

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-142-150>
УДК 621.039.7

ТҮЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

В. В. Бакланов¹, Е. Т. Коянбаев², Н. М. Мухамедова^{1,3}, А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов¹,
А. А. Сабыртаева^{1*}, О. Өкен¹, Д. С. Кульбедин^{1,3}, Д. К. Бельгибаева^{1,3}

¹ Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатова, Қазақстан

² Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы, Курчатова, Қазақстан

³ Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: sabyrtayeva@nnc.kz

Осы жұмыста сорбент ретінде перлитті пайдалану арқылы селективті сорбция әдісімен сұйық радиоактивті қалдықтардың қатты формаларын алу бойынша кешенді зерттеу ұсынылған. Технологиялық процесс перлитті тұзқұрамды модельдік сұйық радиоактивті қалдықпен сіңдіруді, артық ылғалды жою үшін кептіруді, үлгілерді қалыптастыра отырып престоуді және оларды муфельді пеште кейінгі күйдіруді қамтиды. Күйдіру 300–500 °C температура аралығында 60 минут ұстап тұру арқылы жүргізілді. Оптикалық және сканерлеуші электрондық микроскопияны қолдана отырып жүргізілген микроқұрылымдық талдау күйдіру температурасы артқан сайын жоғары кеуекті құрылымнан неғұрлым тығыз әрі байланысқан микроқұрылымға ауысуды көрсетті. Температура 400 °C-қа дейін артқан кезде материалдың тығыздалуы айқын байқалады, алайда одан жоғары температура-ларда тығыздықтың шамалы төмендеуі байқалады. Зерттелген барлық температуралық диапазонда үлгілердің қаттылығы артады, бұл құрылымның механикалық тұтастығының артуын көрсетеді және микроқұрылымдық талдау деректерімен үйлеседі. Алынған нәтижелер перлит негізіндегі қатты формалардың құрылымы мен механикалық қасиеттерін қалыптастыруда күйдіру температурасының маңызды рөлін растайды және тұзқұрамды сұйық радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялау үшін ұсынылған тәсілдің перспективалылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: сұйық радиоактивті қалдықтар, иммобилизация, перлит, селективті сорбция, микроқұрылым, қаттылық.

КІРІСПЕ

Атом энергетикасы қазіргі энергетикалық жүйеде маңызды орын алады және электр энергиясын өндірудің ең ұзақ мерзімді әрі сенімді көздерінің бірі [1]. Атом энергетикасының дамуы және ядролық технологияларды энергетикада, өнеркәсіпте, медицинада және ғылыми зерттеулерде қолдану ауқымының кеңеюі нәтижесінде түзілетін радиоактивті қалдықтардың көлемі едәуір артты. Ядролық қондырғыларды пайдалану және олардың өмірлік циклінің әртүрлі кезеңдерінде ядролық технологияларды қолдану барысында сұйық радиоактивті қалдықтар (бұдан әрі – СРҚ) түзіледі [2–4]. Қатты радиоактивті қалдықтардан айырмашылығы, СРҚ радионуклидтердің жоғары мобильділігімен, күрделі химиялық құрамымен және қоршаған ортада радиоактивті ластанудың таралу қаупінің жоғары болуымен сипатталады.

Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығында БН-350 реакторлық қондырғысын (РҚ) пайдалану және кейіннен демонтаждау барысында түзілген радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу бойынша жұмыстар жүргізіліп жатыр. Қабылданған тұжырымдамаға сәйкес [5], БН-350 РҚ-ны пайдаланудан шығарудың төртінші кезеңі сұйық радиоактивті қалдықтарды (СРҚ) қайта өңдеуге арналған. Олардың жалпы көлемі

шамамен 2730 м³ құрайды, ал жиынтық белсенділікте Cs-137 басым үлеске ие [6,7]. Аталған қалдықтардың негізгі ерекшеліктерінің бірі – БН-350 РҚ-ны пайдалану барысында түзілген тұздардың жоғары мөлшері. Суда диссоциацияланып, радиоактивті емес катиондар (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) және сәйкес аниондар түзетін еріген тұздардың жоғары концентрациясы СРҚ-ны қатты күйге көшірудің дәстүрлі әдістерінің тиімділігін төмендетеді [8]. СРҚ-ның құрамы мен көлемінің аталған ерекшеліктері сұйық фазаның көлемін азайтуға бағытталған тиімді қайта өңдеу технологияларын қолдану қажеттілігін айқындайды.

Осыған байланысты тұзқұрамды ортада тиімді жұмыс істейтін бейорганикалық сорбенттерді пайдалана отырып, радионуклидтердің селективті сорбциясын қолдану перспективалы бағыт болып саналады [9]. Зерттеулер көрсеткендей [10,11], селективті сорбция радионуклидтерді бөліп алуды және оларды қатты фазада шоғырландыруды қамтамасыз етеді және белсенділігі төмен және орташа деңгейдегі СРҚ-ны қайта өңдеудің әмбебап әрі технологиялық тұрғыдан меңгерілген әдісі болып табылады [12]. Сорбциялық материалдарды таңдауда олардың тұзқұрамды орталардың әсеріне төзімділігі және жоғары иондық жүктеме жағдайында сорбциялық қасиеттерін сақтау қабілеті ерекше маңызға ие. Бейорганикалық

ТҰЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

сорбенттердің ішінде химиялық тұрақтылығымен және қолжетімділігімен ерекшеленетін табиғи алюмосиликатты материалдар қызығушылық тудырады. Осындай материалдардың бірі – дамыған кеуекті құрылымы бар аморфты минералды сорбент перлит, оны тұзқұрамды ерітінділерді тазарту үшін қолдану бірқатар зерттеулерде көрсетілген [13].

Перлиттің сорбциялық қасиеттерін зерттеуге арналған жұмыстарда бұл материалдың тұзқұрамды жүйелерге тән ерітінділердің жоғары иондық күш жағдайында элементтердің катиондық формаларын бөліп алу қабілетін сақтайтыны көрсетілген. Эксперименттік деректер перлиттің радиоактивті сулы орталардан цезийді бөліп алуда тиімді екенін дәлелдейді, бұл оны тұзқұрамды сұйық радиоактивті қалдықтардан Cs-137-ні селективті сорбциялау үшін бейорганикалық сорбент ретінде қарастырудың орындылығын растайды [14,15].

Осы жұмыс тұзқұрамды СРҚ-ны иммобилизациялау үшін перлитті бейорганикалық сорбент ретінде қолдану мүмкіндігін зерттеуге бағытталған. Жұмыстың жаңалығы Қазақстан Республикасының аумағында өндірілетін табиғи перлитті пайдалануында [16], сондай-ақ оны СРҚ-ны қайта өңдеуде қолданудың технологиялық тәсілін әзірлеуде болып табылады. Жұмыс аясында перлиттен ылғалды алдын ала жоюды, оны престоу әдісімен қалыптастыруды және кейіннен муфельді пеште термиялық өңдеуді қамтитын операциялар тізбегі ұсынылған, оның мақсаты – СРҚ-дан радионуклидтердің иммобилизациясын қамтамасыз ететін тығыздалған қатты керамикатәрізді өнім алу.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зертханалық зерттеулер жүргізу үшін құрамы БН-350 реакторлық қондырғысынан алынған нақты СРҚ сынамаларының химиялық талдау нәтижелері негізінде қалыптастырылған модельдік СРҚ дайындалды. Модельдік СРҚ-ның химиялық құрамы 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Модельдік СРҚ-ның химиялық құрамы

№	Атауы	Белгіленуі	масс. %
1	Калий хлориді	KCl	20,77
2	Кальций хлориді	CaCl ₂	0,06
3	Натрий сульфаты	Na ₂ SO ₄	11,04
4	Калий нитраты	KNO ₃	31,07
5	Натрий нитриті	NaNO ₂	0,26
6	Натрий силикаты	Na ₂ SiO ₂ * 9H ₂ O	0,46
7	Натрий гидроксиді	NaOH	0,39
8	Натрий карбонаты	Na ₂ CO ₃	16,75
9	Этандикарбон қышқылы	H ₂ C ₂ O ₄	19,21

Дайындалған модельдік СРҚ үлгісінің орташа тығыздығы 1,176 г/см³, еріген тұздардың жиынтық массалық концентрациясы шамамен 400 г/л, ал құрғақ қалдықтың концентрациясы 268,3 г/л құрады. Үлгіні алудың технологиялық процесінің сызбасы 1-суретте келтірілген.

Перлиттің десорбциялық тиімділігі мен механикалық беріктігін ескере отырып, тұзды қоспаларды байланыстыру үшін модельдік СРҚ мен перлиттің 1:6 массалық қатынасы қолданылды. Перлитті модельдік СРҚ-мен сіңдіру 24 сағат бойы



1-сурет. Күйдірілген үлгілерді алудың технологиялық сызбасы
(иллюстрация ЖИ көмегімен жасалған)

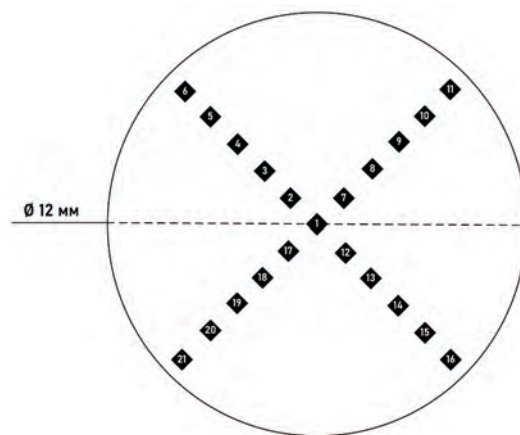
ТҰЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

жүргізілді, содан кейін материал 70–100 °C температурада тұрақты массаға жеткенге дейін кептірілді. Бұл шара натуралды СРҚ-мен (~120 °C) ықтимал жұмыс істеу кезінде цезийдің ұшқыш қосылыстарының сақталуын қамтамасыз етеді [17]. Үлгілерді салқындату ауада жүзеге асырылды. Кептірілген материал қолмен басқарылатын гидравликалық престі пайдаланып 40 бар қысымда алдын ала престоуге ұшыратылды. Қалыпталған үлгілер графитті фольгамен қапталған диаметрі 25 мм болатын вольфрам тигеліне орналастырылып, Nabertherm LE 6/11/R7 муфельді пешінде күйдірілді. Тигельдің ішкі диаметрі үлгілердің диаметрінен үлкен болғандықтан, үлгілердің тигель қабырғаларымен тікелей жанасуы болдырылмады. Үлгілердің тигель бетімен жанасуын алдын алу мақсатында графитті фольга бөлгіш қабат ретінде қолданылды. Күйдіру процесі аяқталғаннан кейін үлгілер пештің жұмыс камерасының ішінде бөлме температурасына дейін табиғи түрде салқындатылды. Күйдірілген үлгілер диаметрі $12 \pm 0,5$ мм және биіктігі $5,5 \pm 0,5$ мм цилиндр түрінде болды. Муфельді пештегі күйдіру режимдері 2-кестеде келтірілген, ал вольфрам тигелінің және алынған үлгінің сыртқы көрінісі 2-суретте көрсетілген.

2-кесте. Күйдіру режимдері

Үлгілердің атауы	Температура, °C	Ұстау уақыты, мин	Жүктеме массасы, г
№1	300±20	60	5
№2	350±20		
№3	400±20		
№4	450±20		
№5	500±20		

Алынған үлгілердің микроқұрылымы оптикалық микроскопия (ОМ) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістерімен зерттелді. ОМ-зерттеулер Vision TIM-5 оптикалық микроскопын қолдана отырып, шағылған жарықта, шашыратқыш



3-сурет. Қаттылықты өлшеу нүктелерінің орналасу геометриясы

оптикалық линзаны пайдалану арқылы диффузиялық жарықтандыру режимінде жүргізілді [18]. СЭМ-зерттеулер энергодисперсиялық спектрометриялық (ЭДС) қондырмасымен жабдықталған TM4000plus сканерлеуші электрондық микроскопында орындалды. Түсірілім алдын ала дайындалған үлгі бетінде (шлифтеу және жылтырату) $\times 1000$ үлкейту кезінде кері шашыраған электрондар (BSE) режимінде жүргізілді [19]. ЭДС-талдау барысында элементтердің спектрлерін жинау 1 сағат бойы жүзеге асырылды.

Күйдірілген үлгілердің қаттылығы Виккерс әдісі бойынша Qness 60M EVO автоматтандырылған микроқаттылық өлшегішінде өлшенді. Қаттылықты өлшеу әдістемесі ASTM C1327 [20] халықаралық стандартының ұсынымдары негізінде жүргізілді. Іздердің геометриясы және олардың үлгі бетіндегі таралуы 3-суретте көрсетілген.

Іздер ($n = 21$) күйдірудің біркелкілігін бағалау үшін диаметрі 12 мм үлгі бойынша радиалды түрде орналастырылды. Стандартқа сәйкес, іздер арасындағы және үлгінің шетінен арақашықтық диагональ ұзындығының 2,5 есесінен артық болды.



а)



б)

2-сурет. Вольфрам тигелінің (а) және күйдірілген үлгінің (б) сыртқы көрінісі

ТҰЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

Сынақтар барысында инденторға түсірілген жүктеме HV1 (9,807 Н) мәніне сәйкес келді, ал жүктеме астында ұстау уақыты 5 с құрады. Ұстау уақытының қысқартылуы үлгілердің морттығы мен кеуекті құрылымын ескере отырып таңдалды. Бұл ASTM C1327 стандартының керамикалық материалдарға арналған ұсынымдарына сәйкес жарықшақтардың пайда болуын болдырмай, қаттылықты өлшеудің дұрыстығын сақтауға мүмкіндік береді. Қаттылық мәндері аспаптың бағдарламалық қамтамасыз етуі арқылы тіркелді, содан кейін алынған деректер массиві негізінде орташа мән автоматты түрде есептелді. Егер ізді автоматты анықтау сенімсіз болған жағдайда, ізді сәйкестендіру $\times 20$ үлкейту кезінде жүргізілді.

Үлгілердің тығыздығы масса мен геометриялық өлшемдерді өлшеу негізінде есептік әдіспен анықталды. Көлем үлгілердің цилиндрлік пішіні болжана отырып есептелді [21]. Тығыздықтың анықталмағандығы бірнеше айнымалы функциялар үшін қателіктерді тарату әдісімен бағаланды [22,23].

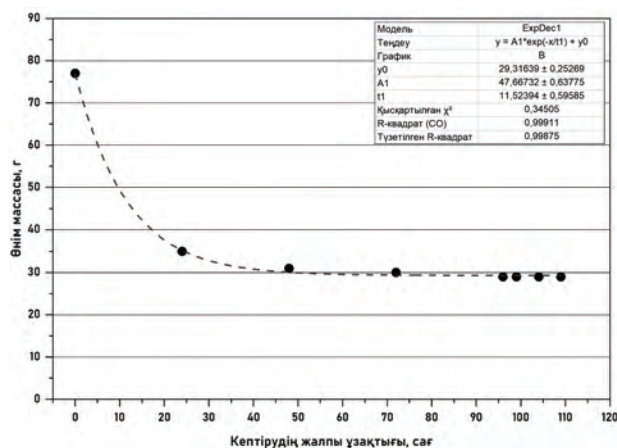
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Модельдік сұйық радиоактивті қалдықпен сіндірілген перлитті кептіру процесі барысында материалдың массасы әрбір кезеңнен кейін тіркеліп отырды (3-кесте), және жиналған деректер негізінде кептіру ұзақтығына байланысты массаның өзгеру тәуелділігінің графигі құрылды, ол 4-суретте көрсетілген.

3-кесте. Модельдік СРҚ-мен сіндірілген перлитті кептіру шарттары

№	Температура, °С	Кептіру, сағ / салқындату, сағ	Кептіруден кейінгі масса, г
–	–	–	77 $\pm$ 0,1 (бастапқы)
1	70	24/2	35 $\pm$ 0,1
2	70	24/2	31 $\pm$ 0,1
3	70	24/2	30 $\pm$ 0,1
4	70	24/2	29 $\pm$ 0,1
5	100	3/2	29 $\pm$ 0,1
6	100	5/2	29 $\pm$ 0,1
7	100	5/0	29 $\pm$ 0,1

Масса өзгерісінің уақытқа тәуелділігі бастапқы кезеңде массаның қарқынды төмендеуімен, кейіннен платоға шығуымен сипатталады. Бастапқы сатыда үлгі массасының 77-ден 35 г-ға дейін қарқынды төмендеуі байқалады, бұл материалдың қатты фазасымен байланыспаған еркін ылғалдың жойылуымен түсіндіріледі. Келесі кезеңде процесс баяу кептіру режиміне өтеді. 50-60 сағат аралығында сіндірілген материалдың массасы платоға жетіп, іс жүзінде тұрақты болып қалады. Графикте көрсетілген экспоненциалды аппроксимация параметрі t_1 қарқынды булану сатысының аяқталу уақытын сипаттай-



4-сурет. Масса өзгерісінің кептірудің жалпы ұзақтығына тәуелділік графигі

ды және жүйенің кинетикалық параметрі ретінде қарастырылуы мүмкін. Практикалық тұрғыдан тұрақты массаға жету дегидратация процесінің аяқталғанын көрсетеді және кейінгі зерттеулердің қайта өндірілуін қамтамасыз етеді. Себебі осы кезеңде материал термодинамикалық тұрғыдан тұрақты күйде болады, ал қалдық ылғалдың оның физика-химиялық қасиеттеріне әсері елеусіз болып табылады.

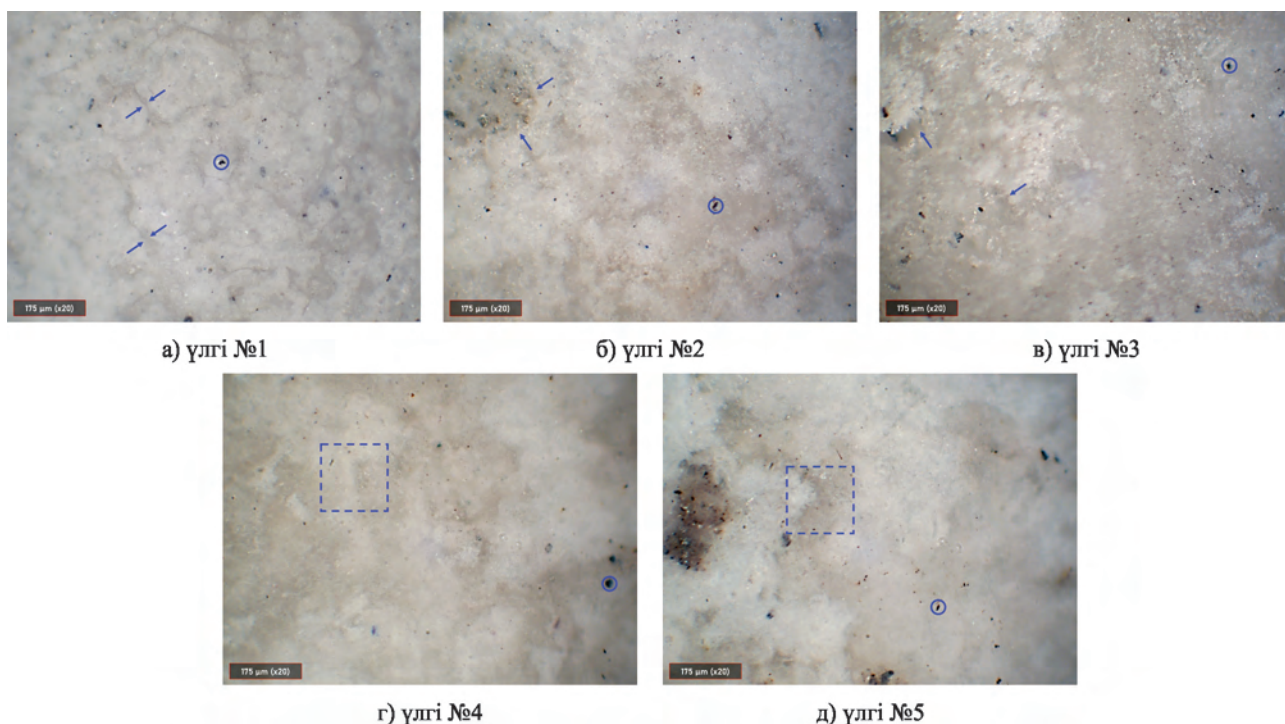
Кептіру кезеңінен кейін ықшам зертханалық үлгілер алу үшін кептірілген материал гидравликалық преста престеліп, кейіннен муфельді пеште күйдірілді. Алынған үлгілердің микроқұрылымы оптикалық микроскопия (ОМ) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістерімен зерттелді. Оптикалық микроскопия нәтижелері 5-суретте келтірілген.

$\times 20$ үлкейту кезінде алынған оптикалық кескіндер күйдірілген үлгілердің түйіршікті микроқұрылымын көрсетеді. Барлық үлгілердің бетінде шлифтеу-жылтырату өңдеуінен кейін қалған SiC бөлшектерін білдіретін қараңғы қосындылар (шеңбермен белгіленген) байқалады.

№1 үлгінің микроқұрылымы жоғары кеуектілікпен сипатталады, бұл айқын көрінетін бөлшек аралық шекаралармен (жебелермен белгіленген) расталады. №2 және №3 үлгілер үшін құрылымның тығыздалуының бастапқы сатысы тән, мұнда бөлшек аралық шекаралар айқындылығы төмендейді, сонымен қатар микрокеуектіліктің жергілікті аймақтары сақталады (жебелермен белгіленген).

Күйдіру температурасы одан әрі артқан кезде (№4 және №5 үлгілер) неғұрлым тығыз құрылымның қалыптасуы байқалады (бөлшек аралық шекаралар үзік сызықты квадраттармен белгіленген). Аталған үлгілердің беті жоғары біртектілік және тегістік дәрежесімен сипатталады. Көрнекі түрде үлгілердің беті аморф тәрізді (шынытәрізді) сипатқа ие болып, төмен температураларда күйдірілген үлгілердің құрылымынан айқын ерекшеленеді.

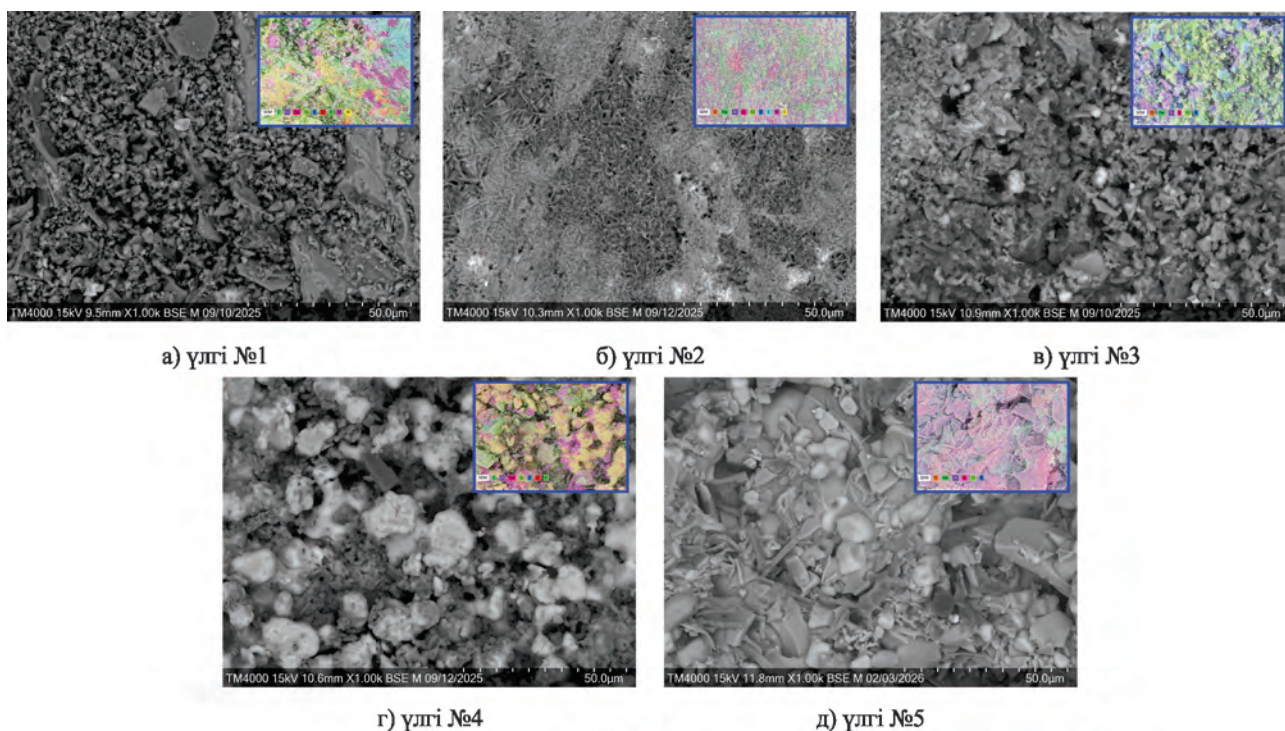
**ТҰЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ
ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ**



5-сурет. $\times 20$ үлкейту кезінде алынған күйдірілген үлгілердің микроскопиялық кескіндері

Оптикалық микроскопиядан кейін үлгілердің микроқұрылымы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен зерттелді. $\times 1000$ үлкейту кезінде BSE режимінде алынған үлгілердің СЭМ-кескіндері 6-суретте келтірілген.

СЭМ кескіндерінде айқын гетерогенді морфологиясы бар перлит бөлшектері негізіндегі құрылымның қалыптасуы анықталды. BSE режимінде материалдың көпфазалы сипаты айқын байқалады, ал ЭДС-карталар жекелеген элементтердің біркелкі емес таралуын



6-сурет. ЭДС-талдау нәтижелерімен алынған үлгілердің СЭМ-кескіндері

ТҰЗ ҚҰРАМДЫ СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ПЕРЛИТТІ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ СОРБЕНТ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

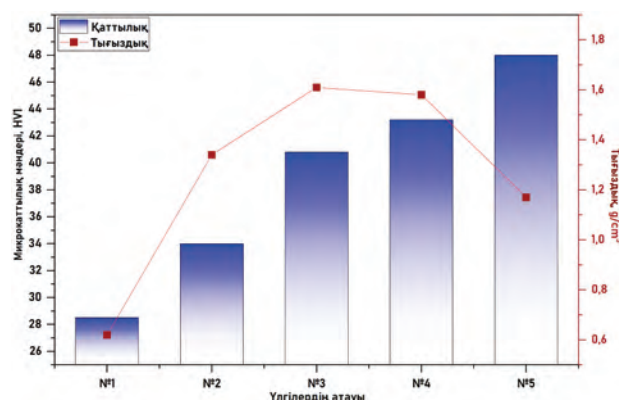
көрсетеді. Сонымен қатар, ЭДС-талдау нәтижелері бойынша үлгілерде перлиттің алюмосиликатты матрицасына тән элементтер (Si, Al, O), сондай-ақ модельдік СҚРА компоненттерімен байланысты элементтер (Na, K, Cl, S) анықталды. Элементтердің таралуы локалды түрде біркелкі емес сипатқа ие, бұл материалдың кеуекті кеңістігінде тұзды қосындылардың болуымен байланысты.

№1 үлгінің микроқұрылымы тығыздалудың төмен дәрежесімен және айқын бөлшек аралық кеуектілікпен сипатталады. №2 үлгіде бөлшек аралық кеңістік сақталады, алайда талшықты-ине тәрізді учаскелердің қалыптасуы есебінен құрылым жергілікті түрде неғұрлым байланысқан сипатқа ие болады. №3 үлгі үшін анағұрлым ықшам агрегаттық құрылым тән: бөлшектер ірілеу және тығызырақ орналасқан, ал ашық бөлшек аралық кеңістіктің үлесі айтарлықтай азаяды.

№4 үлгіде ұсақ дисперсті матрица аясында дөңгелек түзілімдер мен тегістелген микрорельеф учаскелері байқалады, бұл бөлшек аралық қуыстардың айқындылығының одан әрі төмендеуімен қатар жүреді. №5 үлгінің микроқұрылымы ең гетерогенді: ірі сынықты және пластинкалы фрагменттер бар, олар жергілікті тығыз учаскелері бар массивті құрылым түзеді, агрегаттардың іріленуі мен тығыздалуының жалпы үрдісі сақталады.

Осылайша, ОМ және СЭМ нәтижелері күйдіру температурасының артуы тығыздалған микроқұрылымының қалыптасуына әкелетінін көрсетті. Сондай-ақ 450–500 °C температурада кеуектіліктің едәуір төмендеуі және аморф тәрізді (шынытәрізді) беті бар неғұрлым байланысқан әрі біртекті құрылымның қалыптасуы байқалады.

Тығыздалу дәрежесін анықтау үшін Виккерс әдісі бойынша қаттылық өлшемдері жүргізілді, сондай-ақ күйдірілген үлгілердің тығыздығы есептелді. Алынған нәтижелер 4-кестеде келтірілген және 7-суретте графиктер түрінде көрсетілген.



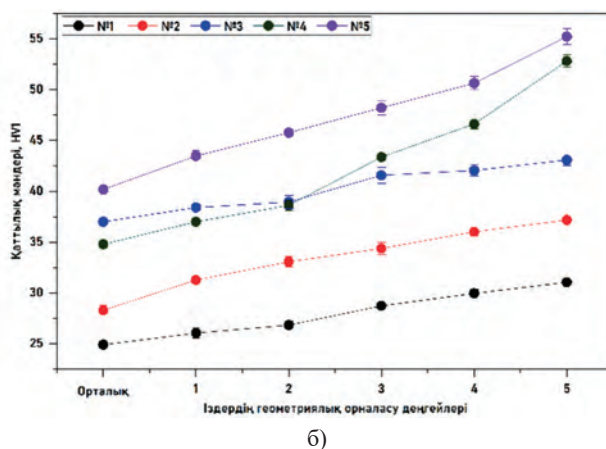
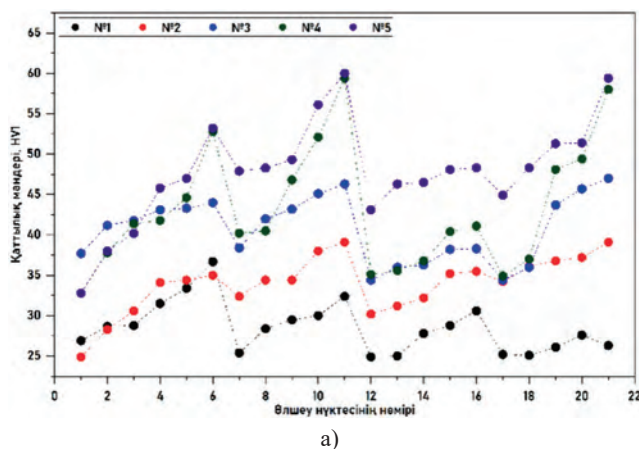
7-сурет. Күйдіру температурасына байланысты үлгілердің қаттылық мәндерінің диаграммасы

4-кесте. Үлгілердің қаттылығы мен тығыздығын өлшеу нәтижелері

Үлгілер	Орташа қаттылық, НВ1	Тығыздық, г/см³
№1	28,5±0,7	0,617±0,001
№2	33,9±0,8	1,339±0,003
№3	40,8±1,1	1,605±0,004
№4	43,2±1,8	1,576±0,004
№5	47,9±1,5	1,171±0,003

Үлгілердің қаттылық мәндері күйдіру температурасына айқын тәуелділікті көрсетеді. Температура 300-ден 500 °C-қа дейін артқан кезде орташа қаттылықтың 28,5 НВ1-ден (№1 үлгі) 47,9 НВ1-ге (№5 үлгі) дейін бірізді өсуі байқалады.

300–400 °C аралығында (№1–№3 үлгілер) қаттылықтың өсуі тығыздықтың 0,62-ден 1,61 г/см³-ке дейін артуымен қатар жүреді, бұл кеуектіліктің азаюын және бөлшек аралық байланыстардың дамуын көрсететін оптикалық және электрондық микроскопия нәтижелерімен сәйкес келеді. 450–500 °C диапазонында (№4 және №5 үлгілер) тығыздықтың №3 үлгімен салыстырғанда төмендеуіне қарамастан,



8-сурет. Өлшеу нүктесінің нөміріне байланысты Виккерс бойынша қаттылықтың таралуы (а) және зерттелетін үлгілердегі қаттылықтың радиалды таралуы (орташа мәндері) (б)

каттылық арта береді. Бұл жоғары күйдіру температураларында механикалық қасиеттер тек көлемдік тығыздықпен ғана емес, сондай-ақ микроқұрылым сипатының және бөлшек аралық байланыстардың өзгеруімен де анықталатынын көрсетеді.

Өр үлгі үшін тіркелген қаттылық мәндері негізінде сәйкес график тұрғызылды, ол 8-суретте келтірілген.

Ұсынылған график үлгі беті бойынша қаттылық мәндерінің таралуын көрсетеді. Осы графикті қаттылықты өлшеу нүктелерінің орналасу геометриясымен (3-сурет) салыстыру үлгінің орталық аймағында қаттылық мәндері шеткі аймақтармен салыстырғанда төмен екенін көрсетеді (76-сурет). Аталған заңдылық өлшеулер жүргізілген төрт бағыттың барлығы үшін сақталады.

Бақыланған қаттылықтың таралуы муфельді пеште үлгінің сыртқы беттерінен дәстүрлі қыздыру арқылы жүргізілген күйдіру процесінің ерекшеліктерімен байланысты болуы мүмкін. Мұндай жағдайларда үлгі қимасы бойынша температура өрісі мен материалдың тығыздалу дәрежесі біркелкі болмауы ықтимал, бұл микроқұрылымда айырмашылықтардың қалыптасуына және соның салдарынан орталық және шеткі аймақтар арасындағы қаттылықтың жергілікті мәндерінің айырмашылығына әкеледі.

Қорытынды

Жұмыста 300–500 °C температураларда муфельді пеште алынған перлиттің күйдірілген үлгілерінің микроқұрылымы, тығыздығы және қаттылығы бойынша кешенді зерттеу жүргізілді. Оптикалық және сканерлеуші электрондық микроскопияны бірлесіп қолдану күйдіру температурасына байланысты микроқұрылым эволюциясын бақылауға мүмкіндік берді.

Төмен күйдіру температураларында (300–350 °C) үлгілердің микроқұрылымы жоғары кеуектілікпен, бөлшектердің бос орналасуымен және әлсіз дамыған бөлшек аралық байланыстармен сипатталатыны көрсетілді. 350–400 °C аралығында құрылымның тығыздалуы басталады, бұл кеуектіліктің азаюымен қатар жүреді, алайда жергілікті тығыздалмаған аймақтар сақталады. Температураны 450–500 °C-қа дейін арттырғанда бетінің тегістелген микрорельефі бар неғұрлым байланысқан және біртекті микроқұрылым қалыптасады.

Күйдіру температурасы 400 °C-қа дейін артқанда тығыздықтың өсуі анықталды, бұл материалдың тығыздалу процестеріне сәйкес келеді. 450–500 °C температураларда тығыздық біршама төмендейді, бұл микроқұрылым сипатының өзгеруімен және материалдағы кеуектердің қайта таралуымен байланысты.

Үлгілердің қаттылығы зерттелген температуралық диапазонның барлық аймағында тұрақты өсу үрдісін көрсетеді, бұл күйеженің температурасының

жоғарылауымен құрылымның механикалық тұтастығының артуын көрсетеді. Үлгілер беті бойынша қаттылықтың радиалды таралуы біркелкі емес екені анықталды: орталық аймақтардағы мәндер шеткі аймақтармен салыстырғанда төмен. Байқалған микроқаттылықтың біркелкі еместігі сіңдіру, кептіру, престеу және кейінгі термиялық өңдеу кезеңдерінде қалыптасқан үлгінің қимасы бойынша тығыздықтың, кеуектіліктің және тұзды компоненттердің таралуындағы локалды айырмашылықтармен байланысты болуы мүмкін.

Осылайша, зерттеу нәтижелері микроскопиялық және механикалық талдау әдістерін біріктіруге негізделген кешенді тәсіл материалдың тығыздалу процестерінің үйлесімді және тұтас көрінісін алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Алғыс білдіру

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің BR24993140 «Сұйық радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу технологиясын таңдау және іске асыруды негіздеу бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстары» жобасы аясында қаржылық қолдауымен орындалды.

Қолданылған әдебиет тізімі / REFERENCES

1. Rakhimova N. Recent advances in alternative cementitious materials for nuclear waste immobilization: A review // . Sustainability. 2023. Vol. 15. 689. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010689>.
2. Abdel Rahman R.O., Saleh H.M. Introductory chapter: Safety aspects in nuclear engineering // Principles and applications in nuclear engineering: Radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment / eds. R.O. Abdel Rahman, H.M. Saleh. London: IntechOpen, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76818>.
3. Abdel Rahman R.O., Kozak M.W., Hung Y.-T. Radioactive pollution and control // Handbook of environment and waste management / eds. Y.-T. Hung, L.K. Wang, N.K. Shammass. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2014. P. 949–1027. DOI: https://doi.org/10.1142/9789814449175_0016.
4. Abdel Rahman R.O., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Ojovan M.I. Cementitious materials for nuclear waste immobilization. New York: Wiley, 2014. 9781118512005. Available at: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118512006,subjectCd-CH50.html>.
5. Organ N., Wells D., Michelbacher J., Wells P.B. International collaboration with the shutdown of the BN-350 Reactor // Proceedings of the Decommissioning, Decontamination, and Reutilization Topical Meeting. Idaho Falls, ID, USA, 29 August–2 September 2010. P. 268–271.
6. Mukhamedov N., Toleubekov K., Vityuk G., Bekmoldin M., Dolzhikov S. Decommissioning of the BN-350 fast neutron reactor: History review and current status // Energies. 2025. Vol. 18. 3486. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18133486>.
7. Savkin A.E., Slastennikov Y.T., Sinyakin O.G. et al. Feasibility of processing of accumulated liquid radioactive waste

- from BN-350 reactor // Radiochemistry. 2001. Vol. 43. P. 311–314. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012877028805>.
8. Charnyi D., Zabulonov Y., Lukianova V. et al. Adaptation of conventional water treatment technologies for organic component removal from liquid radioactive waste: Sorption and coagulation mechanisms // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. 2626. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36799-2>.
9. Sharygin L.M., Muromskii A.Y., Moiseev V.E. et al. Sorption purification of liquid radioactive wastes from nuclear power plants // Atomic Energy. 1997. Vol. 83. P. 493–499. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02418974>.
10. Anthony R.G., Dosch R.G., Gu D., Philip C.V. Use of silicotitanates for removing cesium and strontium from defense waste // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie00035a020>.
11. Voronina A.V., Noskova A.Yu., Semenishchev V.S., Gupta D.K. Decontamination of seawater from ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr radionuclides using inorganic sorbents // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106210>.
12. Rahman R.O.A., Ibrahim H.A., Hung Y.-T. Liquid radioactive wastes treatment: A review // Water. 2011. Vol. 3. P. 551–565. DOI: <https://doi.org/10.3390/w3020551>.
13. El-Kamash A.M. Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs⁺ and Sr²⁺ ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 151, Issues 2–3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.009>.
14. Khoshraftar Z., Masoumi H., Ghaemi A. On the performance of perlite as a mineral adsorbent for heavy metals ions and dye removal from industrial wastewater: A review of the state of the art // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100385>.
15. Vijayaraghavan K., Raja F.D. Experimental characterization and evaluation of perlite as a sorbent for heavy metal ions in single and quaternary solutions // Journal of Water Process Engineering. 2014. Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.10.001>.
16. Union Perlite LLP. Company profile. URL: <https://perlite.all.biz/contacts> (accessed: н.д.).
17. Klein M., Weyers C., Goossens W.R.A. // Proceedings of the 18th DOE Nuclear Airborne Waste Management and Air Cleaning Conference. Baltimore, Maryland, Aug. 12–16, 1984. CONF-840806. 1985. Vol. 1. P. 702–731.
18. Sanderson J. Reflected-light microscopy // Essentials of Light Microscopy. Oxford, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/9780191915901.003.0005>.
19. Lopez Hernandez C. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0215-9>.
20. ASTM C1327. Standard test method for Vickers indentation hardness of advanced ceramics. West Conshohocken, PA: ASTM International. URL: <https://www.astm.org/c1327> (accessed: н.д.).
21. Bronshtein I.N., Semendiyayev K.A. Handbook of Mathematics. Berlin: Springer, 2007.
22. Taylor J.R. An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements. 2nd ed. Sausalito, CA, USA: University Science Books, 1997.
23. Bevington P.R., Robinson D.K. Data reduction and error analysis for the physical sciences. 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЛИТА В КАЧЕСТВЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО СОРБЕНТА ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ СОЛЕСОДЕРЖАЩИХ ЖРО

**В. В. Бакланов¹, Е. Т. Коянбаев², Н. М. Мухамедова^{1,3}, А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов¹,
А. А. Сабыртайева^{1*}, О. Өкен¹, Д. С. Кульбедин^{1,3}, Д. К. Бельгибаева^{1,3}**

¹ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

³ НАО «Шәкәрім университет», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: sabyrtayeva@nnc.kz

В данной работе представлено комплексное исследование получения твердых форм жидких радиоактивных отходов методом селективной сорбции с использованием перлита в качестве сорбента. Технологический процесс включает пропитку перлита модельным соледержащим ЖРО, сушку для удаления избыточной влаги, прессование с формированием образцов и их последующее спекание в муфельной печи. Спекание проводилось в диапазоне температур 300–500 °C при выдержке 60 минут. Микроструктурный анализ с применением оптической и сканирующей электронной микроскопии показал переход от высокопористой структуры к более плотной и связанной микроструктуре по мере повышения температуры спекания. С ростом температуры до 400 °C явно проявляется уплотнение материала, но при более высоких температурах наблюдается незначительное снижение плотности. Микротвердость образцов возрастает во всем исследованном температурном диапазоне, что свидетельствует об усилении межчастичных связей и согласуется с данными микроструктурного анализа. Полученные результаты подтверждают важную роль температуры спекания в формировании структуры и механических свойств твердых форм на основе перлита и демонстрируют перспективность предлагаемого подхода для иммобилизации соледержащих жидких радиоактивных отходов.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, иммобилизация, перлит, селективная сорбция, микроструктура, микротвердость.

USE OF A PERLITE-BASED INORGANIC SORBENT FOR THE IMMOBILIZATION OF SALT-CONTAINING LIQUID RADIOACTIVE WASTE

V. V. Baklanov¹, E. T. Koyanbaev², N. M. Mukhamedova^{1,3}, A. Zh. Miniyazov¹, I. A. Sokolov¹,
A. A. Sabyrtaeva^{1*}, O. Oken¹, D. S. Kulbedin^{1,3}, D.K. Belgibaeva^{1,3}

¹ «Institute of Atomic Energy» Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

² National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

³ NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: sabyrtayeva@nnc.kz

This study presents a comprehensive investigation of producing solid forms of liquid radioactive waste by selective sorption using perlite as a sorbent. The technological process includes impregnation of perlite with a model salt-containing liquid radioactive waste (LRW), drying to remove excess moisture, pressing with sample formation, and subsequent sintering in a muffle furnace. Sintering was carried out in the temperature range of 300–500 °C with a holding time of 60 minutes. Microstructural analysis using optical microscopy and scanning electron microscopy revealed a transition from a highly porous structure to a denser and more cohesive microstructure with increasing sintering temperature. As the temperature rises to 400 °C, material densification becomes clearly evident; however, at higher temperatures, a slight decrease in density is observed. The microhardness of the samples increases throughout the investigated temperature range, indicating strengthening of interparticle bonds and correlating with the microstructural analysis results. The obtained findings confirm the significant role of sintering temperature in the formation of structure and mechanical properties of perlite-based solid forms and demonstrate the potential of the proposed approach for immobilization of salt-containing liquid radioactive waste.

Keywords: liquid radioactive waste, immobilization, perlite, selective sorption, microstructure, microhardness.