

Авторлар туралы мәліметтер:

Шыңғысхан Темірханұлы Султахан* – Ғылыми қызметкер, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Әлишер Әбдісаттар – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты; Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Тажу Қайрат – Ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Алина Коробейник – доцент, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, 8000 Aarhus C, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Сейтхан Азат – Профессор, Инженерлі бейімді зертхана жетекшісі, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Информация об авторах:

Шыңғысхан Темирханұлы Султахан* – научный сотрудник, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Алишер Абдисаттар – аспирант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»; Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Тажу Кайрат – научный сотрудник, Институт проблем горения, ул. Богенбая Батыра, 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Алина Коробейник – доцент, Орхусский институт перспективных исследований, Орхусский университет, Дания; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Сейхан Азат – профессор, заведующий инженерной лабораторией, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Information about the authors

Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan* – Researcher, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Alisher Abdisattar – Doctoral student of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics», Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Tazhu Kairat – Researcher, Institute of Combustion Problems; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Alina Korobeinyk – Associate Professor, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Setkhan Azat – Professor, Head of the Engineering Laboratory, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Редакцияға енуі 05.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 04.02.2026

Жариялауға қабылданды 05.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-74](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-74)

FTAXP: 62.01.94



А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова*

М. Өуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан 5

*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

БАКТЕРИЯЛЫҚ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ЖӘНЕ БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ КЕШЕНДІ ҚҰРАМДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ АҒЫНДЫ СУЛАРДЫ ТАЗАЛАУ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Мақалада бактериялы-химиялық жолмен алынған үш валентті темір мен бентониттің ағынды судағы оттегінің химиялық қажеттілігіне (ОХҚ) әсерін зерттеу нәтижелері көрсетілген. Қазіргі таңда құрамында жуғыш заттары бар ағынды суларды тазартудың түрлі әдістері қолданылады. Солардың бірі – суды адсорбция әдісі арқылы өңдеу, оның ішінде көмір

©А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова, 2026

материалдарын адсорбент ретінде пайдалану кең тараған. Әдетте ағынды суларды коагуляция әдісімен тазарту барысында алюминий сульфаты мен темір тұздары сияқты коагулянттардың тиімділігі қарастырылады. Бұл реагенттер коллоидты және ұсақ дисперсті бөлшектерді ірі үлпектерге біріктіріп, судың мөлдірлігін арттырады және ластағыштардың шөгіндіге түсуін қамтамасыз етеді. Зерттеу жұмысының мақсаты – құрамында жуғыш заттары бар ағынды сулардың ОХҚ мөлшерін азайту үшін биокоагулянт пен бентонитті пайдалануды зерттеу. Зерттеу әдістері – бактерияларды оқшаулау және лақылдандыру шекті сұйылту әдісімен жүргізілді, судың химиялық оттегінің қажеттілігі MEMCT талаптарына сай жасалды, математикалық модельдеу жасанды интеллект арқылы құрастырылды, статистикалық өңдеу Microsoft Excel статистикалық бағдарламалық пакетін қолдану арқылы жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде *Acidithiobacillus ferrooxidans* BIT1 бактерияларының тіршілік ерекетінен алынған үш валентті темірді пайдалану мүмкіндігі орнатылды. 1,75 г/л концентрациядағы бактериалды-химиялық жолмен алынған үш валентті темір мен 600 мг/л бентонитті бірлесіп қолдану нәтижесінде ағынды сулардың оттегінің химиялық қажеттілігі (ОХҚ) көрсеткішінің төмендеу дәрежесі $88,1 \pm 7,9\%$ құрады. Мұндай жоғары тиімділік Fe^{3+} иондарының коллоидты және органикалық ластағыштармен ерекеттесіп, ірі үлпектер түзу қабілетімен, ал бентониттің адсорбциялық және коагуляциялық қасиеттерімен түсіндіріледі.

Түйін сөздер: коагуляция, ағынды су, тионды бактериялар, бентонит, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Кіріспе

Қазақстан Республикасында соңғы жылдары өнеркәсіптік мақсатта қолданылатын жуғыш және тазартқыш заттардың түрлері мен көлемі айтарлықтай артты. Нәтижесінде құрамында әртүрлі органикалық және беттік-белсенді заттары (ББЗ) бар ағынды сулардың мөлшері ұлғайып, олардың қоршаған ортаға тигізетін әсері күшейіп отыр [1].

Синтетикалық беттік-белсенді заттар – химиялық құрылымы мен табиғаты әртүрлі, бірнеше кластарға жататын органикалық қосылыстар тобы. Бұл қосылыстардың негізгі ерекшелігі – олардың фазалар шекарасында адсорбцияланып, жүйенің беттік керілуін төмендету қабілетінде. Аталған қасиет судың физика-химиялық сипаттамасын өзгертеді және көбік түзу, эмульсия түзу процестерін жеңілдетеді [2]. Дегенмен, синтетикалық ББЗ-дың көпшілігі биологиялық тұрғыдан баяу ыдырайды және табиғи суларда ұзақ уақыт сақталып, экожүйелердің тепе-теңдігіне теріс әсер етеді. Мысалы, алкилбензолсульфонаттар (АБС) өзен мен көлдердің бетінде тұрақты көбік түзіп, оттегінің диффузиясын төмендетеді және гидробионттардың тіршілігін тежейді [3]. 2024 жылы жүргізілген зерттеулерге сәйкес, Қазақстандағы өнеркәсіптік ағынды сулардың 18-22%-ы ББЗ қалдықтарымен ластанған, ал тұрмыстық сарқынды сулардың құрамында аниондық ББЗ мөлшері орта есеппен 3-6 мг/л деңгейінде тіркелген [4].

Қазіргі таңда құрамында жуғыш заттары бар ағынды суларды тазартудың түрлі әдістері қолданылады. Солардың бірі – суды адсорбция әдісі арқылы өңдеу, оның ішінде көмір материалдарын адсорбент ретінде пайдалану кең тараған [5]. Бұл әдісте қолданылатын адсорбенттерге бірқатар негізгі талаптар қойылады: жоғары сорбциялық сыйымдылық, механикалық беріктік, арзандылығы және регенерацияға бейімділігі [6].

Сондай-ақ ағынды суларды ауыр металл иондарынан, мұнай өнімдерінен және басқа да органикалық ластағыштардан тазарту процесінде сазды материалдар ерекше маңызға ие. Олар табиғи шығу тегімен, кең таралуымен және жоғары адсорбциялық қасиеттерімен ерекшеленеді [7].

Ағынды суларды коагуляция әдісімен тазарту – коллоидты және ұсақ дисперсті бөлшектерді біріктіріп, тұндыру арқылы судың мөлдірлігін арттыратын ең тиімді физика-химиялық әдістердің бірі. Бұл үдеріс кезінде ластағыш бөлшектер коагулянттар әсерінен тұрақсызданып, үлпек түрінде шөгіндіге түседі. Тәжірибеде коагуляцияны жүзеге асыру үшін көбінесе алюминий сульфаты ($Al_2(SO_4)_3$) немесе темір тұздары ($FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$) сияқты минералды реагенттер қолданылады [8]. Зерттеулерде $FeCl_3$ коагулянтын әкпен ($Ca(OH)_2$) бірге қолдану арқылы ағынды судың ОХҚ төмендеу тиімділігі 94,2% құрағаны анықталды, ал $FeCl_3$ пен полиакриламид (ПАА) комбинациясы кезінде бұл көрсеткіш 70% шамасында болған [9]. Мұндай айырмашылық коагулянттардың табиғаты мен реагенттердің өзара әсерлесу механизміне байланысты. Fe^{3+} иондары органикалық қосылыстарды тотығуға бейім орта түзе отырып, судың құрамындағы коллоидты бөлшектердің агрегациясын күшейтеді, ал полиакриламид үлпек түзу процесін жылдамдатады [10].

Зерттеу жұмысының мақсаты – құрамында жуғыш заттары бар ағынды сулардың ОХҚ мөлшерін азайту үшін биокоагулянт пен бентонитті пайдалануды зерттеу.

Зерттеу нысаны мен әдістері

Зерттеу нысаны – Шымкент қаласында орналасқан «Petro Kazakhstan Oil Products» ЖШС мұнай өңдеу зауытының ағынды суы болып табылады. Жуғыш синтетикалық лаптағыштар ағынды суға қондырғылар мен қазандықтарды түрлі жуғыш заттармен шаю нәтижесінде келіп түседі.

Бентонит үлгілері Түркістан облысы, Сарыағаш ауданы аумағында орналасқан Дарбаза стратоморфты кен орнынан алынған. Бұл сазды жыныс құрамында шамамен 70%-дан астам монтмориллонит бар минералдық материал болып табылады. Оның негізгі минералы – галенит, ол негізгі тау жыныстарында жұқа қабатты аралас құрылым түзе отырып кездеседі. Дарбаза стратоморфты кен орнының құрамындағы негізгі металл – қорғасын, оның орташа мөлшері шамамен 2,39% құрайды. Қоспа элементтер ретінде күміс пен алтынның іздік мөлшерлері анықталған. Сонымен қатар, кеннің минералдық құрамында барит (1-6,7%) және марганец (0,2-0,6%) бар екені байқалады. Бұл кен орнынан алынған бентониттер судың қатысуында тығыз гель түзуге және көлемдік шектеу (ісіну) қасиетіне ие. Олардың рН көрсеткіші 6-9,5 аралығында өзгеріп отырады, ал құрамындағы натрий карбонатының мөлшері 2%-дан төмен. Мұндай физика-химиялық қасиеттер Дарбаза бентониттерін сорбент және биокоагулянттық материал ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

A.ferrooxidans BIT 1 штамы – Түркістан облысының фосфоры бар қалдықтарынан бөлініп алынған. Таяқша тәрізді, кейде жұптасып, көбінесе жалғыз орналасқан тионды бактериялар. Бөліну арқылы көбейеді, спора түзбейді. Қолайлы жағдайда екі валентті темірді үш валентті темірге дейін тотықтыра алады [11].

Судың ОХҚ мөлшері MEMCT 31859-2012 Су. Судағы ОХҚ көрсеткішін анықтау әдістеріне сай жүргізілді, ал рН ортасы WTW Multiparameter 340 (Экоинструмент, РФ) жүргізілді. Тион бактерияларын оқшаулау және дақылдандыру MEMCT 26670-91 бойынша шекті сұйылту әдісімен жүргізілді. Тион бактерияларының штамы *A.ferrooxidans* BIT 1 Сильверман-Люндгрэн 9К сұйық қоректік ортада дақылдандырылды, қоректік ортаның құрамы келесідей г/л: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -2,0; K_2HPO_4 -1,0; MgSO_4 -0,5; NaCl -0,2; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 44,2; H_2O -1л; өсіру (30-35)°C температурасында үздіксіз аэрациялау арқылы жүзеге асырылды.

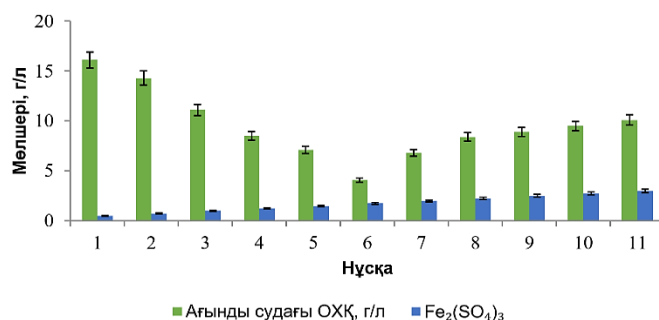
Математикалық модель құрастыруға жасанды интеллект (ЖИ, ChatGPT) пайдаланылды. Зерттеу нәтижелерінің сенімділігін арттыру мақсатында тәжірибелер әрбір жағдайда кемінде үш рет қайталанып жүргізілді. Алынған мәліметтер бойынша стандартты ауытқу $0,85 < P < 0,91$ сенімділік деңгейінде есептелді. Статистикалық деректерді өңдеу Microsoft Excel бағдарламасының статистикалық талдау пакеті арқылы Pentium-IV дербес компьютерінде орындалды.

Зерттеу нәтижелері мен талқылаулар

Ағынды суларды талдау нәтижелері бойынша ОХҚ $24,1 \pm 2,2$ г/л, ал ОБҚ₅ $2,9 \pm 0,2$ г/л мәндерін көрсетті. Зертханалық зерттеулер нәтижесінде коагуляциялық тазарту процесінде дәстүрлі түрде қолданылатын FeCl_3 орнына құрамында $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ бар *A.ferrooxidans* бактериялық суспензиясын қолдану тиімділігі мен мүмкіндігі анықталды.

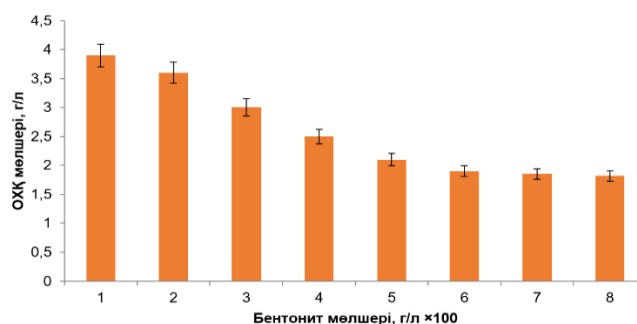
Тиімді рН мәнін анықтау және ОХҚ мен ОБҚ көрсеткіштерін барынша төмендету мақсатында $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ концентрациясы $1,5 \pm 0,1$ г/л деңгейінде тұрақтандырылды. Өртүрлі рН мәндерінің ОХҚ-ға әсері зерттеліп, олардың арасында кері корреляциялық тәуелділік байқалды. рН көрсеткіші 3-тен 11-ге дейін артқан жағдайда ОХҚ-ның жойылу тиімділігі 65,8%-дан 42,9%-ға дейін төмендейтіні анықталды. Бұл ретте тазарту процесінен кейінгі ағынды сулардағы ОХҚ концентрациясы $10,3 \pm 1,0$ г/л шамасында болды. ОХҚ $16,1 \pm 1,5$ г/л мәнінен $4,1 \pm 0,4$ г/л көрсеткішіне дейін төмендету үшін $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ тиімді мөлшері 1,75 г/л болатыны анықталды, яғни ағынды сулардағы ОХҚ жою дәрежесі $74,5 \pm 0,7\%$ құрайды (сурет 1).

ОХҚ көрсеткішін одан әрі төмендету үшін ағынды суларды тазалауда қосымша физикалық-химиялық үрдістерді қолдану тиімді болып табылады. Мұндай жағдайда табиғи сазды минералдар, соның ішінде бентонит, ерекше мәнге ие. Бентониттің құрамындағы монтмориллонит минералы жоғары катионалмасу қабілетіне және кеңейтілген меншікті беткей ауданына ие болғандықтан, коагуляция процесінде түзілетін ұсақ дисперсті бөлшектерді ірі әрі тығыз үлпектерге біріктіреді.



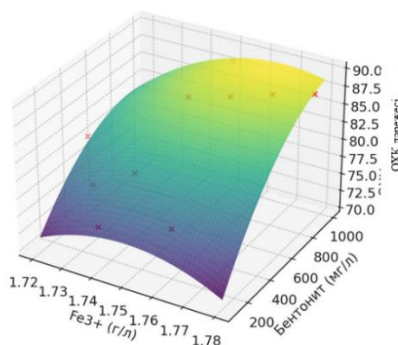
Сурет 1 – Fe₂(SO₄)₃ мөлшерінің ОХҚ дәрежесінің төмендеуіне ықпалы

Зерттеу нәтижелері бойынша, бентониттің концентрациясы ағынды сулардың оттегінің химиялық қажеттілігіне (ОХҚ) айтарлықтай әсер ететіні анықталды. 100 мг/л бентонит қосылған жағдайда, ОХҚ көрсеткіші 4,1±0,4 г/л-ден 3,9±0,3 г/л деңгейіне дейін төмендеді, яғни тазарту тиімділігі шамамен 5%-ды құрады. Ал бентонит мөлшері 600 мг/л дейін арттырылған кезде, ОХҚ көрсеткіші 1,9±0,1 г/л шамасына дейін төмендеп, бастапқы мәнмен салыстырғанда 88,1±7,9% төмендеу байқалды. Бұл нәтиже бентониттің жоғары адсорбциялық белсенділігін және коагуляциялық процестегі қосымша құрылымдандырушы рөлін айқын көрсетеді (сурет 2).



Сурет 2 – Бентонит мөлшерінің ОХҚ көрсеткішіне әсері

Математикалық талдау және тәуелділіктерді визуализациялау мақсатында үш өлшемді графиктерді құру үшін Statistica бағдарламалық кешені қолданылды. Алдымен эксперименттік нәтижелер негізінде бастапқы деректер өңделіп, статистикалық есептеулер жүргізілді және тиісті параметрлер кесте түрінде жүйеленді. Бағдарлама көмегімен алынған мәліметтер тұрақты және айнымалы факторлардың өзара әсерін ескере отырып, үш өлшемді кеңістікте бейнеленді (сурет 3). Мұндай тәсіл Fe₂(SO₄)₃ және бентонит концентрацияларының ағынды сулардағы ОХҚ көрсеткішіне ықпал ету заңдылықтарын көрнекі түрде бағалауға мүмкіндік берді.



Сурет 3 – Fe³⁺ мен бентониттің судағы ОХҚ мөлшеріне әсерінің математикалық моделі

Зерттеу нәтижесінде *A. ferrooxidans* BIT 1 бактерияларының тіршілік әрекетінен алынған Fe³⁺ пайдалану мүмкіндігі орнатылды. 1,75 г/л концентрациядағы бактериялық химиялық жолмен алынған Fe³⁺ мен 600 мг/л бентонитті бірлесіп қолдану нәтижесінде ағынды судың ОХҚ көрсеткішінің төмендеу дәрежесі 88,1±7,9% құрады. Мұндай жоғары тиімділік Fe³⁺ иондарының коллоидты және органикалық ластағыштармен әрекеттесіп, ірі үлпектер тұзу қабілетімен, ал бентониттің адсорбциялық және коагуляциялық қасиеттерімен түсіндіріледі.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері құрамында жуғыш заттары бар өндірістік ағынды суларды тазарту тиімділігін арттыру мақсатында бактериалды-химиялық жолмен алынған Fe^{3+} және табиғи бентонитті қолданудың жоғары әлеуетін дәлелдеді. Шымкент қаласындағы «Petro Kazakhstan Oil Products» ЖШС-нің ағынды суларына жүргізілген талдау олардың жоғары ластану дәрежесін көрсетті (ОХҚ – $24,1 \pm 2,2$ г/л, ОБҚ₅ – $2,9 \pm 0,2$ г/л). Дәстүрлі коагулянт FeCl_3 орнына *A. ferrooxidans* ВІТ 1 тионды бактериялары негізінде алынған $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ерітіндісін қолдану арқылы коагуляциялық тазарту процесінің тиімділігі зерттелді. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ концентрациясы 1,5-1,75 г/л диапазонында ұсталған жағдайда және рН мәні 3-тен 11-ге дейін өзгертілгенде, ОХҚ жою дәрежесі 65,8-42,9% аралығында болды. Ал $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ мөлшері 1,75 г/л болғанда ОХҚ $74,5 \pm 0,7\%$ дейін төмендеді. Қосымша адсорбент ретінде бентонитті енгізу коагуляциялық процестің тиімділігін едәуір арттырды. Бентонит мөлшері 600 мг/л болғанда ОХҚ төмендеу дәрежесі $88,1 \pm 7,9\%$ жетті, бұл синтетикалық жуғыш заттармен ластанған ағынды суларды кешенді биокоагуляциялық әдіспен тазарту тиімді екенін дәлелдейді.

Осылайша, *A. ferrooxidans* бактериялары арқылы алынған үш валентті темір мен бентонитті бірлесіп пайдалану – экологиялық қауіпсіз, экономикалық тұрғыдан тиімді және өндірістік жағдайда оңай қолдануға болатын технологиялық шешім болып табылады. Бұл әдіс құрамында органикалық ластағыштары бар ағынды суларды биокоагуляциялық жолмен тазартудың жаңа бағытын ұсынады.

Әдебиеттер тізімі

1. Advancing on the promises of techno-ecological nature-based solutions: A framework for green technology in water supply and treatment / E.A.J. Blackburn et al // Blue-Green Systems. – 2021. – № 3(1). – P. 81-94. <https://doi.org/10.2166/bgs.2021.008>.
2. Mohseni-Bandpi A. Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review / A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott, M.A. Zazouli // Journal of environmental health science & engineering. – 2013. – № 11(1). – P. 35. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-35>.
3. Self-heating of dried industrial tannery wastewater sludge induced by pyrophoric iron sulfides formation / R. Bertani et al // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – № 305. – P. 105-114.
4. Шамханов М.Ч. Адсорбенты на основе природного бентонита / М.Ч. Шамханов // Вестник магистратуры. – 2021. – № 5-5(116). – С. 34-37.
5. Садикова Н.К. Кинетические характеристики очистки сточных вод от нефтепродуктов / Н.К. Садикова, М.Р. Амонов // Universum: технические науки. – 2024. – vol. 6, № 10(127). – P. 50-53.
6. Сатаева С.С. Применение сорбентов, приготовленных на основе растительного сырья, для очистки загрязненных вод / С.С. Сатаева, М.Е. Сидралиев, Ф.Ж. Ахметова // Yessenov science journal. – 2024. – vol. 47, № 2. – P. 15-26. <https://doi.org/10.56525/MTZD8751>.
7. Baciocchi R. Activated carbons application to remove nonionic surfactants from wastewater produced by an Italian metallurgic plant / R. Baciocchi, F. Lombardi, R. Torella // J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. – 2004. – № 39(4). – P. 1095-106. <https://doi.org/10.1081/ese-120028416>. PMID: 15137722.
8. Comparative Evaluation of Aluminum Sulfate and Ferric Sulfate-Induced Coagulations as Pretreatment of Microfiltration for Treatment of Surface Water / Y. Song et al // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – № 12(6). – P. 6700-6709. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606700>.
9. Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review / M.S. Lucas et al // Water. – 2025. – № 17(13). – P. 1934. <https://doi.org/10.3390/w17131934>.
10. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate / R. Gandhimathi et al // J Environ Health Sci Engineer. – 2013. – № 10, 24. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-24>.
11. Сыздыкова М.Н. Ағынды суды тазалауда пайдаланылатын *Acidithiobacillus ferrooxidans* Ach 1 бактериялық штамының темірді биохимиялық тотықтыру жылдамдығын зерттеу / М.Н. Сыздыкова, А.У. Исаева // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 1(17). – С.398-403. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-49](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-49).

References

1. Advancing on the promises of techno-ecological nature-based solutions: A framework for green technology in water supply and treatment / E.A.J. Blackburn et al // Blue-Green Systems. – 2021. – № 3(1). – R. 81-94. <https://doi.org/10.2166/bgs.2021.008>. (In English).
2. Mohseni-Bandpi A. Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review / A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott, M.A. Zazouli // Journal of environmental health science & engineering. – 2013. – № 11(1). – R. 35. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-35>. (In English).
3. Self-heating of dried industrial tannery wastewater sludge induced by pyrophoric iron sulfides formation / R. Bertani et al // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – № 305. – R. 105-114. (In English).
4. Shamkhanov M.CH. Adsorbenty na osnove prirodnogo bentonita / M.CH. Shamkhanov // Vestnik magistratury. – 2021. – № 5-5(116). – S. 34-37. (In Russian).
5. Sadikova N.K. Kineticheskie kharakteristiki ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov / N.K. Sadikova, M.R. Amonov // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – vol. 6, № 10(127). – R. 50-53. (In Russian).
6. Sataeva S.S. Primenenie sorbentov, prigotovlennykh na osnove rastitel'nogo syr'ya, dlya ochistki zagryaznennykh vod / S.S. Sataeva, M.E. Sidagaliev, F.ZH. Akhmetova // Yessenov science journal. – 2024. – vol. 47, № 2. – R. 15-26. <https://doi.org/10.56525/MTZD8751>. (In Russian).
7. Baciocchi R. Activated carbons application to remove nonionic surfactants from wastewater produced by an Italian metallurgic plant / R. Baciocchi, F. Lombardi, R. Torella // J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. – 2004. – № 39(4). – R. 1095-106. <https://doi.org/10.1081/ese-120028416>. PMID: 15137722. (In English).
8. Comparative Evaluation of Aluminum Sulfate and Ferric Sulfate-Induced Coagulations as Pretreatment of Microfiltration for Treatment of Surface Water / Y. Song et al // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – № 12(6). – R. 6700-6709. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606700>. (In English).
9. Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review / M.S. Lucas et al // Water. – 2025. – № 17(13). – R. 1934. <https://doi.org/10.3390/w17131934>. (In English).
10. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate / R. Gandhimathi et al // J Environ Health Sci Engineer. – 2013. – № 10, 24. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-24>. (In English).
11. Syzdykova M.N. Afyndy sudy tazalauda paidalanylatyn Acidithiobacillus ferrooxidans Ach 1 bakteriyalyq shtamynyñ temirdi biokhimiyaq totyqtyru zhyldamdyryn zertteu / M.N. Syzdykova, A.U. Isaeva // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1(17). – S.398-403. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-49](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-49). (In Russian).

А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова*

М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан 5
*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО $Fe_2(SO_4)_3$ И БЕНТОНИТА

В статье представлены результаты исследования влияния трёхвалентного железа, полученного бактериально-химическим способом, и бентонита на показатель химического потребления кислорода (ХПК) сточных вод. В настоящее время для очистки сточных вод, содержащих моющие средства, применяются различные методы. Одним из наиболее распространённых является метод адсорбции, в частности использование углеродных материалов в качестве адсорбентов. Очистка сточных вод методом коагуляции осуществляется с применением таких коагулянтов, как сульфат алюминия или соли железа. Цель исследования – снижение показателя химического потребления кислорода (ХПК) сточных вод, содержащих моющие вещества, путём использования трёхвалентного железа, полученного бактериально-химическим методом с применением бентонита. Методы исследования включали выделение и культивирование бактерий методом предельных разведений, определение ХПК в соответствии с требованиями ГОСТ, математическое моделирование с использованием искусственного интеллекта, а также статистическую обработку данных на ПК «Pentium-IV» с применением пакета статистических программ Microsoft Excel. В результате исследований установлена возможность применения

$Fe_2(SO_4)_3$, полученного бактериально-химическим путём с участием тионных бактерий *A. ferrooxidans* BIT 1. При совместном использовании бактериально-химического трёхвалентного железа в концентрации 1,75 г/л и бентонита 600 мг/л степень снижения ХПК сточных вод достигает 88,1±7,9%. При добавлении $Fe_2(SO_4)_3$ в количестве 1,75 г/л и бентонита 100 мг/л снижение ХПК составило 75,7%.

Ключевые слова: коагуляция, сточная вода, тионовые бактерии, бентонит, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

A.M. Kozhakhmetova, M.N. Syzdykova*

M. Auezov South Kazakhstan University,
160021, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke khan 5

*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

STUDY OF THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT USING A COMPLEX COMPOSITION BASED ON BACTERIAL $Fe_2(SO_4)_3$ AND BENTONITE

The article presents the results of a study on the effect of trivalent iron obtained by a bacterial-chemical method and bentonite on the chemical oxygen demand (COD) of wastewater. Currently, various methods are used to treat wastewater containing detergents. One of the most common is the adsorption method, particularly using carbon-based materials as adsorbents. Wastewater treatment by coagulation is also widely applied, using coagulants such as aluminum sulfate or iron salts. The aim of the study was to reduce the chemical oxygen demand (COD) of wastewater containing detergents by applying trivalent iron obtained through a bacterial-chemical process using bentonite. The research methods included bacterial isolation and cultivation by the serial dilution method, COD determination according to GOST standards, mathematical modeling using artificial intelligence, and statistical data processing on a Pentium-IV PC using the Microsoft Excel statistical software package. As a result of the study, the possibility of using $Fe_2(SO_4)_3$ obtained by a bacterial-chemical method with *A. ferrooxidans* BIT 1 sulfur-oxidizing bacteria was established. Under conditions of combined use of bacterial-chemical trivalent iron (1.75 g/L) and bentonite (600 mg/L), the maximum COD reduction of wastewater reached 88.1±7.9%. When $Fe_2(SO_4)_3$ was applied at 1.75 g/L and bentonite at 100 mg/L, the COD reduction degree was 75.7%.

Key words: coagulation, wastewater, thion bacteria, bentonite, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Авторлар туралы мәліметтер

Айдана Маратовна Қожахметова – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Экология» кафедрасының аға оқытушысы, М.Әуезов атындағы ОҚУ.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Экология» кафедрасының докторанты, М. Әуезов атындағы ОҚУ; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9603-9748>.

Сведения об авторах

Айдана Маратовна Кожухметова – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Экология», Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – Южно-Казахстанский Университет им. М.Ауэзова, Казахстан, Шымкент, докторант кафедры «Экология»; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9603-9748>.

Information about the authors

Aidana Maratovna Kozhakhmetova – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer at the Department of Ecology, M. Auezov South Kazakhstan University.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; master of Natural Sciences, Doctoral student of the Department of Ecology; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9603-9748>.

Редакцияға енуі 29.10.2025

Өңдеуден кейін түсуі 23.12.2025

Жариялауға қабылданды 24.12.2025