







DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_82

FTAXP 53.03.13

УРАН ӨНДІРУШІ КӘСІПОРЫНДАРДЫҢ ИОНИТТЕРІНІҢ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН КРЕМНИЙСІЗДЕНДІРУ АРҚЫЛЫ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ МҮМКІНДІГІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ДЕГРАДАЦИЯСЫН ТАЛДАУ

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИОНИТОВ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБЕСКРЕМНИВАНИЕМ И АНАЛИЗ ИХ ДЕГРАДАЦИИ

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF RESTORING THE SORPTION PROPERTIES OF ION EXCHANGERS AT URANIUM MINING ENTERPRISES BY DESILICATION AND ANALYSIS OF THEIR DEGRADATION

М.К. Кылышканов ¹, Ж.С. Кенжетаев ^{1*}, М.П. Копбаева ¹,
С.Н. Айтекеева ¹, А.Қ. Өмірғали ¹

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Кенжетаев Жигер Смадиевич, e-mail: kzhiger@yahoo.com

Түйінді сөздер:

ион алмасу шайырлары;
күшті негізді аниониттер;
кремний; деградация;
алкидену; сорбенттерді
қалпына келтіру; Хофман
реакциясы; ИҚ-Фурье
спектроскопиясы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыстың мақсаты – өндірістік циклде болған иониттерден кремнийді кетіру мүмкіндігін зерттеу, кремнийсіздену үшін сілтілі ерітінділердің оңтайлы концентрациясын анықтау және уранды алудың күкірт қышқылды схемаларында қолданылатын иониттердің (шайырлардың) деградациясын кейіннен талдау. Жұмыстың өзектілігі Қазақстанда уран иондарын ион алмасу шайырымен селективті сорбциялау процесі уран алудың негізгі әдісі ретінде кеңінен қолданылатындығына байланысты. Күкірт қышқылымен шаймалау кезінде ураннан басқа, кремний қышқылы сияқты технологиялық процестердің жүруіне теріс әсер ететін тау жыныстарының бірқатар басқа элементтері өнімді ерітіндіге өтеді. Кремний қышқылының ерітіндіге ауысуы және оны сорбциялық процеске тарту аниониттерде кремнийдің біртіндеп жиналуына әкеледі, оның шекті мөлшері 12-17 % жетеді. Анионитті одан әрі өңдеу кезінде шайырдан алынған кремний жуылмайтындықтан, оның жиналуы шайырдың уран сыйымдылығының төмендеуіне және шайырдың механикалық беріктігінің жоғалуына әкеледі. Осыған байланысты өнімді ерітінділерді өңдеу процестерінде кремнийдің теріс әсерін төмендетудің тиімді әдісі мәселесі зерттеу үшін маңызды және қажет болып көрінеді. Бұл мақалада сілтілі ерітінділердің әртүрлі концентрациясын қолдана отырып, сорбенттердің өнеркәсіптік үлгілерін кремнийден тазарту бойынша эксперименттер, сондай-ақ Cary 660 Agilent спектрометрін қолдана отырып, ИҚ-Фурье спектроскопиясы арқылы кремний қосылыстарынан тазартуға дейінгі және кейінгі сорбенттердің үлгілерін салыстырмалы талдау қарастырылады. Уран бойынша ион алмасу



шайырларының сыйымдылығын қалпына келтіру үшін кремнийсіздендіру әдісін қолданудың орындылығы анықталды. NaOH ерітіндісін қолдана отырып, сорбенттен кремнийді кетіру мүмкіндігі эксперименталды түрде расталды. Жұмыс нәтижелері кремний қосылыстарының қарқынды «өсуі» жағдайында пайдаланылатын ион алмастырғыш шайырлардың сілтілі ерітінділерімен кремнийсіздендіру әдісін қолдану перспективасын көрсетеді.

Ключевые слова:

ионообменные смолы;
сильноосновные
аниониты; кремний;
деградация;
восстановление
ионообменных свойств;
реакция Хофмана;
спектроскопия ИК-Фурье.

АННОТАЦИЯ

Целью настоящей работы является изучение возможности удаления кремния с ионитов, бывших в производственном цикле, определение оптимальной концентрации щелочных растворов для обескремнивания и последующий анализ деградации ионитов (смола), используемых в сернокислотных схемах извлечения урана.

Актуальность работы обусловлена тем, что в Казахстане процесс селективной сорбции ионов урана ионообменной смолой широко применяется в качестве основного метода извлечения урана. При сернокислотном выщелачивании помимо урана в продуктивный раствор переходит ряд других элементов горнорудных пород, оказывающих негативное воздействие на протекание технологических процессов, таких как кремниевая кислота. Переход кремниевой кислоты в раствор и вовлечение ее в сорбционный процесс ведет к постепенному накоплению кремния в анионитах, предельное содержание которого достигает 12-17 %. Поскольку при дальнейшей переработке анионита кремний из смолы не вымывается, его накопление приводит к снижению емкости смолы по урану и потере механической прочности смолы. В связи с этим проблема эффективного способа снижения негативного влияния кремния в процессах переработки продуктивных растворов представляется важной и необходимой для изучения.

В данной статье рассматриваются эксперименты по обескремниванию промышленных образцов сорбентов с применением различных концентраций щелочных растворов, а также проведенный сравнительный анализ образцов сорбентов до и после очистки от соединений кремния методом ИК-Фурье спектроскопии с использованием спектрометра Carry 660 Agilent.

Определена целесообразность применения метода обескремнивания для восстановления емкости ионообменных смол по урану. Экспериментально подтверждена возможность удаления кремния из сорбента с использованием раствора NaOH.

Результаты работы свидетельствуют о перспективности применения метода обескремнивания щелочными растворами ионообменных смол, эксплуатируемых в условиях интенсивного «зарастания» кремниевыми соединениями.

Keywords:

ion exchange resins; strong
base anion exchangers;
silicon; degradation;
restoration of ion exchange
properties; Hoffman
reaction; IR Fourier
spectroscopy.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the possibility of removing silicon from ion exchangers that have been used in the production cycle, to determine the optimal concentration of alkaline solutions for desilication, and to subsequently analyze the degradation of ion exchangers (resins) used in sulfuric acid uranium extraction schemes.

The relevance of this work is due to the fact that in Kazakhstan, the process of selective sorption of uranium ions by ion exchange resin is widely used as the main method of uranium extraction. During sulfuric acid leaching, in addition to uranium, a number of other elements from



rock ores, such as silicic acid, which have a negative impact on technological processes, are transferred into the productive solution. The transfer of silicic acid into the solution and its involvement in the sorption process leads to a gradual accumulation of silicon in anion exchangers, the maximum content of which reaches 12-17%. Since silicon is not washed out of the resin during further processing of the anion exchanger, its accumulation leads to a decrease in the resin's uranium capacity and a loss of mechanical strength. In this regard, the problem of an effective method for reducing the negative impact of silicon in the processing of productive solutions appears to be important and necessary for study.

This article discusses experiments on the desilication of industrial sorbent samples using various concentrations of alkaline solutions, as well as a comparative analysis of sorbent samples before and after purification from silicon compounds using IR Fourier spectroscopy with an Agilent Carry 660 spectrometer.

The feasibility of using the desilication method to restore the capacity of ion exchange resins for uranium has been determined. The possibility of removing silicon from the sorbent using a NaOH solution was experimentally confirmed.

The results of the work indicate the promise of using the desilication method with alkaline solutions for ion exchange resins operated under conditions of intensive "overgrowth" with silicon compounds.

КІРІСПЕ

Уран кендерін күкіртқышқылды жерасты шаймалау кезінде уранмен қатар кенжыныстар құрамындағы басқа да бірқатар элементтер өнімді ерітіндіге өтеді, бұл өз кезегінде өнімді ерітіндінің балластық қоспалармен ластануына әкеледі. Уранды ионалмасу арқылы алу процесінде бұл қоспалар әртүрлі әсер етеді және сорбция кезіндегі әрекет сипатына қарай оларды инертті, депрессиялық және уандыратын деп бөлуге болады. Күкіртқышқылды ортада уандыратын қоспалардың ішіндегі ең маңыздыларының бірі – кремний қышқылы болып табылады немесе (Zdarta, Jesionowski, 2022) сәйкес кремний диоксиді. Өнімді ерітінділердегі кремнийдің пайда болуы сілтілік металдар силикаттары мен уран силикаттарының еруімен байланысты. Силикат тұздары суда еріген кезде гидрolitikалық ыдырауға ұшырап, тиісті кремний қышқылдарын түзеді. Тепе-тең ерітіндіде кремний қышқылдарының мономерлі түрлері болады, олардың басым бөлігі ортокремний қышқылы $\text{Si}(\text{OH})_4$.

Кремний қосылыстарының гидролизі нәтижесінде түзілген кремний қышқылдары бірден поликонденсация реакциясына түседі (Watanabe et. al., 2021). Кремний қышқылдарының поликонденсация жылдамдығы $\text{pH } 2,0 \div 3,0$ аралығында ең аз болады, ал $\text{pH} < 2,0 \div 3,0$ кезінде реакция сутек иондарымен, $\text{pH} > 2,0 \div 3,0$ кезінде гидроксил иондарымен жеделдетіледі.

Ион алмасу шайырларын «шыңдау» механизмі әлі белгісіз, тек осы процестің кейбір заңдылықтары анықталған (Ражаббоев и др., 2021; Аликулов, Каршибоев, Жалилов, 2021; Аликулов и др., 2021, Туробжонов, Абдутаалипова, 2025). Уран сорбциясы кезінде кремнезем монокремний қышқылы түрінде болады және ионит түйіршігіне бейэлектрлит ретінде диффузия арқылы енеді, бірақ аниониттің белсенді ионалмасу топтарын иеленбейді (Zhang et.al., 2024). Ионит түйіршігінің ішінде монокремний қышқылы белгілі бір жағдайда полимерленеді, ал кремнийқышқылды полимерлі қосылыстар үлкен полимер бөлшектерінің өлшеміне байланысты иониттен өздігінен шыға алмайды (Иванова, Василенок и Рузиев, 2018). Анионитте олардың концентрациясы



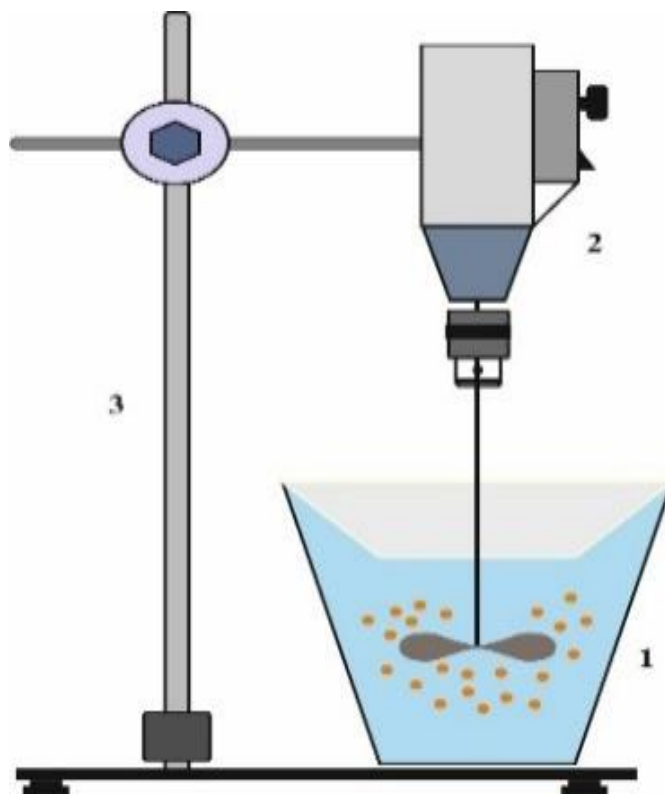
ерігіштіктен асып түсетін жағдай қалыптасады, нәтижесінде түзілетін кремний қышқылының макромолекуласы біртіндеп өсіп, коллоидтық қасиеттері бар полимер бөлшегіне айналады. Ерте сатыда, әсіресе рН төмен болғанда, тізбекті және тармақталған полимерлер түзіледі. Сіңірілген кремний қышқылы анионит фазасында конденсацияға ұшырайды. Бұл — екінші реттік реакция, оның жүруіне анионит фазасында кремний қышқылының жоғары концентрациясы ықпал етеді. Өнімді ерітінділерге кремнийдің өтуі күкірт қышқылының алюмосиликаттармен, хлориттермен, гидрослюдаармен және уран құрамды минерал коффинитпен әрекеттесу реакцияларымен түсіндіріледі.

ЗЕРТТЕУДІ ЖҮРГІЗУ ӘДІСТЕМЕСІ. МАТЕРИАЛДАР. ЖАБДЫҚТАР

Сорбенттің бастапқы үлгілерін алу әдісі, өндірістік циклде пайдаланылған және кремнийсіздендіру операциясынан өткен иониттер. Зерттеу жүргізу үшін уран өндіретін жұмыс істеп тұрған кәсіпорындардан макрокеуекті иониттердің сынамалары алынды.

Бірінші кезеңде статикалық жағдайда сорбенттің кремнийсізденуіне сілті концентрациясының әсерін анықтау бойынша эксперименттер жүргізілді. Кремнийсіздендіру операциясын жүргізу үшін 1-суретте көрсетілген зертханалық қондырғы қолданылды. Бұл қондырғы араластыру режимінде тәжірибелік жұмыстар жүргізуге арналған стандартты жабдық болып табылады.

Эксперименттер 250 см³ ионит өлшемінде жүргізілді, сұйық пен қаттының қатынасы «С:Қ = 3,0» құрайды. Сілті ерітінділері келесі натрий сілтісі (NaOH) концентрацияларында дайындалды, г/дм³: 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 100. Сілті ерітіндісінің көлемі 750 см³ құрады. Араластыру уақыты 2 сағат.



1-сурет. Араластыру режимінде аниониттерден кремнийді кетіруге арналған қондырғы: 1 – зертханалық стакан; 2 – араластырғыш; 3 – штатив

Ескерту – авторлармен құрастырылған

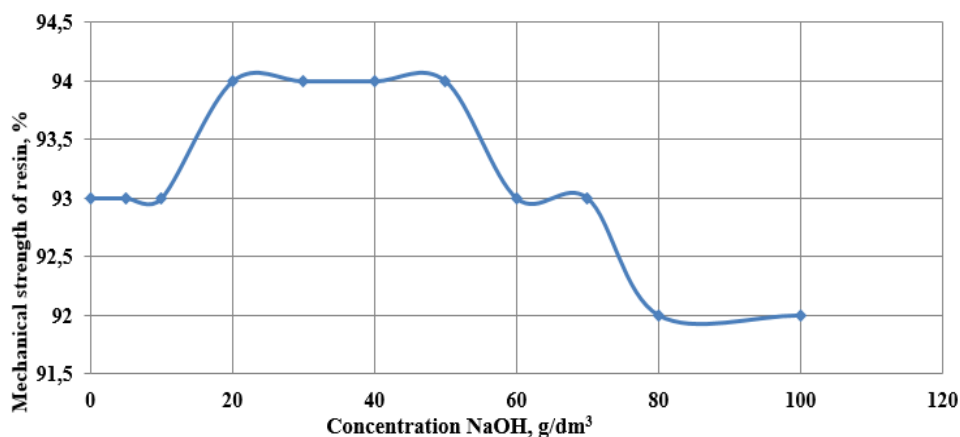


1-кесте. Араластыру режимінде натрий сілтісінің әртүрлі концентрацияларында иониттердің кремнийсіздену нәтижелері

NaOH, г/дм ³	Ионит іш Si, %	Сұйықтық іш Si, г/дм ³	Механикалық беріктігі, %
5	15,0	0,16	93
10	13,64	0,56	93
20	6,45	3,96	93
30	2,91	5,44	94
40	1,66	6,12	94
50	1,15	6,24	94
60	0,57	6,62	94
70	0,83	6,16	93
80	0,96	5,96	93
100	0,67	5,62	92

Ескерту – авторлармен құрастырылған

2-суретте сілті концентрациясының аниониттің кремнийсізденуіне әсер ету тәуелділігі көрсетілген.



2-сурет. Сілті концентрациясының аниониттің кремнийсізденуіне әсері

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Кремнийсіздендіру операциясынан кейінгі сорбент үлгілері, сондай-ақ кремнийсіздендіруге дейінгі және технологиялық процеске қатыспаған (салыстырмалы үлгі) сорбент үлгілері сынама дайындауға жіберілді. Сынама дайындау әдісі келесідей жүргізілді: қажетті мөлшердегі ылғал иониттер алдымен тұрақты массаға дейін кептірілді. Одан кейін алынған шөгінді — сферикалық пішінді түйіршіктер — механикалық ұнтақтауға ұшыратылып, ұсақ дисперсті ұнтақ алынды. Бұл ұнтақ кейін ИК-Фурье спектроскопиясы әдісімен зерттеу жүргізу үшін қолданылды – ИК-спектроскопия әдісінің нұсқаларының бірі (Jumadilov et.al., 2021).

ИК-Фурье спектроскопиясы

Күшті негізді иониттердің химиялық деградациясының ең ықтимал механизмін зерттеу Carry 660 Agilent (АҚШ, 2013) маркалы ИК-Фурье спектрометрін пайдалану арқылы жүргізілді. Құрылымы германий (Ge) элементі бар бұзылған толық ішкі шағылу (НПВО) әдісіне арналған қоңдырмамен жабдықталған. Ионалмасу иониттерінің химиялық



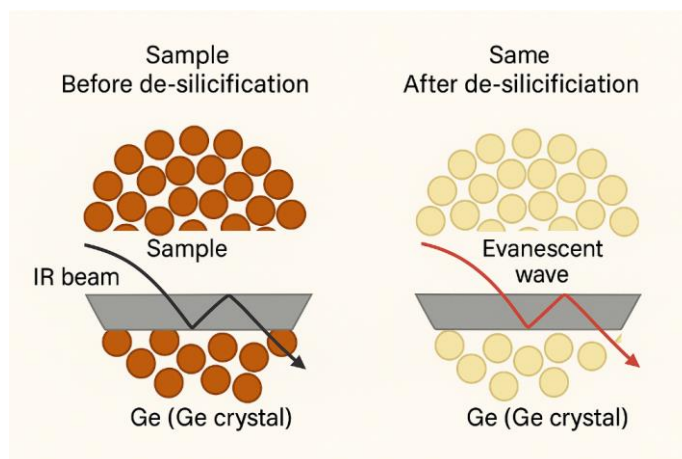
құрылымын зерттеуге арналған бұл физикалық-химиялық талдау әдісі келесі артықшылықтарымен ерекшеленеді:

– Жоғары ақпараттылық: ИК-Фурье спектроскопиясы ионалмасу ионит құрылымында болатын әртүрлі функционалдық топтарды — карбоксилді, гидроксилді, амин топтарын және т.б. анықтауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс ионит құрылымы туралы жан-жақты мәлімет алуға және оның қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді.

– Бұзбайтын (инвазивті емес) әдіс: ИК-Фурье спектроскопиясы зерттелетін ионалмасу ионитінің құрылымына әсер етпейді, сондықтан үлгінің химиялық құрылымын оның бастапқы қасиеттерін өзгертпей зерттеуге мүмкіндік береді.

– Жоғары сезімталдық: Бұл әдіс ионалмасу ионитінің химиялық құрылымындағы ең аз өзгерістерді де — функционалдық топтардың концентрациясының немесе олардың кеңістіктік орналасуының өзгерісін анықтай алады.

– Мониторингтік құрал ретінде қолдану мүмкіндігі: ИК-Фурье спектроскопиясы су тазалау процестерін және олардың тиімділігін бақылауға арналған аналитикалық құрал ретінде пайдаланылуы мүмкін. Мысалы, ол ионалмасу иониттерін пайдалану барысында құрылымында пайда болатын өзгерістерді бақылауға және олардың ауыстырылу қажеттілігін анықтауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Carry 660 Agilent спектрометрінің жұмыс істеу принципі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

3-суретте Ge кристалын қолдану арқылы ионалмасу ионитін кремнийсіздендіру операциясына дейін және одан кейін талдау кезінде ИК-Фурье спектроскопиясындағы АTR (НПВО) әдісінің жұмыс істеу принципі көрсетілген.

Сол жақта (кремнийсіздендіруге дейін): ионит түйіршіктері кремний тұнбаларымен жабылған, бұл спектрдің бұрмалануына әкеледі: Si–O–Si байланыстарының жолақтары ($1080\text{--}1090\text{ см}^{-1}$) күшейіп, ал төрттік аммоний топтарының сипаттық жолағы (890 см^{-1}) әлсірейді.

Оң жақта (кремнийсіздендіруден кейін): ионит түйіршіктері тазарған, сондықтан олардың беті сөнүші толқынның (evanescent wave) өтуіне анағұрлым қолжетімді болады. Спектрде Si–O–Si байланыстарының жолақтары әлсіреп, ал $\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ тобына тән жолағы айқынырақ байқалады.

ИК-сәуле Ge кристалының ішінде өтеді, үлгімен жанасу шекарасында шағылысып, сөнүші толқын түзеді. Бұл толқын ионит түйіршіктеріне шамамен $0,5\text{--}2\text{ мкм}$ тереңдікке еніп, ондағы молекулалармен әрекеттеседі.



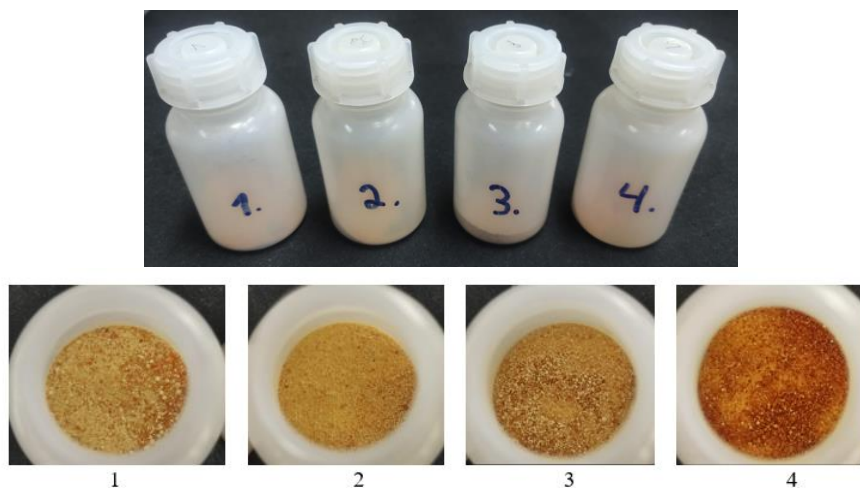
Алынған спектр арқылы қалдық кремний қосылыстарын және функционалдық топтардың сақталу дәрежесін анықтауға болады.

Осылайша, Ge кристалындағы ATR әдісі иониттің кремнийсіздендіруге дейінгі және кейінгі химиялық күйін тікелей салыстыруға және оның сорбциялық қасиеттерінің қалпына келтірілгенін растауға мүмкіндік береді.

Ионит сынамалары

Зерттеу жүргізу барысында өндірісте қолданылған төрт түрлі ионалмастырғыш ионит сынамалары пайдаланылды. Олардың ішінде № 1 және № 2 үлгілер – кремнийден тазарту үдерісіне дейінгі ионалмастырғыш иониттер, ал № 3 және № 4 үлгілер – кремний қосылыстарынан тазартылғаннан кейінгі сынамалар болып табылады. Сондай-ақ, уранды сорбциялау технологиялық үдерісіне қатыспаған, жаңа ионалмастырғыш ионит бастапқы (салыстырмалы) үлгісі ретінде күшті негізді анионит Biolite 200U атты сауда маркасындағы ионит алынды.

4 және 5-суреттерде зерттеу нысандары № 1–4 үлгілер және Biolite 200U ионалмастырғыш иониттерінің фотосуреттері көрсетілген.



4-сурет. Өндірістен алынған ионалмастырғыш ионит үлгілері:

№ 1, 2 – кремнийден тазарту үдерісіне дейінгі иониттер;

№ 3, 4 – кремний қосылыстарынан тазартылғаннан кейінгі иониттер

Ескерту – авторлармен құрастырылған



5-сурет. Biolite 200U ионалмастырғыш иониті

Ескерту – авторлармен құрастырылған



НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Сілті концентрациясының анионитті кремнийден тазартуға әсерін анықтау бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелері төмендегідей:

Сілті концентрациясы $10 \div 20$ г/дм³-тен жоғары болған жағдайда, аниониттегі кремний мөлшері күрт төмендейді, ал 50 г/дм³-тен жоғары концентрация кезінде аниониттегі қалдық кремний мөлшері тұрақтанып, 1 %-дан аз деңгейде болады.

Сілтінің оңтайлы концентрациясы $30 \div 50$ г/дм³ аралығында. Бұл жағдайда иониттегі қалдық кремний мөлшері $1 \div 2,5$ % аралығында болады.

2-суретте келтірілген графикке сүйенсек, сілті концентрациясы 10 мен 60 г/дм³ аралығында болғанда аниониттің механикалық беріктігі бастапқы механикалық беріктіктен (93 %) 1 %-ға жоғары болады. Тек жоғары сілті концентрациясында ($80 \div 100$ г/дм³) механикалық беріктік бастапқы мәннен төмендеп, 92 %-ды құрайды.

Иониттердің механикалық беріктігі екі үрдіске тәуелді: бір жағынан сілтінің теріс әсері, екінші жағынан кремний мөлшерінің азаюынан туындайтын беріктіктің артуы. 2-суретте үш аймақты бөліп көрсетуге болады. Бірінші аймақта сілті концентрациясы төмен және кремнийдің алынған мөлшері аз болғандықтан, бұл екі үрдіс теңеседі. Екінші аймақта кремнийдің алыну деңгейі жоғары (кремниістендіру дәрежесі 90 %-ға дейін), ал сілті концентрациясы шамадан тыс жоғары емес кезде, екінші үрдіс басым болады.

Ал үшінші аймақта, жоғары сілті концентрацияларында, бірінші үрдістің басымдығына байланысты механикалық беріктік төмендейді. Алынған деректерге сүйене отырып, кремниймен қаныққан ионитті сілті концентрациясы 60 г/дм³-ке дейін өңдеу оның механикалық беріктігіне теріс әсер етпейтінін, яғни кремний мөлшерінің азаюы сілтінің ықтимал теріс әсерін басып түсетінін байқауға болады. Эксперимент нәтижесінде алынған иониттің жоғары кремниістендіру дәрежесі гидрометаллургияда уранды алу кезінде қолданылатын сорбенттердің сорбциялық қасиеттерін қалпына келтіру үшін сілтілік өңдеудің тиімді екенін көрсетеді. Келесі зерттеу жұмысы кремниістендіру операциясынан кейінгі сорбенттердің деградациясын анықтауға бағытталды.

Иониттерді сәйкестендіру Biolite 200U маркалы күшті негізді иониттің (5-сурет) спектрлерімен салыстыру арқылы жүргізілді.

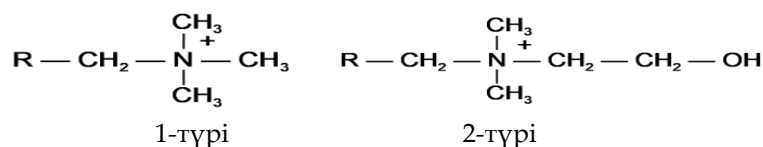
Анионалмастырғыш иониттердің функционалдық топтары орташа тұрақты, бірақ жоғары температурада бұзылады (Tianshu, Lixuan & Chunhong, 2022; Kociołek-Balawejder, Mucha, 2024; Gao, Wu, 2023; Khazdooz, Zarei & Abbaspourrad, 2025). Салқын сумен өңдегенде бұл деградация өте баяу жүреді. Алайда ыстық конденсатта немесе сілтілік регенерантты қыздырғанда аниониттердің сыйымдылығы төмендейді. Осы техникалық факт аясында анионалмастырғыш иониттердің әртүрлі сценарийлерде пайдалану және осы жағдайларда иониттің көрсеткіштері талқыланады.

Зерттелген күшті негізді ионит сынамалары уранды кеннен алу, су дайындау және басқа да процестерде қолданылатын полимерлі материал болып табылады. Синтетикалық аниониттер макромолекулада негіздік сипаттағы функционалдық топтарды қамтиды және қатты полимерлі негіздер ретінде қарастырылады. Аниониттер суда әлсіз қозғалатын макрокатионға (матрицаға) және қозғалмалы аниондарға диссоциацияланады: $RKt^+ | An^-$.

Әлсіз негізді аниониттер құрамында алғашқы, екінші, үшінші және төртінші амин топтары бар, ал күшті негізді аниониттер құрамында төртінші реттік амин топтары болады. Күшті негізді аниониттер сілтілік, бейтарап және қышқыл ортада қарсы иондармен алмасады, ал әлсіз негізділер тек қышқыл ортада жұмыс істейді. Күшті негізді аниониттердің анион алмасу қабілеті әлсіз негізділерге қарағанда жоғары. Олар хлоридтер, сульфаттар, нитраттар сияқты аниондарды тиімді ұстап қалады, сонымен қатар қышқылдар мен сілтілерге төзімді және жоғары рН жағдайында жұмыс істей алады. Керісінше, әлсіз негізді аниониттердің алмасу қабілеті және сілтіге төзімділігі төмен, олар

тек карбонаттар мен гидрокарбонаттар сияқты белгілі бір аниондарды тиімді ұстай алады және төмен рН жағдайында жұмыс істейді (Balanowsky, Koshcheeva & Cherednichenko, 2016).

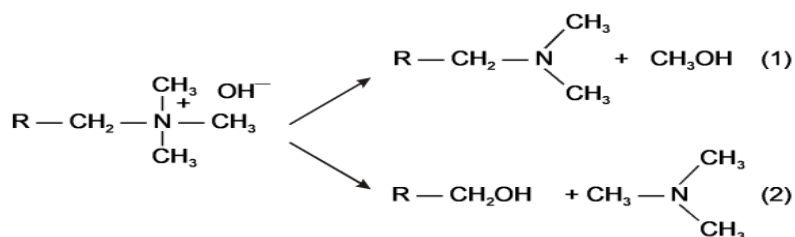
Күшті негізді ионалмастырғыш иониттердің екі түрі бар. Полистирол негізіндегі кеңінен қолданылатын күшті негізді иониттердің функционалдық топтары 6-суретте көрсетілген.



6-сурет. Күшті негізді ионалмастырғыш иониттердің функционалдық топтары, мұнда R – полистиролдан тұратын полимерлі матрица

Ескерту: авторлармен құрастырылған

Қазіргі уақытта иониттерді кремнийден тазарту (кремниістендіру) процесі әртүрлі температурада натрий гидроксиді (сілті) ерітіндісімен жуу арқылы жүзеге асырылады. 1-типті ионит үшін Хофман реакциясы деп аталатын негізгі термиялық ыдырау реакциясы 7-суретте көрсетілген (Vijayalekshmi, Yong, 2018; Cheng, He & Zhang, 2015).



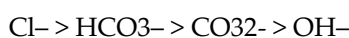
7-сурет. Ионалмастырғыш иониттердің сілтілік деградация процесі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

(1) реакциясы күшті негізді топтарды әлсіз негізді топтарға айналдырады және қосалқы өнім ретінде метанол түзеді, ал (2) реакциясы аммоний тобын ионалмастыру қабілеті жоқ спиртке айналдырып, қосалқы өнім ретінде триметиламин түзеді.

Айта кету керек, (1) реакциясында ионит күшті негізді орталықтарын жоғалтып, үшіншілік амин түріндегі әлсіз негізді топқа айналады, бірақ жалпы сыйымдылық өзгермейді. Ал (2) реакциясында осы функционалдық топқа тән барлық алмасу сыйымдылығы жойылады.

Іс жүзінде екі реакция да шамамен бірдей дәрежеде жүреді. Хофман реакциясы OH^- иондарының қатысуымен катализденеді. Егер шайыр үнемі тұздық формада (қарсы иондар Cl^- , SO_4^{2-} және т.б.) болса, онда оның ыдырау дәрежесі әлдеқайда төмен болады. 2-типті күшті негізді иониттер 1-типтілерге қарағанда әлдеқайда сезімтал, себебі олардың белсенді тобындағы – OH радикалы азот атомымен байланысты әлсіретеді. Күшті негізді иониттердің термиялық тұрақтылығы әртүрлі иондық формалар үшін келесі ретпен төмендейді:

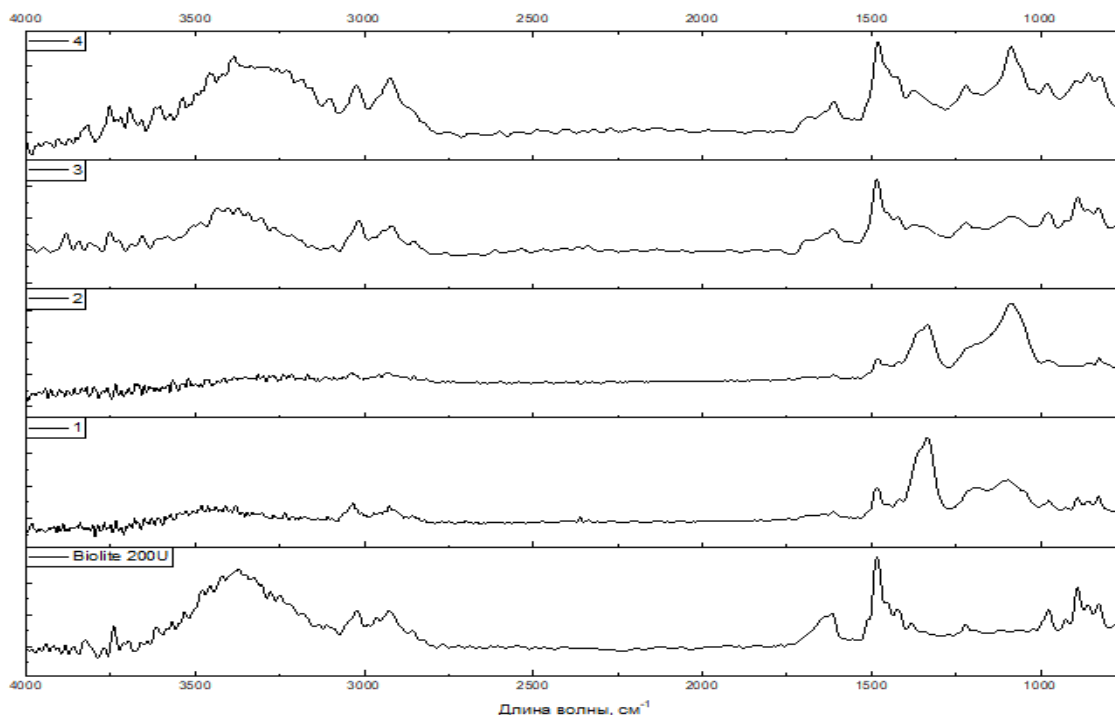


Термиялық деградация – аниондық иониттерде жиі кездесетін мәселелердің бірі, себебі регенерация процестері әдетте 30 °С–тан 45 °С-қа дейінгі температурада, кей жағдайларда одан да жоғары температурада шектеулі уақыт ішінде жүргізіледі. Сонымен қатар,



ионит кремнийсіздендіру процесі кезінде ұзақ уақыт бойы OH^- түрінде болады. Сумен немесе регенерациялық ерітінділермен байланыста болатын тотықтырғыштардың, металдардың немесе басқа қоспалардың болуы химиялық деструкция процесін жеделдетіп, иониттердің қызмет ету мерзімін қысқартуы мүмкін.

8-суретте күшті негізді ионалмастырғыш ионит сынамаларына алынған ИҚ-Фурье спектрлері көрсетілген.



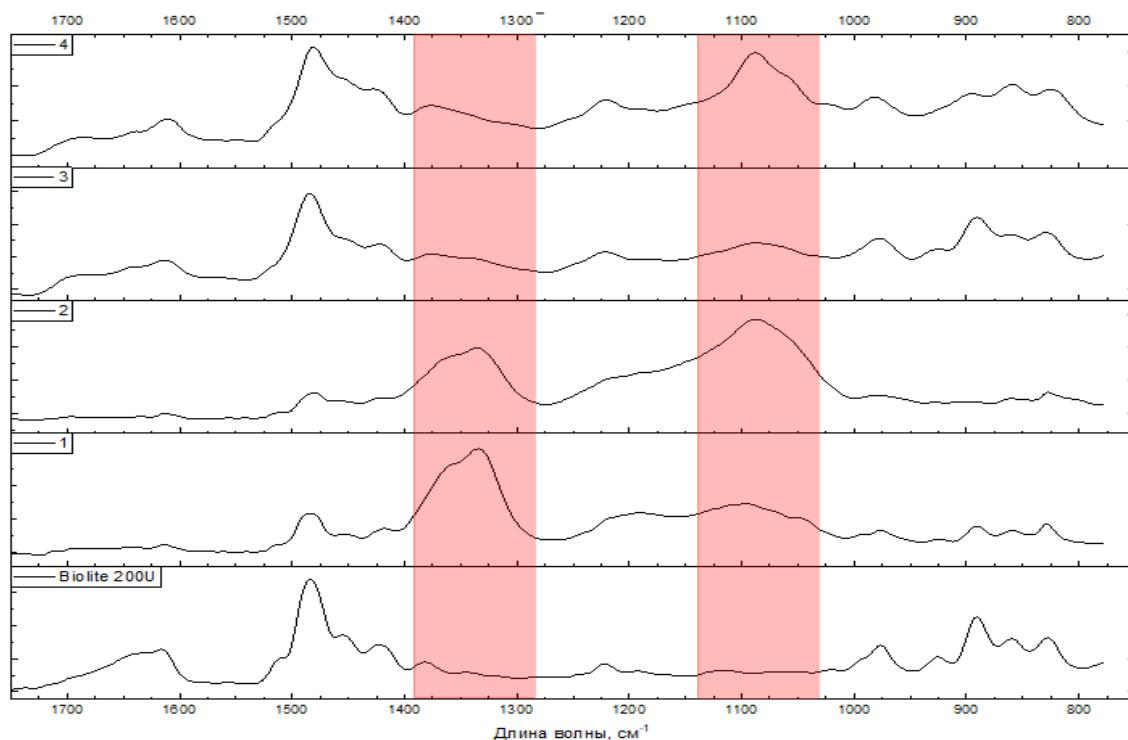
8-сурет. Күшті негізді ионит сынамаларының ИҚ-Фурье спектрлері

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Ең айқын айырмашылық $1750\text{--}750\text{ см}^{-1}$ жұтылу аймағында байқалады (9-сурет) (Selemenev, Zagorodni & Kotova, 2002). $1500\text{--}500\text{ см}^{-1}$ аралығы қарапайым X–Y байланыстарының (C–C, C–N, C–O) валенттік тербелістеріне және X–H байланыстарының (C–H, O–H, N–H) деформациялық тербелістеріне сәйкес келеді және бұл аймақ әрбір органикалық қосылысқа тән ерекше жұтылу жолақтарына байланысты «саусақ іздерін тану аймағы» деп аталады. Кремний шөгінділерін қамтитын 1 және 2 ионит сынамалары кремнийсіздендіруден кейін алынған сынамалардан және бастапқы Biolite 200U ионитінен айтарлықтай ерекшеленеді. $1610\text{--}1640\text{ см}^{-1}$ жұтылу жолағындағы кең шарықтау шыңы, сондай-ақ 1510 см^{-1} және 1455 см^{-1} аймақтарындағы жолақтар ароматтық сақинаның –C=C– конъюгацияланған байланыстарына сәйкес келеді. 1480 см^{-1} аймағындағы кең жұтылу жолағы бензол сақиналарының –C–C– байланыстарының және гидрохлорид түрінде берілген $\text{N}^+\text{--CH}_3$ топтарының деформациялық тербелістеріне тән. $1080\text{--}1090\text{ см}^{-1}$ аймағындағы жұтылу жолағы Si–O–Si деформациялық тербелістеріне сәйкес келеді, ал $1300\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ диапазонында байқалатын қос шарықтау шыңы --NO_3^- нитрат топтарына және/немесе --NO_2^- нитритті комплекстеріне тән. Мұндай жұтылу жолақтары таза Biolite 200U ионитінің спектрінде байқалмайды, ал 3 және 4 үлгілерде олар бар. Демек, кремнийсіздендіру процесі толық жүрмеген және 3 пен 4 иониттердің спектрінде SiO_2 қалдықтары аз мөлшерде болса да сақталған.

Күшті негізді аниониттерге тән ең айқын жұтылу жолағы – төртіншілік амин тобына ($-N^+(CH_3)_3$) сәйкес келеді және ол шамамен 890 см^{-1} толқын ұзындығы аймағында байқалады. Бұл жолақтың интенсивтілігіне сілтілік өңдеу айтарлықтай әсер етеді. Biolite 200U ионитінің спектрінде осы аймақтағы шарықтау шыңы ең айқын байқалады, ал 1-ші (кремнийсіздендіру кейінгі 3) және 2-ші (кремнийсіздендіруден кейінгі 4-ші) сынама шарықтау шыңында әлсіздеу көрінеді. Бұл нәтижелер төртіншілік амин тобының химиялық деструкциясының орын алғанын дәлелдейді.

$820\text{--}830\text{ см}^{-1}$ аймағындағы жұтылу жолағы $-CH_2-NH_2$ және/немесе $-N-C$ байланыстарының $-N(CH_3)_2$ тобындағы деформациялық тербелістеріне сәйкес келеді.



9-сурет. Күшті негізді ионит сынамаларының ИҚ-Фурье спектрлері,
«саусақ іздерін тану» аймағы

Ескерту – авторлармен құрастырылған

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыс барысында келесі міндеттер орындалды: өндірістік циклде қолданылатын ионалмастырғыштардан кремнийді кетіру мүмкіндігі бағаланды; кремнийсіздендіру үшін сілті ерітіндісінің оңтайлы концентрациясы мен диапазоны анықталды; күкірт қышқылды уран өндіру барысында пайдаланылатын иониттердің деградациясы талданды. Эксперименттер нәтижесінде NaOH ерітіндісімен өңдеу кремний мөлшерін айтарлықтай азайтатыны ($30\text{--}50\text{ г/дм}^3$ диапазонында шамамен $1\text{--}2,5\%$ -ға дейін) және механикалық беріктік сақталатынын немесе аздап төмендейтінін көрсетті. ATR-FTIR спектроскопиясы Si–O–Si байланыстарының үлесінің азайғанын және иониттің функционалдық топтарының спектрлік маркерлерінің сақталғанын растады, бұл сорбциялық қасиеттердің ішінара қалпына келгенін білдіреді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы кремнийсіздендіру дәрежесін, механикалық беріктікті және деградацияның спектрлік белгілерін кешенді салыстыру арқылы сілтілік өңдеудің технологиялық тұрғыдан қолайлы шектерін негіздеуде. Практикалық маңыздылығы кремниймен ластану деңгейі



жоғары жағдайда жұмыс істейтін күшті негізді анионалмастырғыш иониттердің қызмет ету мерзімін ұзарту және кейінгі пайдалану циклдарында сорбциялық сипаттамалардың тұрақтылығын арттыру мүмкіндігінде.

Зерттеудің шектеулері оның зертханалық деңгейде, статикалық режимде және шектеулі ионит түрлерінде жүргізілуімен байланысты. Ұзақ мерзімді тұрақтылықты қайталанған циклдар кезінде зерттеу және техникалық-экономикалық бағалау қажет. Болашақ зерттеу бағыттарына температурамен уақыт режимдерін оңтайландыру, қарсы иондардың әсерін зерттеу және өндіріске енгізу үшін регламенттерді әзірлеу жатады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Барлық авторлардың атынан жауапты автор мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (Грант № BR28713471 Кремний қосылыстарының құрамын тиімді төмендету есебінен құрамында уран бар ерітінділерден уран алуды арттыру әдістерін әзірлеу).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Balanowsky N.V., Koshcheeva A.M., Cherednichenko A.G. (2016). Synthesis and properties of strongly basic acrylate polyfunctional anion-exchange resin for uranium extraction. *Vesnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 2: Khimiya*, No. 5, 376–380.
- Cheng J., He G., Zhang F. (2015). A mini-review on anion exchange membranes for fuel cell applications: Stability issue and addressing strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23), 7348–7360. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.040>
- Gao D., Wu D. (2023). Thermal Characterization of Acid Treated Anion Exchange Resins. <https://doi.org/10.2172/1962765>
- Jumadilov T., Khimersen K., Malimbayeva Z., Kondaurov R. (2021). Effective Sorption of Europium Ions by Interpolymer System Based on Industrial Ion Exchanger Resins Amberlite IR120 and AB 17 8. <https://doi.org/10.3390/ma14143837>
- Kociołek-Balawejder E., Mucha I. (2024). The influence of CuxS particles on the thermal decomposition of anion exchangers. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13610-w>
- Khazdooz L., Zarei A., Abbaspourrad A. (2025). Synthesis of an anion exchange resin for enhanced PFAS adsorption in water treatment. <https://doi.org/10.1039/D5LP00035A>
- Selemenev V.F., Zagorodni A.A., Kotova D.L. (2002). Infrared spectroscopy of ion exchange resins: chemical deterioration of the resins. *Reactive and Functional Polymers*, 53(2–3), 157–171. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(02\)00170-0](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(02)00170-0)
- Tianshu B., Lixuan Zh., Chunhong W. (2022). The synthesis of thermostable, strongly basic anion exchange resins using cross linked biguanide and its application in the extraction of sodium copper chlorophyllin. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2022.123436>
- Vijayalekshmi V., Yong N.S. (2018). Recent advancements in applications of alkaline anion exchange membranes for polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.10.026>
- Watanabe Y., Amitani N., Yokoyama T., Ueda A., Kusakabe M., Unami S., Odashima Y. (2021). Synthesis of mesoporous silica from geothermal water. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03133-x>
- Zdarta J., Jesionowski T. (2022). Silica and Silica-Based Materials for Biotechnology, Polymer Composites, and Environmental Protection. *Materials*, 15(21), 7703. <https://doi.org/10.3390/ma15217703>



- Zhang P., Wang H., Chen L., Li W., Fujita T., Ning S., Wei Y. (2024). Efficient Uranium Removal from Aqueous Solutions Using Silica-Based Adsorbents Functionalized with Various Polyamines. *Toxics*, 12, 0704. <https://doi.org/10.3390/toxics12100704>
- Аликулов Ш.Ш., Каршибоев Ш.Б., Жалилов Г.Б. (2021). Изучение основы сорбционной технологии переработки урановых растворов. *Universum: технические науки*, 3(84). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11432> (дата обращения: 31.10.2025). // Alikulov Sh.Sh., Karshiboev Sh.B., Zhalilov G.B. (2021). Izuchenie osnovy sorbcionnoj tehnologii pererabotki uranovyh rastvorov [Studying the basics of sorption technology for processing uranium solutions]. *Universum: tehnicheckie nauki*, 3(84). (In Russ.)
- Аликулов Ш.Ш., Курбанов М.А., Шарифутдинов У.З., Ражаббоев И.М., Юлдашев Ш.Ш. (2023). Исследования поведения кремнезема и органики в продуктивных растворах подземного выщелачивания урана и их влияния на процесс сорбции урана. *Universum: технические науки*, 2(107). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15065> // Alikulov Sh.Sh., Kurbanov M.A., Sharifutdinov U.Z., Razhabboev I.M., Juldashev Sh.Sh. (2023). Issledovanija povedenija kremnezema i organiki v produktivnyh rastvorah podzemnogo vyshhelachivaniya urana i ih vlijaniya na process sorbcii urana [Studies of the behavior of silica and organics in productive solutions of underground uranium leaching and their effect on the process of uranium sorption]. *Universum: tehnicheckie nauki*, 2(107). (In Russ.)
- Иванова И.А., Василенок О.П., Рузиев Б.Т. (2018). Причины возникновения и способы устранения эмульсии при жидкостной экстракции урана из химических концентратов. *Горный журнал*, №9, 78–81. // Ivanova I.A., Vasilenok O.P., Ruziev B.T. (2018). Prichiny vzniknovenija i sposoby ustraneniya jemul'sii pri zhidkostnoj jekstrakcii urana iz himicheskikh koncentratov [Causes and methods of emulsion elimination during liquid extraction of uranium from chemical concentrates]. *Gornyj zhurnal*, No. 9, 78–81. (In Russ.)
- Ражаббоев И.М., Шарафутдинов У.З., Оstonov О.И., Нурмуротова Ш.О. (2021). Исследования влияния хлорид-ионов в процессе сорбции и десорбции урана. *Universum: технические науки*, №3, 64–67. // Razhabboev I.M., Sharafutdinov U.Z., Ostonov O.I., Nurmurotova Sh.O. (2021). Issledovanija vlijaniya hlorid-ionov v processe sorbcii i desorbcii urana [Studies of the effect of chloride ions in the process of sorption and desorption of uranium]. *Universum: tehnicheckie nauki*, No. 3, 64–67. (In Russ.)
- Туробжонов С.М., Абдудалипова Н.М. (2025). Исследование кислотно-основного равновесия и сорбционных свойств новых амфотерных ионитов. *Universum: технические науки*, №9(30). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/3658> (дата обращения: 31.10.2025). // Turobzhonov S.M., Abdutalipova N.M. (2025). Issledovanie kislotno-osnovnogo ravnovesija i sorbcionnyh svojstv novyh amfoternyh ionitov [Investigation of acid-base equilibrium and sorption properties of new amphoteric ionites]. *Universum: tehnicheckie nauki*, No. 9(30). (In Russ.)



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Кылышканов Манарбек Калымович – Профессор, Жобаның ғылыми жетекшісі, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Кылышканов Манарбек Калымович – Профессор, Научный руководитель проекта, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан.

Kylyshkanov Manarbek Kalymovich – Professor, Scientific director of the project, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: kylyshkanov@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-7124>



Кенжетаяев Жигер Смадиевич – PhD, аға ғылыми қызметкер, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Кенжетаяев Жигер Смадиевич – PhD, старший научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан.

Kenzhetayev Zhiger Smadiyevich – Senior Researcher, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: kzhiger@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-6665>



Копбаева Мария Петровна – Х.ғ.к., аға ғылыми қызметкер, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Копбаева Мария Петровна – К.х.н., старший научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан.

Kopyayeva Mariya Petrovna – Candidate's (PhD) degree in Chemical sciences, Senior Researcher, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: natalya.kopyayeva@mail.ru

ORCID:



Айтекеева Салтанат Нуритдиновна – Т.ғ.к., аға ғылыми қызметкер, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Айтекеева Салтанат Нуритдиновна – К.т.н., старший научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан.

Aitekeyeva Saltanat Nuritdinovna – Candidate's (PhD) degree in Technical sciences, Senior Researcher, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: s.aitekeyeva@gmail.com

ORCID:



Өмірғали Арманбек Қасымұлы – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Өмірғали Арманбек Қасымұлы – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

Omirgali Armanbek Kasymuly – PhD, Leading Researcher, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: armanbek@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5916-3504>