



МРНТИ 29.15.35

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-153-4-52-72>

Ғылыми мақала

Уран (VI) иондарына қатысты композициялық материалдардың сорбциялық қасиеттерін зерттеу және кванттық-химиялық модельдеу

Абуова Ф.У.^{ID}, Сатанова Б.М.^{ID}, Абуова А.У.^{ID}, Усен Е.Б.^{ID}, Солтанбек Н.С.^{ID}, Маратұлы С.^{ID}, Момбай А.Н.^{ID}, Ерланқызы А.^{ID}, Акамбаева Д.М.^{ID}

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

(*E-mail: abuova_fu@enu.kz, satanova_bm_2@enu.kz, abuova_au@enu.kz, sns.nurgul@mail.ru, sultan2609@enu.kz, erbol_usen@mail.ru, adeliyymm@mail.ru, ajdanaerlankyzy14@gamil.com, din.akambaeva@icloud.com)

Аңдатпа. Уранды сорбциялау және олардың әртүрлі аниониттерде бірге болуының жүргізілген тәжірибелерінің нәтижелері келтірілген. Уран анионитті сульфат түрінде дайындаған кезде ғана жақсы сіңеді және құрамында сульфаты бар және аз концентрацияланған, карбонат бар ерітінділерден сорбентке ауысады. Құрамында титан мөлшері 1,0 мг/л дейін және күкірт қышқылының концентрациясы – 3 г/л дейін уранды жерасты сілтісіздендірудің технологиялық ерітінділерін ілеспе алу бойынша зерттеулер жүргізілді. Жер асты шаймалау процесінде титан, уран сияқты, еритін иондар түрінде ерітіндіге өтеді. Титанды алу және бөлу міндеті ерітіндідегі иондардың тіршілік ету формасымен тығыз байланысты. Уран мен титан тасымалдаудағы кейбір заманауи аниониттердің сорбциялық қасиеттерін салыстырмалы бағалау үшін модельдік сульфат пен бикарбонат ерітінділерінен осы металдардың бірлескен сорбциясы бойынша зерттеулер жүргізілді. Ерітінділерден уран мен титаның бірлескен сорбасы кезінде макрокеуекті құрылымның күшті негізді аниониттерін қолданған жөн. Модельдік ерітінділерден бірлескен сорбция бойынша ең жақсы нәтижелер В0-020 маркалы анионитте алынды, онда уран бойынша статикалық ЕМ – сүйек 41,2 мг/г және титан бойынша – 16,5 мг/г құрады, нәтижесінде аниониттердегі перренат иондарының сорбциясы ион алмасу механизміне сәйкес жүретіні анықталды. Зерттеулер В0 - 020 және ВD-706 күшті негізді аниониттеріндегі күкірт қышқылы мен бикарбонатты ерітінділерден уран мен титан сорбциясының кинетикасын анықтады, бұл оларды қолданудың жоғары тиімділігін анықтайды.

Түйінді сөздер: сорбция, десорбция, сорбент, элюент, элюат, масс-спектрометрия

Жіберілді 20.11.2025. Өзгертілді 24.11.2025. Қабылданды 26.11.2025. Онлайн қол жетімді 25.12.2025.

Кіріспе

Әлемдік тәжірибеден силикагельдер мен минералды сорбенттер титан сорбциясы үшін тиімсіз екендігі белгілі. Олар жеткілікті селективті емес, механикалық беріктігі төмен және ренийдің сыйымдылығы төмен.

Сондай-ақ, белсендірілген көмірге негізделген сорбенттерді қолданудың оң тәжірибесі бар, бірақ төмен шырынды сыйымдылық пен төмен механикалық беріктік оларды жер асты шаймалау (ПВ) тәжірибесінде қолдануды шектейді.

Қосымша зерттеулер әлсіз күшті негізді синтетикалық аниониттердің көп мөлшерін сынады. Кейбір сыналған аниониттер ренийдің технологиясы мен аналитикалық химиясында қолданылады [1-2]. Рений сорбциясы бойынша жүргізілген жұмыстардың саны өте көп болғандықтан, ал оларды тәжірибеге енгізу жеке болып табылады, содан кейін осы зерттеуде зерттеудің жалпы бағытын сипаттайтын ең қолайлы жұмыстарға талдау жасалды.

Зерттеулердің көпшілігі технологиялық ерітінділердегі уран мөлшері 1,0 г/л-ге дейін, ал күкірт қышқылының концентрациясы 250 г/л-ге дейін жететін жаңа өндірілген мыс молибден гидрометаллургиясындағы ренийді ілеспе алуға арналған [3].

Ренийді ілеспе алу бойынша біздің зерттеулеріміз үшін уранның жерасты сілтіленуінің технологиялық ерітінділері қызығушылық тудырады, құрамында рений мөлшері 1,0 мг/л-ге дейін және күкірт қышқылының концентрациясы – 3 г/л-ге дейін. Әлемдік тәжірибеде мұндай жағдайлар ең аз енгізуді тапты, өйткені мұндай технологиялық сұлбаларды жүзеге асыру әрдайым тиімді бола бермейді [3].

Бұл мақалада уран (VI) иондарын селективті және тиімді сорбциялау үшін ПЭТФТМ-де MOF синтезін зерттеуге арналған. Мақаланың басты жаңалығы – уранды (VI) сіңіру үшін өрнектелген мембраналар кеуектерінің бетінде және ішінде MOF синтезінің тиімді әдістері алғаш рет ұсынылды.

Радиохимияда, хроматографияда, катализде, Ағынды суларды залалсыздандыруда және тазартуда, геохимияда, әсіресе теңіз суларынан элементтердің микрокөлшемін оқшаулауда маңызды рөл атқаратын гидроксидтерге негізделген Бейорганикалық иониттерді зерттеуге көп көңіл бөлінеді. Бірқатар шолулар металл гидроксидтерімен элементтердің химиясы мен сорбция механизміне арналған [4]. Алайда, сорбциялық процестердің табиғаты толық анықталмай қалады. Төменде "гидроксид-сорбат" жүйелеріндегі химизм мен өзара әрекеттесу механизмі туралы ең маңызды заманауи идеялар, сондай-ақ олардың негізінде гидроксидтер мен Бейорганикалық иониттердің синтезі, құрылымы, қасиеттері туралы әдеби мәліметтер қарастырылған.

Жұмыста [4] 0,01 нитрат, хлорид, сульфат және фторид ерітінділерінен никель, мырыш, мыс түйіршікті гидроксидтерімен уранның (VI) сорбциясының нәтижелері келтірілген, сондықтан жұмыста ұсынылған тәжірибелік деректер [5-6] уранды сорбциялық алу технологиясын дамытуға қызығушылық тудыруы мүмкін. техногендік және гидроминералдық шикізат, сондай-ақ аталған шикізаттан уран алу үшін құрамында гидроксил бар сорбенттерді алу тәсілдерін жасау үшін.

Түрлендірілген полимер үлгілерін алу. Осы тапсырма шеңберінде амин топтары бар полимер ПЭТФ ТМ шаблондарын функционализациялау жүзеге асырылатын болады.

ТМ ПЕТФ поли(N-винилформамид) (PNVF), поли(виниламин) (PVAm) прекурсорлы полимерімен модификациясы қайтымды қосу-фрагментация беру (RAFT) әдісімен жүзеге асырылады. Осы тапсырманың бір бөлігі ретінде ПЕТФ ТМ PNVF полимерімен модификациялаудың оңтайлы шарттары анықталады және амидтік фрагменттердің кейінгі гидролизі нәтижесінде ПЭТФ ТМ беті мен тесіктері PVAm (PET-g-PVAm) қапталады. үлгілер). Осылайша, амин топтарымен қаныққан бет алынады және MOF-ті кейіннен иммобилизациялау үшін қолайлы болады.

Алкин-функционалдандырылған ПЭТФ ТМ синтезі. Бұл тапсырма PET-g-PVAm 2-пропин қышқылымен, құрамында көміртегі-көміртегі үштік байланысы бар қарапайым ацетилен карбон қышқылымен модификацияланады. 2-пропин қышқылының карбон қышқылының функционалды тобы мен PET-g-PVAm амин бөлігі арасындағы конденсацияның оңтайлы шарттары анықталады. Осылайша, осы тапсырма аясында алкин фрагменттерімен қаныққан ПЭТФ ТМ алынады [7-9].

Азид-модификацияланған металлоорганикалық қаңқалардың (MOF) синтезі: бұл тапсырмада азид-модификацияланған MOF синтезделеді. Бұл тапсырмада біз MIL-101 типті хромға негізделген аминифункцияланған MOF алудың жетілдірілген синтетикалық стратегиясын қолдануды жоспарлап отырмыз.

Алынған композициялық материалдардың уран (VI) иондарына қатысты сорбциялық қасиеттерін зерттеу үшін бірінші принциптерден компьютерлік модельдеу.

Бұл міндет ұзақ мерзімді және жобаны іске асырудың бүкіл кезеңінде кезең-кезеңімен жүзеге асырылатын болады. Барлық есептеулер тығыздықтың функционалдық теориясының (DFT) көмегімен жүзеге асырылады. MOF-ның әртүрлі аймақтарындағы уран (VI) иондарының сорбциялық энергиялары есептелетін болады және сорбцияланған иондардың тордағы ең энергетикалық қолайлы позициялары анықталады. Бұрын уранил иондарын ұстап тұру және анықтау үшін тәжірибе жүзінде қолданылған нанобөлшектерді қолдану арқылы модификациялаудың әртүрлі әдістері қарастырылады. Нанобөлшектерді функционализациялаудың сорбциялық қасиеттерге әсерін зерттеу үшін зерттелген MOF фрагменттері сәйкес материалдардың (Fe_3O_4 , Au, Ag) беттерінде орналасады және MOF-уранил әрекеттесуі уранил иондарының өзара әрекеттесуімен одан әрі модельденеді. нәтижесінде гибриді жүйелер. Модельдік жүйелерге H_2O молекулаларын енгізу арқылы судың сорбция процесіне әсері зерттелетін және модельденетін болады. Композиттердің қасиеттеріне pH әсерін математикалық модельдеу жүргізіледі [10-11].

Уранды сорбциялау үшін қолданылатын аниониттердің ренийді сору қабілеті де бар. Ренийді сіңіру қабілеті бойынша аниониттерді қатарға орналастыруға болатыны белгілі: АМП > АВ-17 > АВ-17 x 16 >> VP-1ар > АН-21. Алайда, біз әдебиетте заманауи Рено – ниттерді қолдана отырып, уран мен ренийді бірлескен сорбциялау бойынша жұмыс таба алмадық[12-13].

Уран мен титан қатысты кейбір заманауи аниониттердің сорбциялық қасиеттерін салыстырмалы бағалау үшін біз осы металдардың құрамындағы күкіртқышқыл ерітінділерінен, мг/л: рений – 10,9; уран – 17,4; Темір (+3) – 100,0; сульфат – иондар – 10 000; хлорид – иондар-1000; pH = 2.

Әдістер мен материалдар

Сорбция статикалық жағдайда, 24 сағат бойы ауамен араластыру кезінде қондырғыда, 25 °C температурада және VCM:Vp = 1: 2500 қатынасында жүргізілді. Уран мен ренийдің бірлескен сорбалары бойынша нәтижелер кестеде келтірілген. 1. Кестеден көрініп тұрғандай, 1, күшті ось – жаңа аниониттердің уран бойынша айырбастау сыйымдылығы СЛ-босониттерге қарағанда көбірек болады. Уран мен титаның бірлескен сорбциясы бойынша ең жақсы нәтижелер во-020 анионитінде алынды, онда уран бойынша соя 41,2 мг / г құрады.

Кесте-1. Уран аниониттермен бірлескен сорбциялау нәтижелері

Аниониттар	Статикалық алмасу қабілеті (COE), мг/г		Бөлу факторлары	
	уран	рений	Ti/U	Ti/Re
<i>Күшті негізгі анион алмастырғыштар</i>				
Lewatit K6367	18,4	11,7	0,6	1,6
Россион-62	21,5	11,2	0,5	1,9
Purolite A-600	18,4	13,5	0,7	1,4
Purolite A-560	33,7	11,9	0,4	2,8
BO-020	41,2	16,5	0,4	2,5
BD-706	32,6	12,4	0,4	2,6
<i>Әлсіз негізгі анионалмастырғыштар</i>				
Lewatit MP-62	23,8	12,7	0,5	1,9
Purolite A-170	7,5	12,2	1,6	0,6
АД-1	6,4	9,6	1,5	0,7
АМЭ-1	5,6	10,4	1,8	0,5
АН-18-8	16,2	11,3	0,7	1,4
КЭП-100	12,9	13,2	1,0	1,0
КЭП-200	2,1	14,5	6,9	0,1
RA -174	3,5	14,2	4,0	0,2

Әлсіз негізді аниониттердің ішінен титан бойынша үлкен сояда Сар-200 – 14,5 мг/г және RA – 174 – 14,2 мг/г бар, бірақ уранның селективтілігі сәйкесінше 2,1 және 3,5 мг/г құрайды. Осылайша, функционалды топтардың негізділігі және аниониттердің құрылымы рений бойынша иониттің селективтілігіне әр түрлі әсер етеді.

Зерттеудің келесі кезеңінде күкірт қышқылы мен бикарбонат ПВ нәтижесінде алынған нақты өндірістік ерітінділерден күшті негізді BD-706 және BO-020 аниониттерін қолдана отырып, уран мен титаның бірлескен сорбциясы жүргізілді. Өндірістік ерітінділердің құрамы кестеде келтірілген. Сорбция статикалық режимде жүргізілді. Зерттеу нәтижелері кестеде келтірілген.[14]

Бұл 2023 жылдан бастап BD-706 анионитін НГМК ПВ кеніштеріндегі ВО-020 анионитіне біртіндеп ауыстыру басталуына негіз болды.

Уран мен ренийдің бірлескен сорбциясының кинетикасын зерттеу PV өндірістік ерітінділерінен жүргізілді (кесте. 3) BD-706 күшті негізді аниониттерді пайдалана отырып, гельдік құрылымы бар және В-020, макрокеуекті құрылымы бар. Бастапқыда зерттеулер жоғарыда сипатталған статикалық режимде жүргізілді.

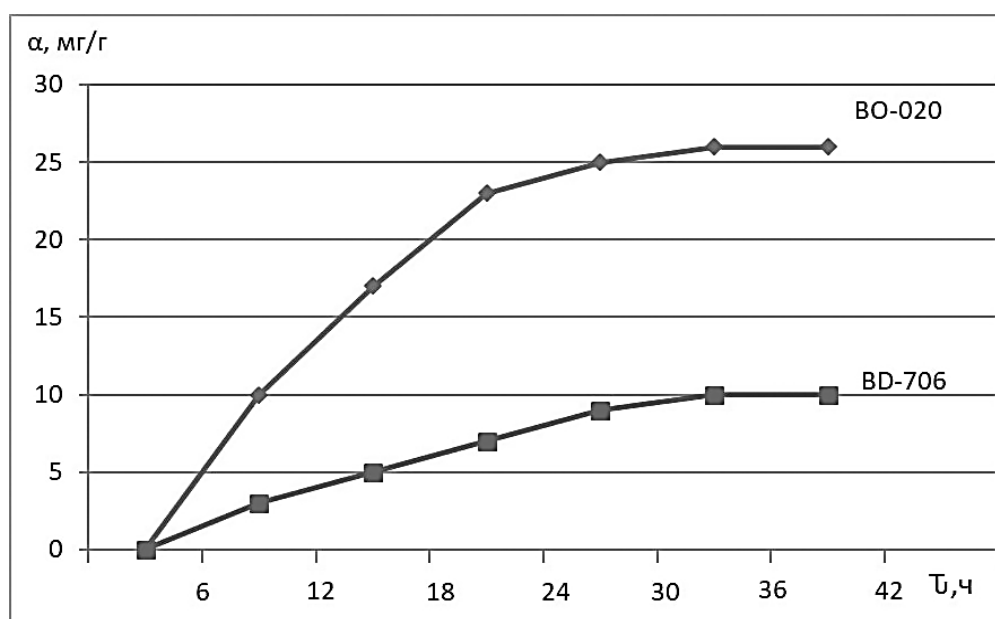
Кестенің нәтижелерінен көріп отырғаныңыздай. өндірістік ерітінділерден сорбция кезінде во-020 аниониті уранның да, титаның де сыйымдылығы бойынша жоғары мәндерді көрсетті[15].

Кесте-2. Өндірістік ерітінділердің құрамы

Ертінді	рН	ОВП, мВ	Концентрация, мг/л						
			U	Re	SO ₄ ²⁻	HCO-	Fe ⁺³	SiO ²	Ca ²⁺
Сернокислый	1,54	365	35,8	0,56	29600	н. о.	312,8	110	450
Бикарбонатный	7,1	267	23,4	0,48	8800	560	–	14,8	620

Кесте-3. Өндірістік ерітінділерден күшті негізді аниониттермен уран мен ренийдің бірлескен сорбциясы бойынша нәтижелер

Ертінді	СОЕ анионит ВО-020, мг/г		СОЕ анионита ВО-706, мг/г	
	уран	титан	Уран	титан
Сульфат	25,8	1,9	10,7	1,2
Бикарбонат	21,5	1,7	10,3	1.1

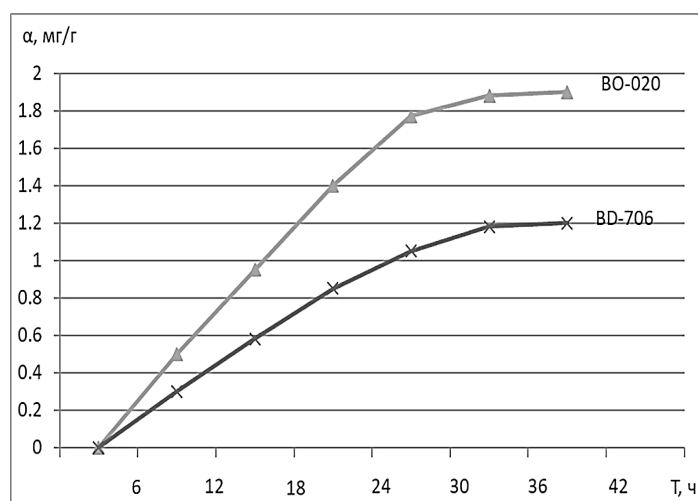


Сурет 1. Күкірт қышқылы ерітіндісінен уран сорбциясының кинетикасы[16]

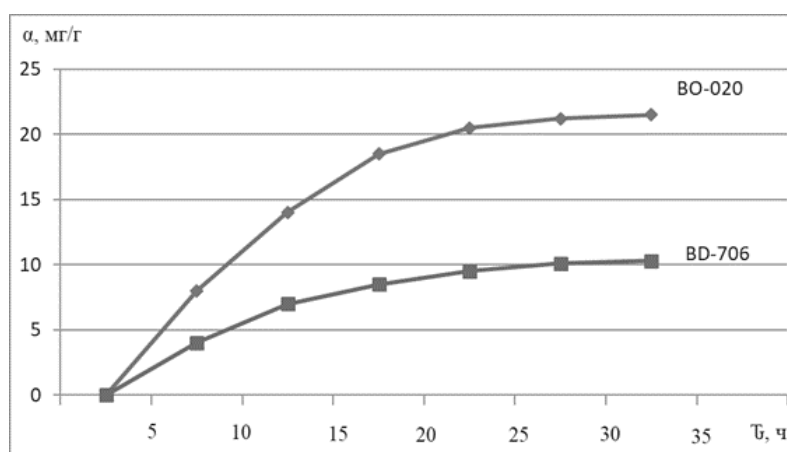
Макропорозды аниониттер үшін уранды сорбциялау кезінде 24 сағат ішінде, гельдік анионит үшін – 30 сағат ішінде жетеді. Титаның сорбциясы кезінде (сурет-1) ұқсас кинетикалық қисықтар ұсынылады, мұнда BO-020 аниониті ең жақсы кинетикалық сипаттамаларға ие. Бұл аниониттің тепе-теңдігі 36 сағатта, ал BD – 706 аниониті 40 сағатта болады.

Бикарбонат ерітіндісінен уран сорбциясының кинетикалық қисықтары суретте көрсетілген 1, ал рений – суретте 2.

Күріш. 4 және 5 бикарбонат ерітіндісінен уран мен рений сорбциясының кинетикалық тәуелділіктері сульфат ерітіндісінен алынған сорбциямен бірдей сипатта болатынын көруге болады. Бұл жағдайда қоспалардан таза бикарбонатты ерітіндінің сорбциясы жоғары жылдамдықпен сипатталады-макропорозды аниониттер үшін тепе-теңдік 20 сағатта, ал BD – 706 гель аниониті үшін-уран үшін 24 сағатта, ал рений үшін тиісінше 32 сағат және 38 сағатта болады[17-18].



Сурет 2. Күкірт қышқылы ерітіндісінен рений сорбциясының кинетикасы



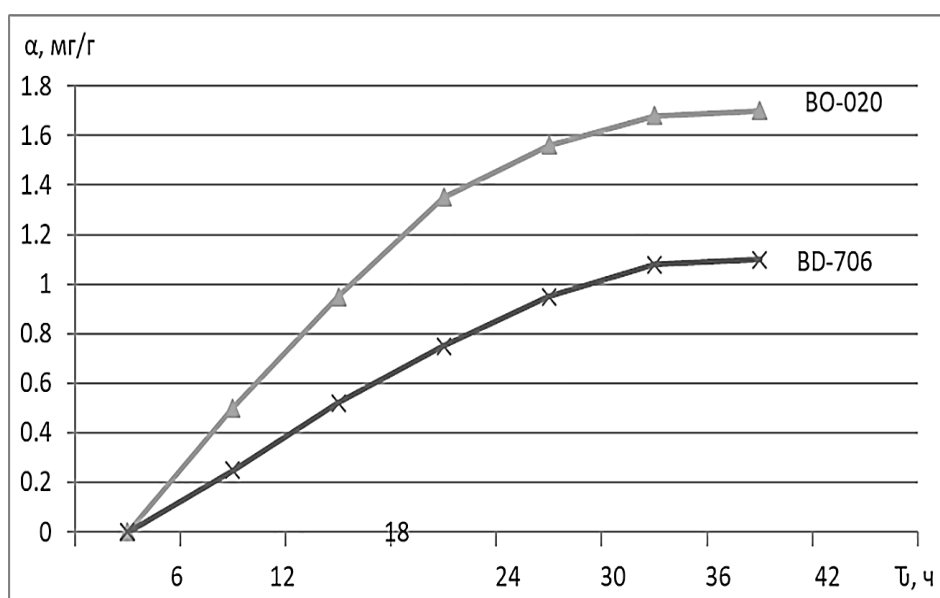
Сурет 3. Бикарбонат ерітіндісінен уран сорбциясының кинетикасы

Динамикада сорбция шайыр көлемі 100 мл бағандарда жүргізілді. ерітіндіні беру жылдамдығы 5 сағ-1 (500 мл/сағ) болды. Сорбция шайырлардың толық динамикалық алмасу сыйымдылығын (PDOE) анықтай отырып, толық секіруге дейін жүргізілді.

Уран сорбциясының Шығыс қисықтары суретте көрсетілген динамикалық жағдайда уран бойынша шайырлардың қанығуы бойынша көрсеткіштер келтірілген.

Деректерді талдау 3-суретте күкірт қышқылы ерітіндісінен сорбция кезінде BO-020 анионитінің тек жоғары PDOE ғана емес, сонымен қатар уран концентрациясы төмен сорбция аналықтарының түзілуін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Суретте көрсетілген рений сорбциясының динамикасы жағдайында және зерттелетін аниониттердің қанығу нәтижелері, сонымен қатар BO-020 қанықтыру бойынша ең жақсы көрсеткіштерге ие.



Сурет 4. Рений сорбциясының ұқсас Шығыс қисықтары бикарбонатты PV ерітінділерінен алынды, мұнда да нәтижелер во-020 анионитінің пайдасына болды

DFT-есептеу параметрлері. Псевдопотенциал

DFT кванттық химиялық есептеулерде дәлдік пен есептеу шығындары арасындағы сенімді конвергенция мен тепе-теңдікті қамтамасыз ететін жүйелерді мұқият таңдау маңызды.

1. Айырбастау-корреляциялық функционалдылық.

Негізгі алмасу – корреляциялық (XC) функционал ретінде ресурстарға қалыпты талаптарды және оксидті материалдардың құрылымдық және энергетикалық сипаттамаларының жақсы қайталануын біріктіретін жалпы градиенттік жуықтау (GGA)–PBE қолданылады. Уранның 7F электрондарының күшті локализациясын есепке алу қажет болған жағдайда, U атомдары үшін тиімді U жиілік енгізу арқылы DFT+U әдісін одан әрі қосуға болады; дегенмен, қарастырылып отырған кластерлік типтегі модельде негізгі PBE тәсілінің TiO_2 бетін қатаң бекітумен жеткілікті.

2. Жалпақ сәулелік негіз және кесу энергиясы.

Электрондардың толқындық функцияларын көрсету үшін жалпақ сәулелік негіз қолданылады. Толқындық функциялар үшін кесу энергиясы (E_{cutwfc}) ≈ 60 -60 Ry деңгейінде, ал зарядтар тығыздығы үшін (E_{cutrho}) E_{cutwfc} -ден шамамен сегіз есе, яғни ≈ 320 -600 Ry деңгейінде орнатылады. Мұндай мәндер planewave компонентінің санын жоғары көтермей, толық энергияны есептеудің жеткілікті дәлдігіне кепілдік береді.

3. К-нүктелік тор.

Модель үлкен "вакуумдық қораптағы" кластер болғандықтан, оны Γ ($k = (11,1)$) жалғыз k -нүктесімен шектеу әдетке айналған. Бұл алмаз торлардағы артық есептеулерді жояды және оқшауланған жүйенің фрагментін модельдеу үшін жеткілікті.

4. Энергия мен ядро конвергенциясы.

Өздігінен сәйкес келетін өрістің итерациялық жүйесі (SCF) қайталанулар арасындағы $\Delta E \leq 10^{-7}$ Ry энергиясының өзгеруінің қатаң шекті мәніне реттеледі, бұл бірнеше эВ деңгейіндегі энергия айырмашылықтарын есептеу дәлдігін қамтамасыз етеді. Яғни, күштің атомға өзгеру критерийі (күштерге арналған конвергенция) геометриялық оңтайландыру жоғары қалдық деформациялармен аяқталуы үшін шамамен 30-6 Ry/Bohr орнатылады.

5. Жағылған және электрондық температура

Кластердің реттелген энергия деңгейлері үшін ені 0.02-0.03 Ry болатын Гаусс немесе жағылу әдісі (Gaussian/Marzari-Vanderbilt smearing) қолданылады. Бұл UO_2^{2+} жүйесінде жартылай толтырылған күйлер болған кезде SCF айналымды тұрақтандыруға көмектеседі, бірақ энергия айырмашылықтарына айтарлықтай әсер етпейді, себебі кластерлік модельдегі кванттау қатаң шектелген.

6. Жалған потенциалдар.

Есептеулерде жалған потенциал ретінде Pslibrary 1.1.0 кітапханасы, соның ішінде Ti қолданылды. PBE-spn-ervjkl, O. PBE-n-rtiop және U. PBE-spf-nsdfrg сәйкесінше Ti, o және U үшін 1.0.0 нұсқасы. Бұл уранның ауыр элементінің электронды құрылымын, сондай-ақ TiO_2 (111) + UO_2^{2+} жүйесіндегі өзара әрекеттесу дәлдігін дұрыс есепке алуға мүмкіндік береді. Негізгі нәтижелер 4 кестеде көрсетілген.

Кесте-4. Псевдопотенциалдардың негізгі нәтижелері

Жүйе	E_{tot} (Ry)	E_{tot} (eV)
Таза кластер TiO_2	-75.345598	-3010.16
Жекеленге комплекс UO_2^{2+}	-142.987236	-3790.46
$TiO_2 + UO_2^{2+}$ (бірге)	-218.333314	-5044.80

Гидроксид түріндегі Бейорганикалық сорбенттерді синтездеу әдістері белгілі бір дайындықтан кейін табиғи және композициялық сорбенттердің бетіне тиісті гелдерді тікелей тұндыру жүйесіне негізделген. Жергілікті шамадан тыс қанықтыру жағдайында тікелей тұндыру гидроксидтердің жоғары дисперсті және рентген-қатты жауын-шашындарын алуды қамтамасыз етеді. Сорбенттерді синтездеу кезінде металл тұздарының бастапқы ерітінділері ретінде металдардың азот қышқылы тұздарының ерітінділерін пайдалану қажет [20-21]. Бұл жағдайда көптеген металл гидроксидтерінің

жауын-шашынында негізгі тұздардың қоспасы болмайды. Күкірт қышқылы ерітінділерінен гельдерді тұндыру кезінде негізгі тұздар әрқашан гидроксидтерде болады. Бұған гелді жуу қажет сульфат иондары ұзағырақ және үлкен көлемдегі суды тұтынуды қажет етеді. Гидроксид тұндырғыштары натрий гидроксиді немесе аммиак ерітінділері болуы мүмкін.

Біртекті және аморфты гельдер аммиакты қолдану арқылы алынады [22-23-24].

Бұл мақалада сорбенттерді әзірлеу олардың уранға қатысты сорбциялық қасиеттерін сынаумен қатар жүргізілді. Сорбенттерді алу тәсілдерін әзірлеу процесінде [25-26] көздерінің деректері, осымен алынған сорбенттердің технологиялық сынақтарының нәтижелері пайдаланылды. Мақала барысында әр түрлі сорбенттердің 16 түрі өзгертіліп, сыналды. Сондай-ақ, диссертацияда ұнтақ шунгит пен цеолиттің (-0,2 мм), ірі түйіршікті шунгит пен цеолиттің (+0,5 - 1,0 мм), ұнтақ фосфогипстің (-0,1 мм) және оның түйіршіктеу өнімінің (7÷9 мм) уранға қатысты сорбциялық қабілеті тәжірибелік түрде зерттелген. Құрамында уран бар ерітіндіден, техногендік және гидроминералды шикізаттан уранды сорбциялау үшін біз төменде көрсетілген бастапқы шунгитті, цеолитті және фосфогипсті модификациялаудың мынадай тәсілдерін әзірледік.

1. Ірі түйіршікті шунгитті мыс (II) және никель гидроксидтерімен модификациялау [27-28-29]. Сорбентті модификациялаудың таңдалған әдісіне сәйкес, көлемі +0,6-1,2 мм және салмағы 1,6 г болатын шунгит ілмегі 13 см³ химиялық стаканға орналастырылды. Әрі қарай, стаканға Cu²⁺ 0,7214 г/дм³ және Ni²⁺ 2,8097 г/дм³ концентрациясы бар мыс (II) және никель нитраттарының 19,2 см³ ерітіндісі және үнемі араластыра отырып, 9,3 см³ натрий гидроксиді ерітіндісі құйылды (соңы. 400 г/дм³). Алынған қоспаны бөлме температурасында 20 минут араластырды. Әрі қарай, араластыру тоқтатылды және шунгитке отырғызылмаған гидроксидтердің суспензиясы стаканнан шығарылды. Модификацияланған шунгитті гидроксидтер суспензиясынан тазарту операциясы 120 см³ көлеміндегі тазартылған суды пайдаланып тағы 4÷3 рет қайталанды. Осы модификация нәтижесінде алынған шунгит 90 °C дейін кептірілді тұрақты масса. Модификацияланған шунгит бір реттік модификацияда қолданылатын режимде қосымша екі және төрт реттік модификацияға ұшырады.

Сорбцияның энергетикалық сипаттамасы

Адсорбциялық энергия біріктірілген жүйенің толық энергиясы мен бөлек компоненттердің жалпы энергиясының айырмашылығы ретінде есептеледі.

Адсорбция энергиясы:

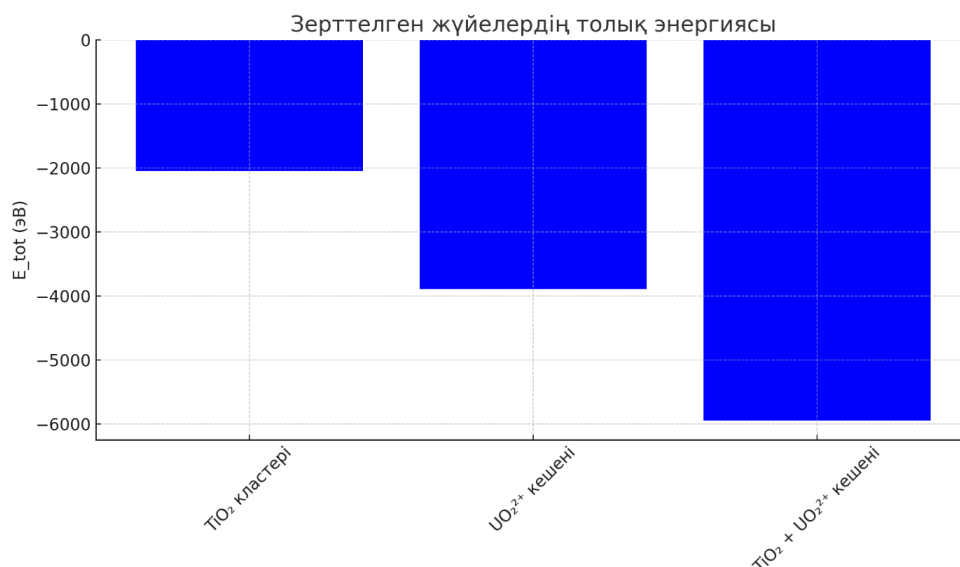
$$E_{\text{ads}} = E_{\text{TiO}_2 + \text{UO}_2} - (E_{\text{TiO}_2} + E_{\text{UO}_2}) = -6944.80 - (-2030.11 - 3890.48) = -4.29 \text{ eV} \quad (1)$$

Алынған -4.3 eV мәні оксидті беттердегі UO₂²⁺ экзотермиялық адсорбциялық кешендеріне сәйкес келеді және уран ионы мен TiO₂ беті арасындағы берік химиялық байланысты көрсетеді.

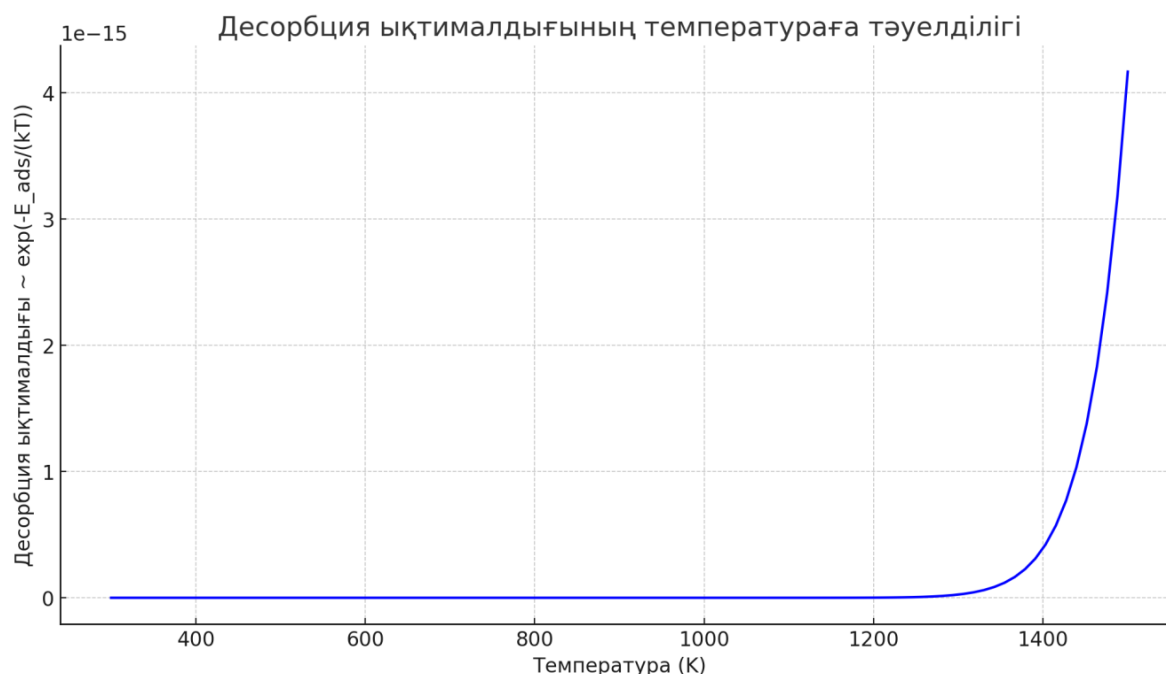
300 K температурада бөлшектің бір түрінің жылу энергиясы $kt \approx 0.026 \text{ eV}$, $kT \approx 0.026 \text{ eV}$, бұл адсорбциялық энергия мөлшерінен едәуір аз $\approx 5 \text{ eV}$. Осылайша, осы жағдайларда термиялық десорбция ықтималдығы Больцман факторымен сипатталады:

$$\exp\left(-\frac{E_{\text{ads}}}{kT}\right) \approx \exp\left(-\frac{4.2}{0.016}\right) \sim 10^{-36} \quad (2)$$

Бұл іс жүзінде нөлге тең. Сонымен, бөлме температурасында TiO_2 -дағы UO_2^{2+} сорбциясы қайтымсыз процесс болып табылады және десорбция үшін 2000К-ден жоғары температура қажет.



Сурет 5. Біріктірудің ең төменгі (ең тұрақты) энергия конфигурациясына қалай әкелетінін көрсететін үш жүйенің толық энергиясының салыстырмалы гистограммасы



Сурет 6. $\exp(-E_{\text{ads}}/(kT))$ десорбциялық ықтималдығының 300-1500К жиілігінде температураға тәуелділігі, бұл $T \gg 1000\text{K}$ дейін өздігінен десорбцияның өте төмен ықтималдығы

Бұл нәтижелер UO_2^{2+} – TiO_2 сорбциялық кешенінің жоғары тұрақтылығын және жиілігінің қайтымдылығы үшін температураның айтарлықтай жоғарылау қажеттілігін анық көрсетеді.

Геометрикалық анализ

$\text{TiO}_2 + \text{UO}_2^{2+}$ ге фрагментін геометриялық қалпына келтіру барысында өзара әрекеттесу күштерін және атомдардың сорбциялық кешен түзілуіне бейімделуін көрсететін байланыс ұзындығы мен бұрыштарында, бірақ тән ерекшеліктерғана байқалады.

Алғашқы модельде 1,945 Å болған алмаз бетіндегі ең жақын Ti-O байланысы оңтайландырудан кейін 1,952 Å дейін созылды. Мұндай шамалы өсу ($\approx 0,007$ Å) UO_2^{2+} ионы жақындаған кезде титанның айналасындағы электрон тығыздығының әлсіз қайта бөлінуін көрсетеді. Беттік оттегінің координациясы сорылу күштердің әсерінен әлсіреп, аздап "ашылады", бұл титан–оттегі сұлбасының уран фрагментімен әсерлесуге бейімделуін көрсетеді.

O-U-O сызықтық фрагменті аздап асимметрияға ұшырады: бастапқыда екі байланыс 1,800 Å болды, ал оңтайландырудан кейін олардың ұзындығы сәйкесінше 1,790 Å және 1,815 Å болды. Бір байланыстың қысқаруы (0,010 Å-ге) және екіншісінің ұзаруы (0,015 Å-ге) UO_2^{2+} оттегерінің бірі қарама-қарсы TiO_2 -мен тығыз әрекеттесетінін көрсетеді. Бұл экзотермиялық сорғылау кешендерге тән, мұнда ионның бір жағы электронды бұлттың жергілікті өзгеруіне байланысты "тартылады".

Модельдегі титан атомы мен уран арасындағы бастапқы ара қашықтық 3,200 Å болды және жөнделу нәтижелері бойынша 3,081 Å дейін азаяды. 0,119 Å аббревиатурасы Ti-U байланысының беткі оттегі арқылы көрінетін электронды және ішінара үйлестіру компоненті туралы айтады. Бұл кішірею уран фрагментінің металл матрицасына "жақындағанын" көрсетеді, бұл сорбциялық өзара байланысуды күшейтеді.

Алмаз Ti –нің жергілікті үйлестіруін сипаттайтын O-Ti-O бұрышын біршама өзгерді: $101,0^\circ$ -тан $101,4^\circ$ -қа дейін. Бұл титанның координациялық ортасының елеусіз өзгеруі кезінде тұрақты беткі құрылымның сақталуын көрсетеді. Яғни, O-U-O бұрышы, алғашқы модельде іс жүзінде сызықтық ($179,8^\circ$), өзгертудерн кейін сәл $179,5^\circ$ дейін төмендеді.

Идеал сызықтықтан мұндай өзгеріс бетпен өзара әрекеттесу уран–оттегі кластерінің түзу пішіннен минималды, бірақ айқын өзгеруіне әкелетінін көрсетеді.

Жалпы алғанда, аталған өзгерістер бетінің титан–оттегі қаңқасының да, сызықтық уран–оттегі фрагментінің де орташа бейімділігін көрсетеді.

Байланыстардың әлсіз ұзаруы мен қысылуы, Ti-U қашықтығының азаюы және бұрыштардың шамалы деформациясы TiO_2 -дағы UO_2^{2+} адсорбциясы кешеннің екі құрамдас бөлігінің жалпы құрылымдық тұтастығын сақтай отырып, теңдестірілген электронды тығыздықты қайта бөлу арқылы жүретінін көрсетеді.

Нәтижелерді талдау

$\text{TiO}_2(111)$ бетінде UO_2^{2+} адсорбциясының энергиясы шамамен -4,3 эВ 7-суретте болып, 300 K кезінде $kT \approx 0,026$ эВ жылулық энергиясынан едәуір артық. Бұл UO_2^{2+} ионының

бетке мықтап бекінуін және десорбцияның термиялық жолмен кері қайтуының мүмкін еместігін көрсетеді.

Геометриялық өзгерістер минималды: Ti-O байланысының ұзындығы тек 0,007 Å өзгеріп, U-O фрагментінде 0,010-0,015 Å өзгеріс байқалды; ең үлкен деформация – Ti-U арақашықтықтың 0,119 Å-ге азаюы, екінші 7-суретте. Бұл TiO₂ кристалдық торының негізгі құрылымын өзгертпей, Сорғылаудан кейін де деформация деңгейінің төмен екенін көрсетеді.



Сурет 7. TiO₂(111) бетінде UO₂²⁺ сорғылау энергиясы



Сурет 8. Ti – O байланысының ұзындығы өзгерісі

Практикалық маңызы:

Шунгиттегі уранның салмақ құрамы салмағы 0,12% құрайды. Сорғылау нәтижесінде сорбент алынды, онда уранның салмақ концентрациясы бастапқы көл суындағы құрамымен салыстырғанда 80000 есе артмады ($0,12 / 0,0000015 = 80000$). Егер шунгиттің 2 г/см³ ставкасына тең көлемді тығыздығын алсақ, онда уранның оның сорғылау нәтижелері бойынша көлемді концентрациясы 160 000 рет (80 000 стакан $2 = 160 000$) ставканы құрады. Осылайша, Алакөл көлінің суынан 160 000 дм³ көлемді ірі түйіршікті Шунгитпен уранды сорғылау кезінде сыналған режимде уранды 1 дм³ көлемді Шунгитке толығымен аударуға болады. Бұл жағдайда сорбенттегі уранның көлемдік құрамын 2,4 г/дм³ құрайды ($((0,12 \cdot 1000 / 100) \cdot 2 = 2,4)$). Уранмен қаныққан шунгиттен уранды десорбциялау үшін арзан элюентті пайдаланған кезде, көлемі 0,5 дм³, қажетті элюент көлемі 1,3 дм³ алынады. Содан кейін уранның толық десорбциясымен элюенттің көрсетілген көлемімен уран құрамын 1 г/дм³ болатын элюат алуға болады ($0,04 \cdot 1 / 1,3 = 0,923$). Элюаттағы уранның көрсетілген құрамы оны химиялық тұндыру үшін пайдалануға мүмкіндік береді.

Сұлбалар көрсеткендей, ұсынылған жүйе жоғары адсорбциялық тұрақтылық және минималды құрылымдық деформациялар беру арқылы, уранды бөлу жүйелерін жетілдіруге негіз қалауға қабілетті.

Қорытынды

Бұл Мақалада уран(VI) иондарының MTA4803PF және MTA4603 PFSO₄ сорбенттерімен, яғни TiO₂-модификацияланған композициялық материалдармен өзара әрекетін кешенді түрде зерттелді. Тәжірбелік изотерма талдауы (Langmuir, Freundlich) және кинетикалық модельдеу (псевдо-екінші ретті деңгей) көрсеткендей, MTA-сорбенттердің уранды жоғары сыйымдылықпен (десятка мг/г шкаласында) сору тиімділігі рН, температура және бастапқы концентрацияға тікелей тәуелді. TiO₂-мен модификациялау адсорбциялық энергияны $\sim -4,27$ эВ дейін күшейтіп, уранил-сорбент кешенінің тұрақтылығын арттырды.

Әзірленген сорбенттер үшін 1 г сорбентке сәйкесінше $1,07 \div 6,75$ және $12,40 \div 95,19$ мг уранның үлгілік ерітінділерінен уранды сорбциялауға қатысты құрамы бар до және ПДОЕ шамалары белгіленді, бұл техногендік және гидроминералдық шикізаттан уранды сорбциялау технологиясын таңдауға негізді түрде жақындауға мүмкіндік береді. Үлгідегі ерітінділерден уранды сорбциялау үшін пайдаланғаннан кейін әзірленген сорбенттердегі уран мөлшері массалардың $1,23 \div 8,69\%$ құрады.

Зерттеулер барысында алынған Бейорганикалық сорбенттер уранның кендерден жерасты және гидрометаллургиялық шаймалау сатысынан ерітінділерден уранды Сорғылау кезінде қолданылатын органикалық шайырлармен салыстырылатын уран бойынша сорбциялық сыйымдылығымен сипатталатыны көрсетілген. Жұмыста алынған сорбенттердің бұл сипаттамасы оларды көрсетілген ерітінділерден уран сорбциясын технологиялық сынау үшін ұсынуға мүмкіндік береді.

Осы нәтижелерге сүйене отырып, уранды тазарту жүйелерінде TiO_2 -модификацияланған сорбенттерді рН және температура режимдерін оңтайландыра отырып қолдану ұсынылады. Осы нәтижелер экологиялық тазарту технологиялары мен оксидтік жартылай өткізгіштер саласында жаңа практикалық шешімдер мен ғылыми бағыттарды ашып көрсетеді.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі (Грант No AP19676626 «MOF декорированные трековые мембраны для селективной и эффективной сорбции ионов урана (IV): теоретические расчеты и экспериментальная проверка») қаржыландырады.

Авторлардың қосқан үлесі

Абуова Ф.У. – мәтінді және библиографияны жазу, тәжірибелік деректерді өңдеу.

Сатанова Б.М. – Зерттеуге жетекшілік ету, соңғы нұсқасын бекіту мақаланың жариялануы.

Абуова А.У. – тәжірибе жүргізу, тәжірибелік құрал-жабдықтарды дайындау, эксперимент барысында деректер жинауды ұйымдастыру және бақылау.

Усен Е.Б., Ерланқызы А., Акамбаева Д.М. – мақаланың тұжырымдамасына өз үлесін қосты.

Солтанбек Н.С. – мақала мәтініндегі бірқатар есептеулерді орындап, өрнек немесе формула түріндегі нәтижелерді алған. Ілеспе хатты әзірлеп, редакцияға жолдауды іске асырды.

Маратұлы С., Момбай А.Н. – мақаланың безендірілуіне үлес қосты.

Әдебиеттер тізімі

1. Johnson B.E, Santschi P.H, Chuang C.Y, Otosaka S, Collection of Lanthanides and Actinides from Natural Waters with Conventional and Nanoporous Sorbents, Environ. Sci.Technol. № 20, 1121–1125(2015), DOI: <https://doi.org/10.1022/es204192r>
2. Zhang W, Ye G, Chen J, New Insights into the Uranium Adsorption Behavior of Mesoporous SBA-15, Silicas Decorated with Alkylphosphine Oxide Ligands // RSC Adv. V. 6. № 2, 1210–1217(2016), DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA55636B>
3. Johnson B.E, Santschi P.H, Shane Addleman R, Douglas M, Davidson J.D, Fryxell G.E., Schwantes J.M. Collection of Fission and Activation Product Elements from Fresh and Ocean Waters: a Comparison of Traditional and Novel Sorbents, Appl. Radiat. Isot. № 1, 205–216(2021), DOI <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.07.035>.
4. Ефранов Е, Рений: на острие технического прогресса, Металлы Евразии. №3, 36—38(2017).
5. Фазлуллин М. И, Скважинное подземное выщелачивание металлов, Вестник российской академии естественных наук № 5, 40–50(2013).
6. Трошкина И. Д., Веселова О. А., Вацура Ф. Я., Захарьян С. В., Серикбай А. У, Сорбция рения из сернокислых растворов импрегнатами, содержащими триалки- ламин, Известия вузов. Цветная металлургия. №5, 42–49(2021).

7. Загародняя А. Н, Абишева З. С, Шарипова А., Жумабеков Ж. Ж, Полупромышленные испытания сорбционной технологии рения из сточных вод от промывки металлургических газов межного завода, Цветные металлы. №1, 49—53(2016).
8. Блохин А.А, Михайленко М. А, Процессы ионообменной сорбции в гидрометаллургии рения, Цветный металлы. №10, 18—27(2016).
9. Василенок О. П., Рузиев Б. Т., Иванова И. А, Роль и влияние окислителей, применяемых при подземном выщелачивании урана, на попутное извлечение рения, Горный журнал. №9, 74—77(2008).
10. Рычков В. Н, Смирнов А. Л, Горцунова К. Р, Сорбция урана из растворов подземного выщелачивания сильноосновными анионитами, Радиохимия. №1, 35–38(2014).
11. Курбанов М. А, Шарафутдинов У. З, Каримов Н. М, Основные принципы исследований в области технологии извлечения рения из растворов подземного выщелачивания урана в условиях РУ-5 НГМК, Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях Индустрии 4.0. Сборник материалов Международной научно-практической конференции, 114—115(2014).
12. M. T. Kehinde Shola Obayomi, S. Y. Lau, M. Danquah, T. Chiong, Advances in graphene oxide based nanobiocatalytic technology for wastewater treatment, (2022), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100647>
13. A.K. Prajapati, M.K. Mondal, Comprehensive kinetic and mass transfer modeling for methylene blue dye adsorption onto CuO nanoparticles loaded on nanoporous activated carbon prepared from waste coconut shell, J. Mol. Liq. №307, 112949, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112939>
14. S. Biswas, J. Fatema, T. Debnath, T.U. Rashid, Chitosan–clay composites for wastewater treatment: a state-of-the-art review, ACS ES T Water №1(5), 1055–1085(2021), DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00207>
15. S. Sarode, et al., Overview of wastewater treatment methods with special focus on biopolymer chitin-chitosan, Int. J. Biol. Macromol. №121, 1086–1100(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.089>
16. E. Cohen, E. Poverenov, Hydrophilic chitosan derivatives: synthesis and applications, Chem. - A Eur. J. №28(67), 5–55(2022), DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.202202156>
17. P. Pal, A. Pal, K. Nakashima, B.K. Yadav, Applications of chitosan in environmental remediation: a review, Chemosphere №266, 128934(2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128934>
18. M. Sarabaegi, M. Roushani, H. Hosseini, S.J. Hoseini, M. Bahrami, Facile synthesis of a covalent organic framework (COF) based on the reaction of melamine and trimesic acid incorporated electrospun nanofiber and its application as an electrochemical tyrosinamide aptasensor, New J. Chem. №44 (35), 14922–14927(2020), DOI: <https://doi.org/10.1039/d0nj02837a>.
19. A. Alkhouzaam, H. Qiblawey, M. Khraisheh, M. Atieh, M. Al-Ghouti, Synthesis of graphene oxides particle of high oxidation degree using a modified Hummers method, Ceram. Int. №46 (15), 23997–24007(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.177>
20. A. Kumar, J. Jeyabalan, V. Priyan, C. Charan Patra, S. Narayanasamy, Fabrication of a novel biopolymer adsorbent with high adsorptive capacity towards organic dyes, Ind. Crop. Prod. №203 (July), 117166 (2023), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117166>
21. X. Zhong, Z. Lu, W. Liang, B. Hu, The magnetic covalent organic framework as a platform for high-performance extraction of Cr (VI) and bisphenol a from aqueous solution, J. Hazard. Mater. №393(February), 122353(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122353>

22. H. Ge, Z. Ma, Microwave preparation of triethylenetetramine modified graphene oxide/chitosan composite for adsorption of Cr (VI), Carbohydr. Polym. №131 (Vi), 280–287 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.025>.

23 J. Aixart, F. Díaz, J. Llorca, J. Rosell-Llompart, Increasing reaction time in Hummers' method towards well exfoliated graphene oxide of low oxidation degree, Ceram. Int. №47 (15), 22130–22137(2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.235>

24. C. Buttersack, Modeling of type IV and v sigmoidal adsorption isotherms, PCCP №21 (10), 5614–5626(2019), DOI: <https://doi.org/10.1039/c8cp07751g>.

25. C.N. Lunardi, A.J. Gomes, F.S. Rocha, J. De Tommaso, G.S. Patience, Experimental methods in chemical engineering: zeta potential, Can. J. Chem. Eng. № 99 (3), 627–639(2021), DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.23914>

26. E.D. Revellame, D.L. Fortela, W. Sharp, R. Hernandez, M.E. Zappi, Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: a review, Clean. Eng. Technol. №1 (December), 100032 (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>

27. R. Ezzati, Derivation of pseudo-first-order, pseudo-second-order and modified pseudo-first-order rate equations from Langmuir and Freundlich isotherms for adsorption, Chem. Eng. J. №392 (September), 23705(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123705>

28. Z. You, N. Zhang, Q. Guan, Y. Xing, F. Bai, L. Sun, High sorption capacity of U(VI) by COF-based material doping hydroxyapatite microspheres: kinetic, equilibrium and mechanism investigation, J. Inorg. Organomet. Polym. Mater. №30(6), 1966–1979(2020), DOI: <https://doi.org/10.1007/s10904-019-01420-9>

**Абуова Ф.У., Сатанова Б.М.*, Абуова А.У., Усен Е.Б., Солтанбек Н.С., Маратұлы С.,
Момбай А.Н., Ерланқызы А., Акамбаева Д.М.**

*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
(*E-mail: abuova_fu@enu.kz, satanova_bm_2@enu.kz, abuova_au@enu.kz, sns.nurgul@mail.ru,
sultan2609@enu.kz, erbol_usen@mail.ru, adeliyimm@mail.ru, ajdanaerlankyzy14@gamil.com,
din.akambaeva@icloud.com)*

Исследование сорбционных свойств и квантово-химическое моделирование композиционных материалов по отношению к ионам урана (VI)

Аннотация. Приведены результаты проведенных опытов сорбции урана и их совместного присутствия в различных анионитах. Уран хорошо усваивается только при приготовлении анионита в виде сульфата и перемещается из сульфатсодержащих и менее концентрированных Карбонатсодержащих растворов в сорбент. Проведены исследования по попутному получению технологических растворов подземного выщелачивания урана с содержанием рения до 1,0 мг/л и концентрацией серной кислоты – до 3 г/л. В процессе подземного выщелачивания рений, как и уран, переходит в раствор в виде растворимых ионов. Задача получения и выделения рения тесно связана с формой существования ионов в растворе. Для сравнительной оценки

сорбционных свойств некоторых современных анионитов при транспортировке урана и рения были проведены исследования совместной сорбции этих металлов из модельных сульфатных и бикарбонатных растворов. При совместном сорбировании урана и рения из растворов целесообразно применять сильноосновные аниониты макропористой структуры. Лучшие результаты по совместной сорбции из модельных растворов были получены на анионите марки В0-020, где статическая ем - кость по урану составила 41,2 мг/г, а по рению – 16,5 мг/г, в результате чего было обнаружено, что сорбция перренат-ионов в анионитах происходит в соответствии с ионообменным механизмом. Исследования выявили кинетику сорбции урана и рения из растворов серной кислоты и бикар – боната в сильноосновных анионитах В0-020 и ВD-706, что обуславливает высокую эффективность их применения.

Ключевые слова: сорбция, десорбция, сорбент, элюент, элюат, масс-спектрометрия

Abuova F.U., Satanova B. M.*, Abuova A.U., Usen E.B., Soltanbek N.S., Maratlyly S., Mombai A.N., Erlankyzy A, Akambayeva D.M.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

(*E-mail: *abuova_fu@enu.kz, *satanova_bm_2@enu.kz, abuova_au@enu.kz, sns.nurgul@mail.ru, sultan2609@enu.kz, erbol_usen@mail.ru, adeliymm@mail.ru, ajdanaerlankyzy14@gamil.com, din.akambaeva@icloud.com*)

Study of sorption properties and quantum-chemical modeling of composite materials in relation to uranium (VI) ions

Abstract. The results of the conducted experiments on uranium sorption and their cohabitation in different anionites are presented. Uranium is well absorbed only when anionite is prepared in the form of sulfate and is converted from sulfate-containing and less concentrated, carbonate-containing solutions to a sorbent. Research has been carried out on The Associated production of technological solutions for underground leaching of uranium with a rhenium content of up to 1.0 mg/L and a concentration of sulfuric acid - up to 3 g/l. In the process of underground leaching, rhenium, like uranium, passes into solution in the form of soluble ions. The task of obtaining and separating rhenium is closely related to the form of life of ions in solution. For a comparative assessment of the sorption properties of some modern anionites in the transport of uranium and rhenium, studies have been conducted on the joint sorption of these metals from model sulfate and bicarbonate solutions. During joint sorption of uranium and rhenium from solutions, it is advisable to use strong-based anionites of a macroporous structure. The best results for joint sorption from model solutions were obtained in anionite grade B0-020, in which the static em - bone for uranium was 41.2 mg/g and for rhenium – 16.5 mg/g, as a result of which it was found that the sorption of perrenate ions in anionites occurs according to the ion exchange mechanism. Studies have revealed the kinetics of uranium and rhenium sorption from sulfuric acid and Bicar - Bonate solutions in strong-base anionites B0-020 and VD-706, which determines the high efficiency of their use.

Keywords: sorption, desorption, sorbent, eluent, eluate, mass

References

1. Johnson B.E, Santschi P.H, Chuang C.Y, Otosaka S, Collection of Lanthanides and Actinides from Natural Waters with Conventional and Nanoporous Sorbents, Environ. Sci.Technol. № 20, 1121–1125(2015), DOI: <https://doi.org/10.1022/es204192r>
2. Zhang W, Ye G, Chen J, New Insights into the Uranium Adsorption Behavior of Mesoporous SBA-15, Silicas Decorated with Alkylphosphine Oxide Ligands // RSC Adv. V. 6. № 2, 1210–1217(2016), DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA55636B>
3. Johnson B.E, Santschi P.H, Shane Addleman R, Douglas M, Davidson J.D, Fryxell G.E., Schwantes J.M. Collection of Fission and Activation Product Elements from Fresh and Ocean Waters: a Comparison of Traditional and Novel Sorbents, Appl. Radiat. Isot. № 1, 205–216(2021), DOI <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.07.035>.
4. Efranov E, Renii: na osrtie technisheskogo progressa[Rhenium: At the Cutting Edge of Technological Progress], Metali Eurasia[Metals of Eurasia], №3, p.36—38(2017) [in Russian]
5. Fazlullin M. I, Skvajinnoe podzemnoe vischelachivanie metallov[In-situ leaching of metals], Vestnik rossiiskoi akademii estestvennih nauk[Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences], № 5, p. 40–50(2013) [in Russian]
6. Troshkina I. D, Veselova O. A, Vatsura F. Ya, Zakharyan S. V, Serikbay A. U, Sorbciya reniya iz sernokislih rastvorov impregnatami_ soderjaschimi trialkilamin [Sorption of rhenium from sulfuric acid solutions using impregnates containing trialkylamine], Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya [Universities News. Non-ferrous Metallurgy]. №5, p. 42–49(2021) [in Russian]
7. Zagarodnyaya A. N, Abisheva Z. S, Sharipova A. S, Zhumabekov Zh. Zh, Polupromishlennye ispitaniya sorbcionnoi tehnologii reniya iz stochnih vod ot promivki metallurgicheskikh gazov mejnogo zavoda [Pilot tests of sorption technology of rhenium from wastewater from washing of metallurgical gases of the inter-plant], Cvetnie metallic [Non-ferrous metals]. №1, p. 49—53(2016) [in Russian]
8. Blokhin A. A, Mikhailenko M. A, Processi ionoobmennoi sorbcii v gidrometallurgii reniya [Ion-exchange sorption processes in rhenium hydrometallurgy], Cvetnie metallic [Non-ferrous metals] №10, p. 18—27(2016) [in Russian]
9. Vasilenok O. P, Ruziev B. T, Ivanova I. A, Rol i vliyanie okislitelei primenyaemih pri podzemnom vischelachivanii urana na poputnoe izvlechenie reniya [The role and influence of oxidizing agents used in underground leaching of uranium on the associated extraction of rhenium], Gornyy zhurnal [Mining magazine], №9, p. 74—77(2008) [in Russian]
10. Rychkov V.N, Smirnov A. L, Gortsunova K. R, Sorbtsiya urana iz rastvorov podzemnogo vyshchelachivaniya sil'noosnovnymi anionitami [Sorption of uranium from in-situ leaching solutions using strongly basic anion exchangers], Radiokhimiya [Radiochemistry]. №1, p. 35–38(2014) [in Russian]
11. Kurbanov M. A, Sharafutdinov U. Z, Karimov N. M, Osnovnyye printsipy issledovaniy v oblasti tekhnologii izvlecheniya reniya iz rastvorov podzemnogo vyshchelachivaniya urana v usloviyakh RU-5 NGMK [Basic principles of research in the field of technology for extracting rhenium from uranium in-situ leaching solutions under conditions of RU-5 NMMC], Ratsional'noye ispol'zovaniye mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya v usloviyakh Industrii 4.0. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsi [Rational use of mineral and man-made raw materials in the context of Industry 4.0. Collection of materials of the International scientific and practical conference]. p.114—115(2014) [in Russian]

12. M. T. Kehinde Shola Obayomi, S. Y. Lau, M. Danquah, T. Chiong, Advances in graphene oxide based nanobiocatalytic technology for wastewater treatment, (2022), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100647>
13. A.K. Prajapati, M.K. Mondal, Comprehensive kinetic and mass transfer modeling for methylene blue dye adsorption onto CuO nanoparticles loaded on nanoporous activated carbon prepared from waste coconut shell, J. Mol. Liq. №307, 112949, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112939>
14. S. Biswas, J. Fatema, T. Debnath, T.U. Rashid, Chitosan–clay composites for wastewater treatment: a state-of-the-art review, ACS ES T Water №1(5), 1055–1085(2021), DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00207>
15. S. Sarode, et al., Overview of wastewater treatment methods with special focus on biopolymer chitin-chitosan, Int. J. Biol. Macromol. №121, 1086–1100(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.089>
16. E. Cohen, E. Poverenov, Hydrophilic chitosan derivatives: synthesis and applications, Chem. - A Eur. J. №28(67), 5–55(2022), DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.202202156>
17. P. Pal, A. Pal, K. Nakashima, B.K. Yadav, Applications of chitosan in environmental remediation: a review, Chemosphere №266, 128934(2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128934>
18. M. Sarabaegi, M. Roushani, H. Hosseini, S.J. Hoseini, M. Bahrami, Facile synthesis of a covalent organic framework (COF) based on the reaction of melamine and trimesic acid incorporated electrospun nanofiber and its application as an electrochemical tyrosinamide aptasensor, New J. Chem. №44 (35), 14922–14927(2020), DOI: <https://doi.org/10.1039/d0nj02837a>
19. A. Alkhouzaam, H. Qiblawey, M. Khraisheh, M. Atieh, M. Al-Ghouti, Synthesis of graphene oxides particle of high oxidation degree using a modified Hummers method, Ceram. Int. №46 (15), 23997–24007(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.177>
20. A. Kumar, J. Jeyabalan, V. Priyan, C. Charan Patra, S. Narayanasamy, Fabrication of a novel biopolymer adsorbent with high adsorptive capacity towards organic dyes, Ind. Crop. Prod. №203 (July), 117166 (2023), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117166>
21. X. Zhong, Z. Lu, W. Liang, B. Hu, The magnetic covalent organic framework as a platform for high-performance extraction of Cr(VI) and bisphenol a from aqueous solution, J. Hazard. Mater. №393(February), 122353(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122353>
22. H. Ge, Z. Ma, Microwave preparation of triethylenetetramine modified graphene oxide/chitosan composite for adsorption of Cr(VI), Carbohydr. Polym. №131 (Vi), 280–287 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.025>
23. J. Aixart, F. Díaz, J. Llorca, J. Rosell-Llompart, Increasing reaction time in Hummers' method towards well exfoliated graphene oxide of low oxidation degree, Ceram. Int. №47 (15), 22130–22137(2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.235>
24. C. Buttersack, Modeling of type IV and v sigmoidal adsorption isotherms, PCCP №21 (10), 5614–5626(2019), DOI: <https://doi.org/10.1039/c8cp07751g>
25. C.N. Lunardi, A.J. Gomes, F.S. Rocha, J. De Tommaso, G.S. Patience, Experimental methods in chemical engineering: zeta potential, Can. J. Chem. Eng. № 99 (3), 627–639(2021), DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.23914>
26. E.D. Revellame, D.L. Fortela, W. Sharp, R. Hernandez, M.E. Zappi, Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: a review, Clean. Eng. Technol. №1 (December), 100032 (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>

27. R. Ezzati, Derivation of pseudo-first-order, pseudo-second-order and modified pseudo-first-order rate equations from Langmuir and Freundlich isotherms for adsorption, Chem. Eng. J. №392 (September), 23705(2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123705>

28. Z. You, N. Zhang, Q. Guan, Y. Xing, F. Bai, L. Sun, High sorption capacity of U(VI) by COF-based material doping hydroxyapatite microspheres: kinetic, equilibrium and mechanism investigation, J. Inorg. Organomet. Polym. Mater. №30(6), 1966–1979(2020), DOI: <https://doi.org/10.1007/s10904-019-01420-9>

Авторлар туралы мәліметтер

Абуова Ф.У. – PhD, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Сатанова Б.М. – хат-хабар авторы, PhD, оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан

Абуова А.У. – PhD, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Солтанбек Н.С. – PhD, оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан

Усен Е.Б. – Магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Маратұлы С. – Магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Момбай А.Н. – Магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Ерланқызы А. – Студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Акамбаева Д.М. – Студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Information about authors:

Abuova F. – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Satanova B. – the corresponding author, PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Abuova A. – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Usen E.B. – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Soltanbek N.S. – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Maratyly S. – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Mombai A.N. – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Erlankyzy A. – student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Akambayeva D.M. – student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Сведения об авторах:

Абуова Ф.У. – PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Сатанова Б.М. – автор для корреспонденции, PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Абуова А.У. – PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Усен Е.Б. – Магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Солтанбек Н.С. – PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Маратұлы С. – Магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Момбай А.Н. – Магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Ерланқызы А. – Студент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Акамбаева Д.М. – Студент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).