақ, ерітіндіден дисперстілігі 100-500 мкм цеолитпен металл иондарынан тазалау дәрежесі екі кіші фракцияға қарағанда едәуір төмен болатыны анықталғаннан кейін, одан әрі зерттеулерден алынып тасталды. Дисперстіліктері $d < 50$ мкм және $d = 50-100$ мкм цеолиттермен металдарды тазалау дәрежесі айтарлықтай ерекшеленбейтіндігін ескере отырып, одан әрі зерттеу үшін оңтайлы құрам ретінде дисперстілігі 50-100 мкм сорбент қалдырылды.



Сурет 2 – Металл иондарынан тазалау дәрежесінің цеолиттің механикалық белсендіру деңгейіне тәуелділігі

Металл иондарынан тазалау дәрежесінің механикалық белсендірілген сорбент массасына тәуелділігін зерттеу үшін құрамында 5 мг/дм³ концентрациялы мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондары, сондай-ақ 50-100 мкм цеолит бар модельдік ерітінділер пайдаланылды (3-сурет). Цеолиттің массасы 0,5, 1 және 2 г құрады. Ерітіндінің сорбентпен байланыс уақыты 30-180 минут аралығында болды.



Сурет 3 – Металл иондарынан тазалау дәрежесінің сорбенттің массасына тәуелділігі

Жүргізілген эксперименттердің нәтижелері механикалық белсендірілген цеолитті қолдану кезінде мыс (II), мырыш (II) және қорғасын (II) иондарынан тазалау дәрежесі сорбенттің массасына айтарлықтай байланысты екенін көрсетті. Cu²⁺ үшін 99,1%, Zn²⁺ үшін 94,4% және Pb²⁺ үшін 96,7% құраған ең жоғары тазалау дәрежелері 100 см³ ерітіндіге 2 г сорбентті қолдану кезінде қол жеткізілді. Алайда, бұл тәсіл материалдың артық шығынына, қатты фазаның едәуір көлемінің түзілуіне және фазаларды бөлу сатысының күрделенуіне алып келеді.

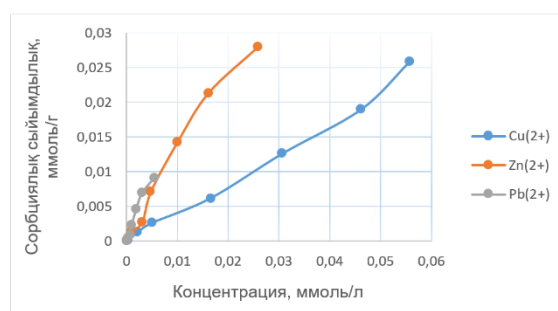
Сорбентті ұтымды пайдалану мақсатында 100 см³ ерітіндіге 1 г цеолит қолдану оңтайлы доза ретінде негізделіп таңдалды. Бұл массада Cu²⁺ үшін 80,86%, Zn²⁺ үшін 93,76% және Pb²⁺ үшін 95,7% құрайтын сорбцияның жоғары тазалау дәрежесіне қол жеткізілді. Бұл пайдалану шығындары мен қалдықтардың қайталама түзілуін азайту кезінде ағынды суларды тиімді тазартуға мүмкіндік береді. Осылайша, 1 г/100 см³ мөлшері үдерістің тиімділігі мен оны тәжірибе жүзінде іске асыру арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ете отырып, бұл оны әрі қарай өндірістік ауқымда қолдануға лайық етеді.

Материалдың сорбциялық қасиеттері және ондағы белгілі бір заттардың адсорбция сипаты туралы негізгі тәуелділіктерді адсорбция изотермаларынан алуға болады. Бұл изотермалар сорбциялық қабілеттің сұйық фаза үшін тұрақты температурада сорбцияланатын компоненттің концентрациясына тәуелділігін сипаттайды. Бұл тәуелділіктерді зерттеу адсорбция механизмдерін жақсы түсінуге және сорбенттердің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

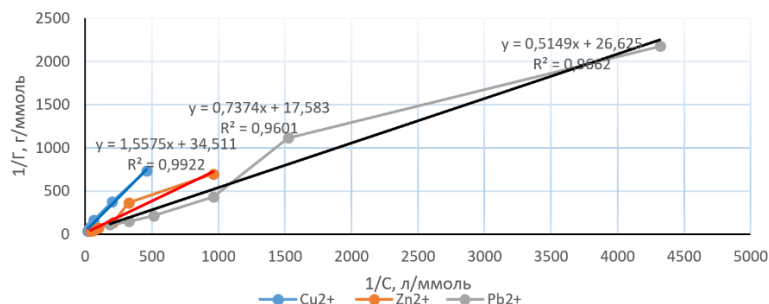
Мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондарының сорбция изотермаларын құру мақсатында концентрациялары 0,1; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 мг/дм³ құрайтын модельдік ерітінділердің үш сериясы дайындалды. Металл иондарының концентрациясы төмен ерітінділер бастапқы ерітінділерді сұйылту арқылы дайындалды. Тәжірибелер дисперстілігі 50-100 мкм, массасы 1 г механикалық белсендірілген цеолитпен жүргізілді. Құрамында металл иондары бар ерітіндінің сорбентпен жанасу уақыты 180 минутты құрады. Алынған эксперименттік мәліметтер негізінде сорбциялық сыйымдылықты анықтау есептеулері жүргізілді, сонымен қатар мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондарының адсорбция изотермаларының графикалық тәуелділіктері салынды (4-сурет).

Лэнгмюрдің сорбция моделі белсенді байланыс орталықтарының шектеулі саны бар сорбенттің бір қабатты біртекті құрылымындағы заттардың сорбция процестерін сипаттайды.

1/Г–f(1/С) координаттарында Лэнгмюр изотермалары түзу сызықтар түрінде сипатталды, мұнда көлбеу бұрышының тангенсі - 1/Г_{max}·K_L, ал ординатта кесілген сегменттер 1/Г_{max} тең болды. Жүргізілген өлшеулер нәтижелері бойынша Лэнгмюр моделі арқылы механикалық белсендірілген цеолитпен металл иондарының сорбциясының сызықтық изотермалары салынды (5-сурет).



Сурет 4 – Сорбция изотермалары



Сурет 5 – Лэнгмюр моделі арқылы механикалық белсендірілген цеолитпен металл иондарының сорбция изотермаларын сызықтандыру

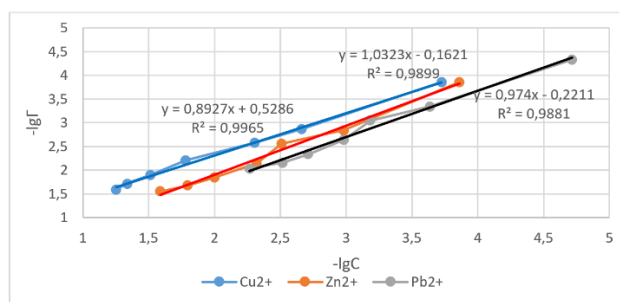
Лэнгмюр моделін сызықтандыру адсорбенттің адсорбат молекулаларымен толық мономолекулалық жабынына сәйкес келетін Γ_{max} адсорбциясының шекті мәндерін анықтауға мүмкіндік берді. Графикалық есептеу әдісін қолдана отырып, Лэнгмюр теңдеуінің коэффициенттері анықталды (1-кесте).

Кесте 1 – Лэнгмюр изотермасы теңдеулерінің эксперименттік параметрлері

Металл ионы	$tg a$	K_L	$1/\Gamma_{max}$	Γ_{max}
Cu^{2+}	1,5357	19,55	30,02	0,0333
Zn^{2+}	0,7280	7,73	5,63	0,1777
Pb^{2+}	0,5002	54,28	27,15	0,0368

Лэнгмюр сорбциясы изотермаларының графиктеріне сәйкес, изотермалардың бастапқы учаскелерінде сорбциялану мәні ерітіндідегі иондардың концентрациясына пропорционалды деп қорытынды жасауға болады. Бұл ерітіндідегі төмен концентрацияда мөлшерлік сорбция пайда болатындығын көрсетеді. Ерітіндідегі иондардың жоғары концентрациясында сорбция изотермалары барған сайын тегіс болады және көлденең асимптотаға шығады, бұл адсорбенттің қанығуына қол жеткізгенге дейін сорбция тиімділігінің жоғарылағанын көрсетеді. Γ_{max} коэффициенті сорбат молекулаларымен белсенді әрекеттесуге қабілетті сорбент молекуласындағы сорбция орталықтарының максималды мөлшерін сипаттайды. K_L коэффициенті өзара әрекеттесу күшін сипаттайтын белгілі бір сорбент пен сорбат арасындағы жақындық дәрежесін көрсетеді. K_L жоғары мәндері әдетте күшті өзара әрекеттесуді және сорбенттің сорбатты байланыстыру қабілетін білдіреді.

Белсенді орталықтардың белгісіз мөлшері бар бір қабатты гетерогенді сорбенттегі сорбция процестерін сипаттау үшін Фрейндлих моделі қолданылады. Оның ерекшелігі-байланыстырушы агенттің бірлігіне шаққандағы белсенді орталықтардың санын дәл анықтай алмау, бұл орталықтардың біркелкі емес таралуын және өзара әрекеттесудің күрделілігін ескеруге мүмкіндік береді. Модель төмен концентрациядағы адсорбцияны сипаттауға арналған. Алынған эксперименттік мәліметтер негізінде механикалық белсендірілген цеолитпен металдардың сорбциясының сызықтық изотермасы салынды. Ол үшін Фрейндлих моделі қолданылды (6-сурет) және графикалық әдіс арқылы Фрейндлихтің тұрақты теңдеулері есептелді. Бұл мәліметтер сорбция үдерісі сипатын тереңірек түсінуге және сорбент пен сорбаттың өзара әрекеттесу тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді (2-кесте).



Сурет 6 – Фрейндлих моделі арқылы механикалық белсендірілген цеолитпен металл иондарының сорбция изотермаларын сызықтандыру

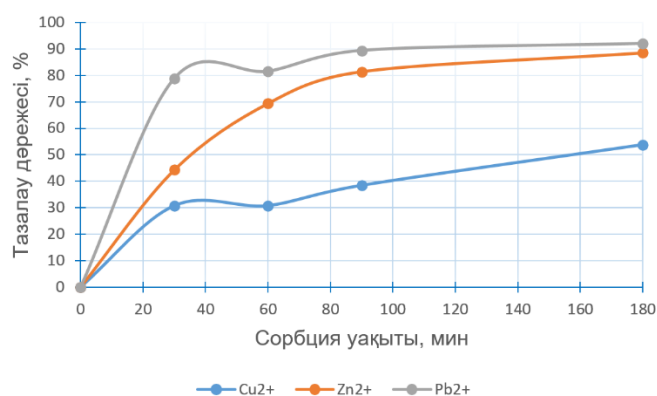
Кесте 2 – Фрейндлих изотермасы теңдеулерінің эксперименттік параметрлері

Металл ионы	$\text{tg } a=1/n$	n	$\lg K_F$	K_F
Cu^{2+}	0,844	1,19	0,361	2,30
Zn^{2+}	0,989	1,01	0,820	6,61
Pb^{2+}	0,663	1,51	1,230	16,98

Фрейндлих теңдеуіндегі K_F шамасы сорбцияланған ионның сорбент бетіне жақындығының сандық өлшемі болып табылады: жоғары мәндер күшті өзара әрекеттесуді және адсорбция тиімділігін көрсетеді. 2-кестеде мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондары үшін K_F константасының есептік мәндері берілген. Нәтижелер қорғасын (II) иондарының мырыш пен мыс (II) иондарымен салыстырғанда цеолитке жақындығын растайды. K_F шамасының мәндеріне сүйене отырып, металл иондарының цеолит бетіне жақындық дәрежесінің жоғарылауын көрсететін келесі қатар алынды: $\text{Cu}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Pb}^{2+}$. Фрейндлих изотермасы теңдеуіндегі n тұрақтысы сорбция қарқындылығын көрсетеді. Нәтижелерді талдау $n = 1,51$ ең үлкен мәні қорғасын (II) иондарына сәйкес келетінін көрсетті, яғни бұл берілген ион үшін ең жоғары сорбция қарқындылығын көрсетеді.

Модельді су ерітінділерінен мыс (Cu^{2+}), мырыш (Zn^{2+}) және қорғасын (Pb^{2+}) иондарын сорбциялау бойынша жүргізілген алдын-ала зерттеулер нәтижесінде өндірістік ағын суларды тазартуға арналған оңтайлы шарттар анықталды. Ең жақсы нәтижелер сорбенттің 1 г массасы және механикалық белсендірілген цеолит бөлшектерінің өлшемі 50–100 мкм аралығында болғанда анықталынды. Барлық эксперименттер статикалық жағдайда, мерзім сайын араластырумен жүргізілді, бұл фазалар арасындағы біркелкі байланысты қамтамасыз етіп, тепе-теңдік жағдайларына жақындатуға мүмкіндік береді. Механикалық белсендірілген сорбентпен ауыр металл иондарынан (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) тазалау дәрежесіне жүргізілген салыстырмалы талдау сорбциялық қасиеттердің едәуір айырмашылығын көрсетті. Ең жоғары тазалау тиімділігі қорғасын ионы (Pb^{2+}) үшін тіркелді: оның тазалау дәрежесі 30 минут ішінде 78,95%-ға жетіп, 180 минутта 92,11%-ға дейін артты. Мырыш иондары (Zn^{2+}) да аталған уақыт аралығында 44,26%-дан 88,52%-ға дейін жоғары тазалау дәрежесін көрсетті. Ал мыс иондары (Cu^{2+}) 180 минут ішінде 30,77%-дан 53,85%-ға дейінгі ең төменгі сорбциялық тазалау дәрежесімен сипатталды. Бұл нәтижелер сорбциялық материалдың Pb^{2+} және Zn^{2+} иондарына селективтілігін көрсетеді, яғни бұл оны ағынды суларды тазарту үшін тиімді етеді. Қорғасын ионынан тазалау дәрежесі жоғары болуы оның кешен түзу қабілетімен және сорбенттің белсенді орталықтарымен күшті әрекеттесу қабілетімен байланысты болуы мүмкін. Кинетикалық қисықтардың сипаты, әсіресе алғашқы 90 минутта жылдам қанығу процесі, сорбциялық учаскелердің жоғары қолжетімділігін және сорбентті ағынды сулардың жүйелерінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Механикалық белсендірілген және белсендірілмеген цеолиттердегі сорбция дәрежесінің салыстырмалы мәндері механикалық белсендірілген цеолиттердің ұқсас сорбция көрсеткіштерін көрсетуге бейім екенін көрсетеді. Дегенмен, металл иондарымен жақсартылған өзара әрекеттесу арқылы механикалық белсендірілген цеолиттер аз шығынымен қатар тиімді тазалау дәрежесін қамтамасыз ете алады (3-кесте).



Сурет 7 – Ағынды сулардан металл иондарын механикалық белсендірілген цеолитпен тазалау дәрежесінің кинетикасы

Кесте 3 – Белсендірілген және белсендірілмеген цеолитпен металл иондарының сорбциясы тиімділігінің салыстырмалы талдауы

Металл ионы	Механикалық белсендірілген цеолит		Белсендірілмеген цеолит [17]	
	Тазалану дәрежесі, α_{max} , %	1 м ³ көлемге шығын, кг	Тазалану дәрежесі, α_{max} , %	1 м ³ көлемге шығын, кг
Cu ²⁺	53,85	10	≈ 80	100-200
Zn ²⁺	88,52		≈ 90	
Pb ²⁺	92,11		80-90	

Қорытынды

Статикалық жағдайларда мыс (II), мырыш және қорғасын (II) иондарын сорбциялау бойынша жүргізілген зерттеулердің нәтижелері Тайжүзген кен орнының механикалық белсендірілген табиғи цеолитін өнеркәсіптік кәсіпорындардың ағынды суларын тазарту үшін қолжетімді сорбент ретінде ұсынуға мүмкіндік береді. Механикалық белсендірілген цеолитті қолдана отырып, модельдік ерітінділер мен ағынды суларды тазарту үшін жүргізілген зертханалық зерттеулердің нәтижелері бойынша келесі негізгі тұжырымдар жасалынды:

1) Цеолиттің сорбциялық белсенділігі сорбенттің механикалық белсендіру дәрежесіне айтарлықтай байланысты болып келеді. Ең жақсы нәтижелерге қол жеткізу үшін сорбенттің оңтайлы дисперстілік өлшемі 50–100 мкм аралығында болуы қажет екені анықталынды.

2) Механикалық белсендірілген цеолитті қолдану ағынды сулардан ауыр металл иондарын тиімді түрде тазартуға мүмкіндік береді. Сорбция уақыты 180 минут болғанда ең жоғары тазалау дәрежесі келесі деңгейге жетті: Pb²⁺ – 92,11%, Zn²⁺ – 88,52%, Cu²⁺ – 53,85%. Қорғасын мен мырыштың сорбциялық тиімділігі сорбенттің осы катиондарға жоғары селективтілігін көрсетті.

3) Зерттелген иондар ішінде сорбентке ең жоғары бейімділік және сәйкесінше ең жоғары тазалау дәрежесі қорғасын (II) иондарына тән болды.

4) «Ерітінді – механикалық белсендірілген цеолит» жүйесінде сорбциялық тепе-теңдікке қол жеткізудің оңтайлы уақыты – 180 минут. Бұл Cu²⁺, Zn²⁺ және Pb²⁺ иондарынан тазалау дәрежесі 3 сағаттық байланыстан кейін тұрақтанатынын көрсететін кинетикалық қисықтардың сипатымен расталады. Бұл негізгі сорбциялық үдерістің аяқталғанын және жүйеде тепе-теңдік орнағанын білдіреді.

5) Механикалық белсендірілген цеолит жоғары сорбциялық сыйымдылықпен және адсорбция жылдамдығымен сипатталады, бұл қажетті сорбент мөлшерін азайтып, қалдықтардың түзілу көлемін қысқартады және үдерістің экономикалық әрі экологиялық тиімділігін арттырады.

Осылайша, жүргізілген зерттеулердің нәтижелері Тайжүзген кен орнының механикалық белсендірілген цеолитінің су ерітінділерінен ауыр металл иондарын тазалаудағы тиімділігін растайды және оны экономикалық тұрғыдан қолжетімді әрі экологиялық тұрғыдан қауіпсіз сорбент ретінде қолдануға негіз болады. Сонымен қатар, өндірістік ағынды суларды тазарту жағдайында бұл технологияны табысты жүзеге асыру үшін сорбциялық үдеріске әсер ететін қосымша технологиялық және химиялық факторларды ескеру қажет. Осыған байланысты

технологияны өнеркәсіптік жағдайларға бейімдеу, сорбентті алдын ала өңдеу шарттарын оңтайландыру және ауқымды пайдаланудың келешегін бағалау өзекті мәселеге айналады.

Механикалық белсендірілген цеолитті нақты ағынды суларды тазартуда қолдану оның сорбциялық тиімділігін төмендететін бірқатар факторлармен байланысты. Атап айтқанда, бәсекелес иондардың (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) болуы, органикалық заттардың, қалқымалы бөлшектердің кездесуі, сондай-ақ рН деңгейінің ауытқуы ауыр металл иондарының адсорбциясына айтарлықтай әсер етуі мүмкін.

Цеолит сорбентін өнеркәсіптік ауқымда тиімді қолдану мен ықтимал кедергілерді азайту үшін келесі инженерлік шешімдер тізбегі ұсынылады:

- ағынды сулардың физикалық-химиялық құрамын алдын ала талдау (рН, иондар концентрациясы, органикалық заттар мен қалқымалы бөлшектердің мөлшері);
- ірі дисперсті және коллоидты қоспалардан коагуляция, флотация немесе сүзу әдістерімен тазалау;
- нақты ағынды сулар құрамын модельдейтін жағдайларда цеолиттің сорбциялық сыйымдылығын анықтайтын зертханалық сынақтар өткізу;
- рН деңгейін тазаланатын ауыр металл иондары үшін оңтайлы диапазонға келтіру;
- сорбция үдерісін қамтитын көпсатылы тазарту сұлбасын енгізу.

Жоғарыда келтірілген стратегия технологияны нақты пайдалану жағдайларына бейімдеуді қамтамасыз етеді, ауыр металл иондарын тазалау тиімділігін арттырады және механикалық белсендірілген цеолитті әртүрлі мақсаттағы су тазарту жүйелерінде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation-A Review / Z. Raji et al // Waste. – 2023. – № 1. – P. 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>.
2. Senila M. Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives / M. Senila, O. Cadar // Heliyon. – 2024. – № 10(3). – P. e25303. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303>.
3. Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment / Sh. Xie et al // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – № 1(3). – P. 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.07.002>.
4. Ugwu E.I. A review on zeolites as cost-effective adsorbents for removal of heavy metals from aqueous environment / E.I. Ugwu, A. Othmani, C.C. Nnaji // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2022. – № 19. – P. 8061-8084. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03560-3>.
5. Rodríguez-Iznaga I. Ion Exchange in Natural Clinoptilolite: Aspects Related to Its Structure and Applications / I. Rodríguez-Iznaga, M.G. Shelyapina, V. Petranovskii // Minerals. – 2022. – № 12. – P. 1628. <https://doi.org/10.3390/min12121628>.
6. Tasić Ž.Z. Application of natural zeolite in wastewater treatment-A review / Ž.Z. Tasić, G.D. Bogdanović, M.M. Antonijević // Journal of Mining and Metallurgy. – 2019. – № 55A (1). – P. 67-79. <https://doi.org/10.5937/JMMA1901067T>.
7. Kordala N. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications / N. Kordala, M. Wyszowski // Molecules. – 2024. – № 29. – P. 1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>.
8. Ates A. The effect of various treatment conditions on natural zeolites: ion exchange, acidic, thermal and steam treatments / A. Ates, C. Hardacre // Journal of Colloid and Interface Science. – 2012. – № 372. – P. 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.01.017>.
9. Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption / E. Kuldeyev et al // Water. – 2023. – № 15. – P. 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>.
10. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: a review / L. Velarde et al // Chemosphere. – 2023. – № 328. – P. 138508. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>.
11. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , and Cd^{2+}) adsorption on clinoptilolite / M. Sprynskyy et al // Journal of Colloid and Interface Science. – 2006. – № 304(1). – P. 21-28. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2006.07.068>.

12. Characterization of Zeolite Types Contained in Sangaredi Bauxite in the Republic of Guinea / M. Sylla et al // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2024. – № 12. – P.1-14. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.1211001>.
13. Taffarel S.R. On the removal of Mn²⁺ ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites / S.R. Taffarel, J. Rubio // *Minerals Engineering*. – 2009. – № 22(4). – P. 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.007>.
14. Патент KZ (13) A (11) 14907 51) 7 C01B 39/00 Способ модификации природных неорганических сорбентов / Ергожин Е.Е., Акимбаева А.М., Бектенов Н.А., Джусипбеков У.Ж., Каппар Б.К., Габдулина Ю.Р., Базилбаев С.М., Садвокасова А.Б., опубл. 15.10.2004.
15. Yerbolov S. Waste Water Purification from Metal Ions by Ultra-Dispersed Natural Sorbents / S. Yerbolov, G. Daumova // *Journal of Ecological Engineering*. – 2022. – № 23(1). – P. 43-50. <https://doi.org/10.12911/22998993/143867>.
16. РД Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши, под ред. А.Д. Семенова. Л., Гидрометеиздат, 1977 – 345 с.
17. Хумарбекулы Е. Исследование сорбции ионов тяжелых металлов сорбентами на основе модифицированных природных цеолитов из промышленных сточных вод // маг. диссертация, Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 2022. – 60 с.

References

1. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation-A Review / Z. Raji et al // *Waste*. – 2023. – № 1. – R. 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>. (In English).
2. Senila M. Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives / M. Senila, O. Cadar // *Heliyon*. – 2024. – № 10(3). – R. e25303. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303>. (In English).
3. Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment / Sh. Xiea et al // *Green and Smart Mining Engineering*. – 2024. – № 1(3). – R. 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.07.002>. (In English).
4. Ugwu E.I. A review on zeolites as cost-effective adsorbents for removal of heavy metals from aqueous environment / E.I. Ugwu, A. Othmani, C.C. Nnaji // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2022. – № 19. – R. 8061-8084. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03560-3>. (In English).
5. Rodríguez-Iznaga I. Ion Exchange in Natural Clinoptilolite: Aspects Related to Its Structure and Applications / I. Rodríguez-Iznaga, M.G. Shelyapina, V. Petranovskii // *Minerals*. – 2022. – № 12. – R. 1628. <https://doi.org/10.3390/min12121628>. (In English).
6. Tasić Ž.Z. Application of natural zeolite in wastewater treatment-A review / Ž.Z. Tasić, G.D. Bogdanović, M.M. Antonijević // *Journal of Mining and Metallurgy*. – 2019. – № 55A (1). – R. 67-79. <https://doi.org/10.5937/JMMA1901067T>. (In English).
7. Kordala N. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications / N. Kordala, M. Wyszowski // *Molecules*. – 2024. – № 29. – R. 1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>. (In English).
8. Ates A. The effect of various treatment conditions on natural zeolites: ion exchange, acidic, thermal and steam treatments / A. Ates, C. Hardacre // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2012. – № 372. – R. 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.01.017>. (In English).
9. Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption / E. Kuldeyev et al // *Water*. – 2023. – № 15. – R. 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>. (In English).
10. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: a review / L. Velarde et al // *Chemosphere*. – 2023. – № 328. – R. 138508. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>. (In English).
11. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, and Cd²⁺) adsorption on clinoptilolite / M. Sprynskyy et al // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – № 304(1). – R. 21-28. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2006.07.068>. (In English).
12. Characterization of Zeolite Types Contained in Sangaredi Bauxite in the Republic of Guinea / M. Sylla et al // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2024. – № 12. – R.1-14. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.1211001>. (In English).

13. Taffarel S.R. On the removal of Mn²⁺ ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites / S.R. Taffarel, J. Rubio // Minerals Engineering. – 2009. – № 22(4). – R. 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.007>. (In English).
14. Patent KZ (13) A (11) 14907 51) 7 C01B 39/00 Sposob modifikatsii prirodnykh neorganicheskikh sorbentov / Ergozhin E.E., Akimbaeva A.M., Bektenov N.A., Dzhusipbekov U.ZH., Kappar B.K., Gabdulina YU.R., Bazilbaev S.M., Sadvokasova A.B., opubl. 15.10.2004. (In Russian).
15. Yerbolov S. Waste Water Purification from Metal Ions by Ultra-Dispersed Natural Sorbents / S. Yerbolov, G. Daumova // Journal of Ecological Engineering. – 2022. – № 23(1). – R. 43-50. <https://doi.org/10.12911/22998993/143867>. (In English).
16. RD Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi, pod red. A.D. Semenova. L., Gidrometeoizdat, 1977 – 345 s. (In Russian).
17. Khumarbekuly E. Issledovanie sorbtsii ionov tyazhelykh metallov sorbentami na osnove modifitsirovannykh prirodnykh tseolitov iz promyshlennykh stochnykh vod // mag. dissertatsiya, Kazakhskii Natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet imeni K.I. Satpaeva, 2022. – 60 s. (In Russian).

Р.А. Аубакирова¹, Н.В. Серая², Г.К. Даумова^{2*}, Ш.К. Саньязова¹

¹Восточно-Казахстанский университет имени С.Аманжолова,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 55

²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19

*e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ЦЕОЛИТА ТАЙЖУЗГЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В работе исследуется очистка сточных вод металлургического предприятия УК МК ТОО «Казцинк» от ионов металлов, таких как медь (II), цинк и свинец (II). Обоснована возможность очистки сточных вод от ионов металлов с помощью механоактивированного природного цеолита Тайжузгенского месторождения (Восточный Казахстан). Изучена адсорбционная способность цеолита в зависимости от его фракционного состава. Показан эффективный метод модификации сорбентов - механическая активация. По результатам экспериментальных исследований установлено, что полученный механоактивированный сорбент на основе природного цеолита является перспективным для глубокой очистки многокомпонентных сточных вод металлургических предприятий. Установлено, что сорбционная активность цеолита напрямую зависит от степени механоактивации сорбента. Наибольшая степень очистки промышленных сточных вод от ионов Cu²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺ (53,85%, 88,52% и 92,11% соответственно) достигается при 3 часовом контакте механоактивированного сорбента (оптимальной крупностью 50-100 мкм) со сточной водой и соотношении (1-2) з:100 см³. Впервые построены изотермы адсорбции ионов меди (II), цинка и свинца (II) на механоактивированном цеолите Тайжузгенского месторождения в соответствии с моделями Ленгмюра и Фрейндлиха.

Ключевые слова: сточные воды, ионы металлов, сорбция, цеолит, механоактивация, изотерма.

R.A. Aubakirova¹, N.V. Seraya², G.K. Daumova^{2*}, Sh.K. Sanyazova¹

¹S. East Kazakhstan University named after Amanzholova,
070010, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan street, 55

²D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, 1
070010, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 9 D. Serikbaev Street

*e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru

INVESTIGATION OF SORPTION PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED ZEOLITE FROM THE TAIZHUZGEN DEPOSIT

The paper investigates the treatment of wastewater of metallurgical enterprise MC MC 'Kazzinc' LLP from metal ions such as copper (II), zinc and lead (II). The possibility of wastewater treatment from metal ions with the help of mechanically activated natural zeolite of Taizhuzgen deposit (East Kazakhstan) has been substantiated. Adsorption ability of zeolite depending on its fractional composition has been studied. The effective method of sorbents modification – mechanical activation – is shown. By results of experimental researches it is established that the received mechanically activated sorbent on the basis of natural zeolite is

perspective for deep treatment of multicomponent waste waters of metallurgical enterprises. It was found that the sorption activity of zeolite directly depends on the degree of mechanically activated sorbent. The highest degree of industrial wastewater purification from Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} ions (53.85%, 88.52% and 92.11%, respectively) is achieved at 3-hour contact of mechanically activated sorbent (optimal size 50-100 microns) with wastewater and the ratio (1-2) g:100 cm³. The adsorption isotherms of copper (II), zinc and lead (II) ions on mechanically activated zeolite of the Tayzhuzgen deposit were constructed for the first time in accordance with the Langmuir and Freundlich models.

Key words: wastewater, metal ions, sorption, zeolite, mechanical activation, isotherm.

Сведения об авторах

Роза Аблакимовна Аубакирова – кандидат химических наук, профессор кафедры «Химия», Восточно-Казахстанский университета имени С. Аманжолова, Республика Казахстан; e-mail: roza.aubakirova@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9403-1104>.

Наталья Владимировна Серая – кандидат химических наук, профессор международной Школы инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет им.Д.Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: nseraya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>.

Гульжан Камалбеккызы Даумова* – кандидат технических наук, профессор Школы Наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>.

Шынар Кадылбековна Саньязова – магистр педагогических наук, Сениор лектор кафедры «Химия», Восточно-Казахстанский университета имени С. Аманжолова, Республика Казахстан; e-mail: shynarsanyazova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0741-9268>.

Авторлар туралы мәліметтер

Роза Аблакимовна Аубакирова – химия ғылымдарының кандидаты, «Химия» кафедрасының профессоры, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: roza.aubakirova@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9403>.

Наталья Владимировна Серая – химия ғылымдарының кандидаты, халықаралық инженерия Мектебінің профессоры, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nseraya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>.

Гульжан Камалбеккызы Даумова* – техника ғылымдарының кандидаты, Жер туралы ғылымдар мектебінің профессоры, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>.

Шынар Кадылбековна Саньязова – педагогика ғылымдарының магистрі, «Химия» кафедрасының сениор лекторы, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynarsanyazova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0741-9268>.

Information about the authors

Roza Ablakimovna Aubakirova – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: roza.aubakirova@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9403>.

Natalya Vladimirovna Seraya – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nseraya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>.

Gulzhan Kamalbekkyzy Daumova* – Candidate of Technical Sciences, Professor of the School of Earth Sciences, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>.

Shynar Kadylbekovna Sanyazova – Master of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Chemistry, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynarsanyazova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0741-9268>.

Редакцияға енуі 01.04.2025

Өңдеуден кейін түсуі 03.06.2025

Жариялауға қабылданды 05.08.2025