https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-71

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 58.91.29, 58.29.37

Н.Е. Мухамедов[1,2], О. Өкен[1], С.А. Должиков[1,2], Д.М. Секен[1,2*], А.З. Райко[1]
[1]ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институтының филиалы,
180010, Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Бейбіт атом көшесі, 10.
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: seken@nnc.kz

ЦЕМЕНТ КОМПАУНДЫН ҚАУІПСІЗ КОНДИЦИОНЕРЛЕУ ҮШІН ОНЫ ҚАТТЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚ ИМИТАТОРЫМЕН ТОЛТЫРУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ДӘРЕЖЕСІН АНЫҚТАУ

Аңдатпа: *Қатты радиоактивті қалдықтарды қауіпсіз кондиционерлеу және ұзақ мерзімді сақтау үшін тұрақты қалдық формаларын алу атом энергетикасы объектілерін пайдаланудан шығару кезіндегі маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Осы жұмыстың мақсаты БН-350 реакторын пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қатты радиоактивті қалдықтарды модельдейтін имитаторды пайдалана отырып, цемент матрицасын толтырудың оңтайлы дәрежесін анықтау болды. Зерттеу барысында құрамында 15, 25 және 40 мас.% қатты радиоактивті қалдық имитаторы бар цемент компаундтары дайындалды. Үлгілердің физикалық-механикалық қасиеттерін бағалау үшін микроқаттылық, сығымдау кезіндегі беріктік шегі және бұзылу сипаты зерттелді. Нәтижелер имитатор мөлшерінің цемент компаундтарының құрылымдық жай-күйі мен механикалық сипаттамаларына елеулі әсер ететінін көрсетті. Микроқаттылық пен сығымдау кезіндегі беріктіктің ең жоғары мәндері имитатор құрамы 15 мас.% болған жағдайда анықталды, бұл цемент матрицасының неғұрлым біртекті және берік құрылымының қалыптасуымен түсіндіріледі. Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттыру механикалық қасиеттердің белгілі бір төмендеуіне әкелгенімен, олардың мәндері радиоактивті қалдықтардың цементтелген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес деңгейде сақталды. Ал 40 мас.% имитатор кезінде цемент компаундының құрылымдық тұтастығы мен механикалық беріктігінің айтарлықтай төмендеуі байқалды. Алынған нәтижелер қатты радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялауға арналған цемент матрицаларының құрамын оңтайландыру және оларды кондиционерлеу технологияларының тиімділігін арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.*

Түйін сөздер: *қатты радиоактивті қалдықтар, радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу, цемент матрицасы, сығымдау кезіндегі беріктігі, физикалық-механикалық қасиеттері.*

Кіріспе

Атом энергетикасын дамыту ядролық қондырғыларды пайдалану және пайдаланудан шығару процесінде металл конструкцияларын, бетонды, жылу оқшаулағыш материалдарды, технологиялық жабдықтарды және радионуклидтермен ластанған басқа да материалдарды қамтитын қатты радиоактивті қалдықтардың (ҚРҚ) едәуір көлемінің пайда болуымен сүйемелденеді. Мұндай қалдықтармен қауіпсіз жұмыс істеу ядролық және радиациялық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі элементтерінің бірі және оларды халықаралық талаптар мен қауіпсіздікті қамтамасыз ету қағидаттарына сәйкес қайта өңдеуді, кондиционерлеуді, сақтауды және кейіннен көмуді көздейді [1-4].

ҚРҚ-ны кондиционерлеудің ең кең қолданылатын технологияларының бірі цементтеу, ол технологиялық қарапайымдылығымен, экономикалық тиімділігімен, жоғары химиялық тұрақтылығымен және радиоактивті қалдықтарды монолитті матрицада сенімді түрде бекіту қабілетімен сипатталады [5-8]. Цемент компаундтарының механикалық беріктігі жеткілікті, радионуклидтердің көшуін шектейді және радиоактивті қалдықтарды тасымалдау, сақтау және түпкілікті көму кезінде қаптаманың тұтастығын сақтауды қамтамасыз етеді [3, 7-8].

Цементтеу технологиясының маңызды параметрлерінің бірі цемент матрицасын қалдықтармен (waste loading) толтыру дәрежесі. Қалдықтардың құрамын арттыру ҚРҚ-ны қосу

©Н.Е. Мухамедов, О. Өкен, С.А. Должиков, Д.М. Секен, А.З. Райко, 2026

коэффициентін арттыруға, цемент байланыстырғышының шығысын азайтуға және ұзақ уақыт сақтауға және көмуге бағытталған кондиционерленген қалдықтардың жалпы көлемін азайтуға мүмкіндік береді. Алайда толтыру дәрежесін арттыру цемент тасы мөлшерінің азаюымен қатар жүреді, бұл кеуектіліктің өсуіне, толтырғыш пен цемент матрицасы арасындағы фазааралық өзара әрекеттесудің нашарлауына, компаунд тығыздығының, микроқаттылығы мен механикалық беріктігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін үздіксіз негізгі құрылымның қалыптасуын қамтамасыз етеді [7-12].

Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің (МАГАТЭ) талаптарына сәйкес радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлері олардың өмірлік циклінің барлық сатысында қалдықтармен жұмыс істеу кезінде қауіпсіздікті қамтамасыз ететін қолайлы критерийлерді (Waste Acceptance Criteria) қанағаттандыруы тиіс [2-4]. Бұл ретте қаптаманың құрылымдық тұтастығын, механикалық беріктігін, химиялық тұрақтылығын және ұзақ уақыт сақталуын қоса алғанда, қалдықтардың түпкілікті түрінің физикалық және механикалық сипаттамаларына ерекше назар аударылады. Сонымен бірге МАГАТЭ-ның нормативтік құжаттары цемент матрицасын қалдықтармен толтырудың рұқсат етілген дәрежесінің әмбебап мәнін белгілемейді, өйткені ол қалдықтардың құрамымен, байланыстырушы қасиеттерімен және радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеудің нақты жүйесіне қойылатын талаптармен анықталады.

Радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялау үшін цемент матрицаларын жетілдіруге арналған көптеген зерттеулерге қарамастан, жарияланған жұмыстардың көпшілігі цемент тұтқыр құрамының, минералдық қоспалардың, гидратация процестерінің әсерін зерделеуге және компаундтардың ұзақ уақыттық химиялық беріктігін арттыруға бағытталған. Сонымен қатар цемент матрицасын талап етілетін физикалық-механикалық сипаттамаларды сақтай отырып, қалдықтардың максималды қосылуын қамтамасыз ететін қатты радиоактивті қалдықтармен толтырудың шекті дәрежесін анықтау мәселесіне айтарлықтай аз көңіл бөлінген. Бұл міндет күрделі морфологиялық және компоненттік құрамымен сипатталатын атом энергетикасы объектілерін пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қалдықтар үшін өзекті.

Нақты қатты радиоактивті қалдықтардың морфологиялық және компоненттік ерекшеліктерін жаңғыртатын радиоактивті емес имитаторларды пайдалану радиациялық шектеулерсіз кешенді эксперименттік зерттеулер жүргізуге және толтыру дәрежесіне байланысты цемент компаундтарының қасиеттерін өзгерту заңдылықтары туралы дұрыс деректер алуға мүмкіндік береді. Алынған нәтиже радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу жөніндегі халықаралық стандарттардың талаптарын қанағаттандыратын цемент компаундтарының ұтымды құрамын негіздеу үшін ғылыми негіз бола алады [6-12]. ҚР Ұлттық ядролық орталығында осы саладағы және жалпы атом энергиясын дамыту саласындағы зерттеулер 30 жылдан астам уақыт бойы жүргізіліп келе жатқанын атап өту маңызды [13-16].

Бұл жұмыстың мақсаты физикалық-механикалық сипаттамаларының радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкестігін қамтамасыз ету үшін тығыздықты, микроқаттылықты және сығымдау кезінде беріктікті кешенді бағалау негізінде цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың оңтайлы дәрежесін анықтау.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтыру дәрежесіне байланысты оның физикалық-механикалық қасиеттерінің өзгеруіндегі сандық заңдылықтарды белгілеу. Алғаш рет БН-350 реакторын пайдаланудан шығаруға тән қатты радиоактивті қалдықтардың құрамын жаңғыртатын имитатор үшін сығымдау кезінде тығыздықты, микроқаттылықты және беріктігін кешенді бағалау негізінде цемент матрицасын толтырудың оңтайлы дәрежесі эксперименттік түрде анықталды. Алынған нәтиже радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес келетін пайдалану сипаттамаларын сақтай отырып, қалдықтардың максималды жүктемесін қамтамасыз ететін имитатордың шекті рұқсат етілген құрамын ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді.

Цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың шекті (оңтайлы) дәрежесі бар деп болжанады, бұл ретте цемент матрицасының физикалық-механикалық сипаттамаларын айтарлықтай нашарлатпай қалдықтарды қосудың максималды коэффициентіне қол жеткізіледі. Бұл мәннен асып кету цемент қаңқасының үздіксіздігінің

бұзылуына, кеуектіліктің артуына және цемент тасы мен толтырғыш бөлшектері арасындағы фазааралық өзара әрекеттестіктің әлсіреуіне әкеледі, бұл тығыздықтың, микроқаттылықтың және сығымдау кезінде беріктіктің жедел төмендеуімен бірге жүреді.

Материалдар мен әдістер

Осы зерттеуде цемент қоспасын дайындау үшін ГОСТ 31108-2020 [17] стандартының талаптарына сәйкес келетін Қазақстанда [16] өндірілген портландцемент қолданылды.

Толтырғыш ретінде БН-350 реакторын пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қалдықтардың морфологиялық және компоненттік құрамы негізінде әзірленген қатты радиоактивті қалдықтардың (ҚРҚ) радиоактивті емес имитаторы қолданылды (Ақтау қаласы, Қазақстан Республикасы). Имитаторды пайдалану радиациялық факторлардың әсерінсіз нақты ҚРҚ-ның физикалық сипаттамаларын жаңғыртуға мүмкіндік берді, бұл зертхана жағдайында зерттеулер жүргізуді қамтамасыз етті.

Зерттеу үшін қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамы 15, 25 және 40 мас.% болатын цемент компаунды дайындалды. Бақылау үлгісі ретінде имитатор қосылмаған цемент компаунды алынды.

Құрғақ компоненттер біртекті қоспаны алғанға дейін механикалық тәсілмен алдын ала араластырылады, содан кейін ерітпе судың есептік мөлшері біртіндеп құйылады.

Дайындалған қоспаны қалыптарға құйып, діріл әдісімен нығыздап, бөлме температурасында ұстайды. Қалыпты шешкеннен кейін үлгілер 21 тәулік ішінде (22 ± 1)°С-тық температурада және ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 95%-дан кем емес қалыпты жағдайларда қатып қалады, бұл цементті гидратациялаудың негізгі процестерінің аяқталуын және цемент тасының тұрақты құрылымының қалыптасуын қамтамасыз етеді. Зерттелетін цемент компаундтарының құрамы 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Цемент компаундтарының құрамы

Үлгінің шартты белгісі	Химиялық құрамы, масс.%		
	Цемент матрицасы	Имитатор құрамы	Су
1	70	-	30
2	55	15	30
3	50	25	25
4	40	40	20

Цемент тасының жергілікті механикалық қасиеттері Виккерстің микроқаттылық әдісімен зерттелді. Өлшеулер ASTM E384 [18] халықаралық стандарты бойынша Qness 60M EVO микроқаттылық өлшегішінде бекітілген жүктеме 100 г және ұстау уақыты 10 с кезінде орындалды. Әрбір үлгінің бетінде көрінетін ақаулары бар аймақтарды және шеттік аудандарды қоспағанда, аудан бойынша біркелкі бөлінген кемінде он таңба түсірілді. Нәтижесіне микроқаттылықтың орташа арифметикалық мәні алынды.

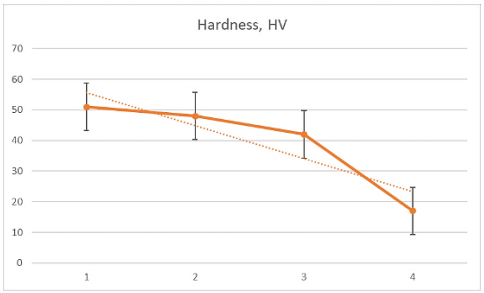
Сығымдау кезінде беріктігін сынау әмбебап сынау машинасында 21 тәулік қатайғаннан кейін жүргізілді. Жүктеме ASTM C39/C39M [19] сәйкес үлгінің толық бұзылуына дейін үздіксіз тұрақты жылдамдықпен салынды. Сығымдау кезіндегі беріктік шегі бұзылудың максималды жүктемесінің үлгінің көлденең қимасының ауданына қатынасы ретінде анықталады:

$$\sigma_c = F_{max}/A$$

мұндағы σ_c – сығымдау кезіндегі беріктік шегі, МПа; F_{max} – үлгі бұзылуы кезіндегі максималды жүктеме, Н; А – үлгінің көлденең қимасының ауданы, мм^2. Сығымдау сынақтарынан кейін цемент компаундтарының бұзылу бетіне визуалды талдау жүргізілді. Жарықтардың таралу сипаты, тұтастықтың сақталу дәрежесі бағаланды.

Зерттеу нәтижелері және талқылаулар

Микроқаттылық цемент тасының жергілікті механикалық қасиеттерін және оның құрылымының қалыптасу дәрежесін сипаттайтын ақпараттық параметрлердің бірі. Бұл көрсеткіштің өзгеруі қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының макроскопиялық беріктікке сынақтар жүргізгенге дейін цемент матрицасының құрылымдық жай-күйіне әсерін бағалауға мүмкіндік береді. Микроқаттылықты анықтау нәтижелері 1-суретте берілген.

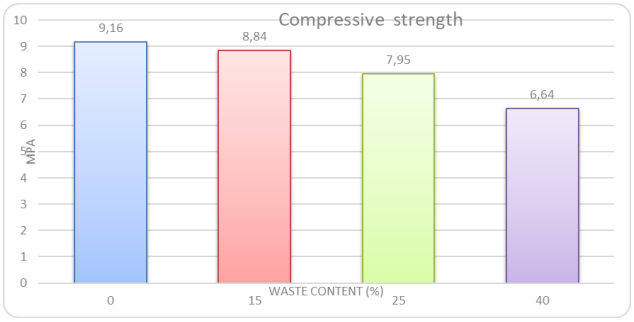


Сурет 1 – Микроқаттылық нәтижесі

ҚРҚ имитаторының құрамы цемент компаундтарының микроқаттылығына айтарлықтай әсер ететіні белгіленді. Имитатордың 15 мас.%-ын енгізу кезінде зерттелген құрамдар арасында микроқаттылықтың максималды мәні байқалады. Имитатор құрамын одан әрі 25 және 40 мас.%-ға дейін арттыру осы көрсеткіштің жүйелі төмендеуімен қатар жүреді.

Алынған нәтиже толтырғыштың мөлшері аз болған кезде имитатор бөлшектері цемент жүйесінің компоненттерін тығыз қаптауға және цемент тасының біртекті құрылымын қалыптастыруға ықпал ететінін көрсетеді. Сонымен қатар ҚРҚ имитаторлары дәрежесін арттыру гидратацияға қатысатын цемент тұтқыр үлесінің азаюына, цемент матрицасы мен толтырғыш бөлшектері арасындағы фазааралық шекаралар санының артуына, сондай-ақ жергілікті құрылымдық әртектіліктің қалыптасуына алып келеді. Нәтижесінде жергілікті пластикалық деформация материалының кедергісі төмендейді, бұл микроқаттылықтың төмендеуінен көрінеді.

Сығымдау кезіндегі беріктік шегі қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеуге арналған цемент компаундтарының пайдалану жарамдылығын бағалаудың негізгі критерийлерінің бірі. Сынақ нәтижелері 2-суретте берілген.



Сурет 2 – Сығымдау беріктігінің шегі

Микроқаттылық жағдайындағыдай қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының өзгеруі цемент компаундтарының беріктігіне айтарлықтай әсер етеді. Сығымдау кезіндегі беріктік шегінің ең үлкен мәні имитатор құрамы 15 мас.% болған кезде алынады, бұл бақылау үлгісінің беріктігінен асып түседі. Толтырғыштың құрамын одан әрі 25-тен және 40 мас.%-ға дейін артыру беріктіктің біртіндеп төмендеуімен қатар жүреді.

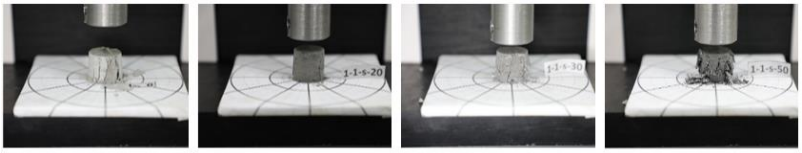
Құрамында 15 мас.% болғанда беріктікті арттыру дисперсті имитатор бөлшектерінің микротолымдылық әсеріне байланысты болуы мүмкін, олар цемент жүйесінің компоненттерін неғұрлым ұтымды қаптауға және ірі құрылымдық ақаулардың шоғырлануын төмендетуге ықпал етеді. Толтыру дәрежесі неғұрлым жоғары болған кезде үздіксіз көтергіш қаңқаның қалыптасуын қамтамасыз ететін цемент тұтқыр мөлшерінің азаюы байқалады, бұл фазааралық шекаралар санының артуымен және материалдың көлемі арқылы механикалық жүктемені беру тиімділігінің төмендеуімен қатар жүреді.

Анықталған заңдылық микроқаттылықты анықтау нәтижелерімен жақсы үйлесетінін атап өткен жөн. Цемент матрицасының жергілікті қаттылығының төмендеуі оның сыртқы жүктемеге кедергісінің азаюымен бірге жүреді, бұл сығымдау кезіндегі беріктік шегінің төмендеуіне алып келеді.

Алынған нәтиже цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың оңтайлы дәрежесінің бар екенін көрсетеді. Зерттелген құрамдардың ішінде

механикалық сипаттамалардың ең қолайлы үйлесіміне имитатор құрамы 15 мас.% болғанда қол жеткізіледі, ал толтыру дәрежесінің одан әрі артуы цемент тасының физикалық-механикалық қасиеттерінің нашарлауымен қатар жүреді.

Механикалық сынақтардың нәтижелерін растау үшін сығымдау сынақтарынан кейін цемент компаундтарының бұзылу сипатына талдау жүргізілді. Бұзылған үлгілердің фотосуреттері 3-суретте берілген.



Сурет 3 – Цемент компаундтарының бұзылу сипаты

Бақылау үлгісі мен қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамы 15 мас.% болатын үлгі материалының айқын қабатталуынсыз монолитті бұзылуымен сипатталады. Бұзылу магистральдық жарықтардың шектеулі санының пайда болуымен жүреді, бұл цемент матрицасының жеткілікті жоғары құрылымдық тұтастығын көрсетеді.

Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттырған кезде қайталама жарықтар санының артуы және үлгілердің неғұрлым айқын фрагментациясы байқалады. Бұл құрылым біртектілігінің төмендеуін және қосымша кернеу концентраторларының пайда болуын көрсетеді.

Бұзылу сипатындағы ең айқын өзгерістер имитатор құрамы 40 мас.% болған кезде байқалады. Сынақтардан кейін үлгілер көптеген фрагменттерге ыдырайды, ал омырық беті көбірек әртекті болады. Мұндай беталыс толтыру дәрежесінің жоғары болуы және цемент тұтқыр үлесінің азаюы салдарынан цемент матрицасы байланыстылығының төмендеуін көрсетеді.

Бұзылу сипатын талдау микроқаттылығы мен сығымдау кезінде беріктігін анықтау нәтижелеріне толық сәйкес келеді. Қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамын арттыру цемент компаундының құрылымдық тұтастығының біртіндеп нашарлауымен қатар жүреді, ал толтырғыштың 15 мас.%-ын енгізу жергілікті және макроскопиялық механикалық сипаттамалардың неғұрлым қолайлы үйлесуін қамтамасыз етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыста қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеуге арналған цемент компаундтарының физикалық-механикалық қасиеттеріне қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының әсері зерттелді. Цемент матрицасын толтыру дәрежесі әртүрлі болған кезде микроқаттылық, сығымдау кезіндегі беріктік шегі және үлгілердің бұзылу сипатын кешенді бағалау жүргізілді.

Қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамын арттыру цемент компаундтарының механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Зерттелген құрамдардың ішінде микроқаттылық пен сығымдау кезіндегі беріктік шегінің ең жоғары мәндері имитатор құрамы 15 мас.% болғанда алынған, бұл неғұрлым берік және құрылымдық біртекті цемент матрицасының қалыптасуын көрсетеді. Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттырған кезде механикалық сипаттамалардың біршама төмендеуі байқалады, алайда алынған мәндер радиоактивті қалдықтардың цементтелген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес келетін деңгейде қалады. Толтыру дәрежесін одан әрі 40 мас.%-ға дейін арттыру микроқаттылық пен сығымдау кезінде беріктіктің айтарлықтай төмендеуіне әкеледі, сондай-ақ үлгілердің бұзылу сипатының өзгеруімен бірге жүреді, бұл цемент компаундының құрылымдық тұтастығының нашарлауын көрсетеді.

Алынған нәтиже зерттелген құрамдардың ішінде имитатор құрамы 15 мас.%-дық физикалық-механикалық сипаттамалардың ең қолайлы үйлесуін қамтамасыз ететінін, ал 25 мас.%-дық толтыру дәрежесі белгіленген талаптарды қанағаттандыратын деңгейде механикалық қасиеттерін сақтай отырып, иммобилизацияланатын қалдықтардың үлесін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бұл иммобилизация технологиясының басымдықтарына – максималды механикалық беріктікке қол жеткізуге не пайдалану

сенімділігін сақтай отырып, толтыру дәрежесін арттыруға байланысты цемент компаундының құрамын таңдау мүмкіндігін көрсетеді.

Алынған нәтиже қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу үшін цемент компаундының құрамдарын әзірлеу және оңтайландыру кезінде, сондай-ақ қалдықтарды иммобилизациялаудың механикалық беріктігі мен тиімділігіне қойылатын талаптарды ескере отырып, цемент матрицасын толтырудың ұтымды дәрежесін негіздеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. International Atomic Energy Agency. Classification of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. – Vienna: IAEA. – 2009.
2. International Atomic Energy Agency. Predisposal Management of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5. – Vienna: IAEA. – 2009.
3. International Atomic Energy Agency. Disposal of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series № SSR-5. – Vienna: IAEA. – 2011.
4. International Atomic Energy Agency. Development of Waste Acceptance Criteria for Low and Intermediate Level Radioactive Waste // IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.29. – Vienna: IAEA. – 2025.
5. Li J. Solidification of radioactive wastes by cement-based materials / J. Li, L. Chen, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. 2021.– V.141. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103957.
6. Byeon J. Statistical analysis of effects of test conditions on compressive strength of cement solidified radioactive waste / J. Byeon, S. Park // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – № 55(3). – P. 876-883. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.11.008.
7. Cementitious Materials for Nuclear Waste Immobilization / R.O. Abdel Rahman et al // Chichester: John Wiley & Sons. – 2015. https://doi.org/10.1002/9781118511992.
8. Abdel Rahman R.O. Toward Sustainable Cementitious Radioactive Waste Forms: Immobilization of Problematic Operational Wastes / R.O. Abdel Rahman, M.I. Ojovan // Sustainability. – 2021. – № 13(21). – 11992. https://doi.org/10.3390/su132111992.
9. Ojovan M.I. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation / M.I. Ojovan, W.E. Lee. – Elsevier, 2nd ed.: 2013. – ISBN 9780080993935.
10. Pilania R.K., Dube C.L. Matrices for Radioactive Waste Immobilization: A Review // Frontiers in Materials. – 2023. – Vol. 10. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1236470.
11. I,Luhar, S.Luhar, M.Abdullah, A.Sandu et.al. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal // Materials. – 2023. – Vol.16(3). – https://doi.org/10.3390/ma16030954.
12. Advances in immobilization of radionuclide wastes by alkali-activated cement and related materials / Y. Zhu et al // Cement and Concrete Composites. – 2022. – Vol. 126. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104377.
13. Decommissioning of the BN-350 fast neutron reactor: history review and current status / N. Mukhamedov et al // Energies.– Vol. 18. – 2025. https://doi.org/10.3390/en18133486.
14. The BN-350 reactor decommissioning: quantitative analysis and prospects for solid radioactive waste management / N. Mukhamedov et al // Energies. – Vol. 18(17). – 2025. https://doi.org/10.3390/en18174651.
15. Sorption-thermal immobilization of salt-bearing liquid radioactive waste via spark plasma sintering of perlite / V. Baklanov et al // Nuclear Engineering and Design. – 2026. – Vol. 415. – Article 115051. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2026.115051.
16. Semey Cement Plant. (n.d.). Production. https://semeycement.com/production/.
17. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. (2020). GOST 31108-2020. Common cements. Specifications. Standartinform.
18. ASTM International. (2022). ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. Retrieved from https://store.astm.org/e0384-22.html.
19. ASTM C39/C39M-26. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2026.

Алғыс

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен BR24993118 «Қатты радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу технологиясын таңдау және іске асыру негіздемесі бойынша ҒЗЖ» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жобасы шеңберінде орындалды.

Н.Е. Мухамедов[1,2], О. Өкен[1], С.А. Должиков[1,2], Д.М. Секен[1,2*], А.З. Райко[1]
[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК,
180010, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10.
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*****e-mail: seken@nnc.kz

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА ИМИТАТОРОМ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИХ БЕЗОПАСНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Безопасное кондиционирование и долговременное хранение твердых радиоактивных отходов являются одной из важных задач при выводе из эксплуатации объектов атомной энергетики. Целью данной работы являлось определение оптимальной степени наполнения цементной матрицы с использованием имитатора твердых радиоактивных отходов, моделирующего отходы, образующиеся при выводе из эксплуатации реактора БН-350. В ходе исследования были изготовлены цементные компаунды, содержащие 15, 25 и 40 мас.% имитатора твердых радиоактивных отходов. Для оценки физико-механических свойств образцов были исследованы микротвердость, предел прочности при сжатии и характер разрушения. Полученные результаты показали, что содержание имитатора оказывает существенное влияние на структурное состояние и механические характеристики цементных компаундов. Наибольшие значения микротвердости и прочности при сжатии были получены при содержании имитатора 15 мас.%, что свидетельствует о формировании более однородной и прочной цементной матрицы. Увеличение содержания имитатора до 25 мас.% приводит к некоторому снижению механических свойств, однако их значения остаются на уровне, соответствующем требованиям, предъявляемым к цементированным формам радиоактивных отходов. При содержании имитатора 40 мас.% наблюдается существенное снижение механической прочности и ухудшение структурной целостности цементного компаунда. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации составов цементных матриц для иммобилизации твердых радиоактивных отходов и повышении эффективности технологий их кондиционирования.

Ключевые слова: *твердые радиоактивные отходы; кондиционирование радиоактивных отходов; цементная матрица; прочность при сжатии; физико-механические свойства.*

N. Mukhamedov[1,2], O. Oken[1], S. Dolzhikov[1,2], D.M. Seken[1,2*], A. Raiko[1]
[1]Branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK,
180010, Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Beybit Atom St. 10.
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*****e-mail: seken@nnc.kz

DETERMINATION OF THE OPTIMAL FILLING DEGREE OF A CEMENT COMPOUND WITH A SIMULANT OF SOLID RADIOACTIVE WASTE FOR RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION

Safe conditioning and long-term storage of solid radioactive waste are among the key challenges associated with the decommissioning of nuclear facilities. The aim of this study was to determine the optimal filling degree of a cement matrix using a solid radioactive waste simulant representing waste generated during the decommissioning of the BN-350 reactor. Cement compounds containing 15, 25, and 40 wt.% of the solid radioactive waste simulant were prepared and investigated. The physicomechanical properties of the samples were evaluated through microhardness measurements, compressive strength testing, and analysis of fracture behavior. The results demonstrated that the simulant content has a significant effect on the structural state and mechanical performance of the cement compounds. The highest values of microhardness and compressive strength were obtained for the composition containing 15 wt.% simulant, indicating the formation of a more homogeneous and mechanically durable cement matrix. Increasing the simulant content to 25 wt.% resulted in a moderate decrease in mechanical properties; however, the obtained values remained within the range required for cemented radioactive waste forms. At a simulant content of 40 wt.%, a substantial reduction

in mechanical strength and deterioration of the structural integrity of the cement compound were observed. The obtained results can be used for optimizing the composition of cement matrices intended for the immobilization of solid radioactive waste and for improving the efficiency of radioactive waste conditioning technologies.

Key words: *solid radioactive waste; radioactive waste immobilization; cement matrix; compressive strength; physicomechanical properties.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нуржан Еролович Мухамедов – PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының бөлім бастығы; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Оспан Окен – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Сергей Александрович Должиков – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалы зертханасының топ бастығы; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Дархан Мұқаметтоқтарұлы Секен* – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Анель Зиннуровна Райко – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК, Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: raiko@nnc.kz.

Сведения об авторах

Нуржан Еролович Мухамедов – PhD, ассоциированный профессор, начальник отдела, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Оспан Окен – инженер, лаборатории перспективных материалов филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Сергей Александрович Должиков – начальник группы лаборатории, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Дархан Мукаметтоктарулы Секен* – инженер, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Анель Зиннуровна Райко – инженер, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: raiko@nnc.kz.

Information about the author

Nurzhan Mukhamedov – PhD, Associate Professor, Head of Department, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Ospan Oken – Engineer, Laboratory of Advanced Materials, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Sergey Dolzhikov – Head of Laboratory Group, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Darkhan Seken* – Engineer, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Anel Raiko – Engineer, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: raiko@nnc.kz.

Редакцияға енуі 17.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 21.08.2026
Жариялауға қабылданды 24.08.2026