

Ю. Г. Федоренко¹, Ю. О. Ольховик¹, А. М. Розко², Г. П. Павлишин¹

¹ ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», просп. Палладіна, 34а, Київ, 03142, Україна

² Інститут геохімії мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України, просп. Палладіна, 34, Київ, 03142, Україна

Вплив компонентів геополімерних в'язучих речовин на властивості компаундів за цементування борвмісних рідких радіоактивних відходів

Ключові слова:

геополімерні в'язучі, цементування, борвмісні рідкі радіоактивні відходи, вилуговування радіонуклідів

Наведено аналіз експериментальних результатів застосування геополімерних в'язучих для цементування борвмісних рідких радіоактивних відходів (РРВ). Досліджено залежність властивостей компаундів від компонентного складу в'язучих. Як компоненти розглядаються: рідке скло з кремнієвим модулем 2,9, суміш золи Дарницької ТЕЦ зі шлаком Маріупольського металургійного комбінату у співвідношенні 1:1 та гідроксид калію. Для виконання факторного аналізу впливу маса зазначених речовин приймалася за три фактори в аналізі на двох рівнях. Для виготовлення компаундів імітат РРВ змішували із цеолітом у співвідношенні 10:1 за температури приблизно 60 °С. Надалі в суміш додавали вищезначені компоненти, маса яких варіювалася на $\pm 17\%$ відносно маси базового компаунда. Для дослідження властивостей виготовлялися зразки різних розмірів $5 \times 5 \times 5$ см, $1,5 \times 1,5 \times 1,5$ см та прямокутні зразки з зовнішньою поверхнею від 96 до 104 см². Кожна властивість вивчалася за 8 зразками. Отримані результати дали змогу побудувати лінійні рівняння, що кількісно пов'язують відповідну характеристику компаунда зі складом в'язучих. Виконано оцінювання коефіцієнтів кореляції між експериментальними та розрахованими за рівнянням даними. Середні значення коефіцієнтів кореляції можуть свідчити, що не всі фактори були враховані. Отримані закономірності свідчать, що в умовах експерименту шлак та зола збільшують, а рідке скло та гідроксид калію скорочують швидкість тужавлення зразків. Щільність зразків збільшують зола і шлак, у той час як рідке скло та гідроксид калію зменшують. Межу міцності на стиск рідке скло та гідроксид калію зменшують, тоді як суміш золи зі шлаком збільшують. Швидкість вилуговування цезію рідке скло та гідроксид калію збільшують, суміш золи зі шлаком — зменшують. Водночас швидкість вилуговування стронцію суміш золи зі шлаком збільшують, тоді як рідке скло та гідроксид калію зменшують. Термін часу, за який вилуговування цезію досягає нормативних показників, шлак та зола скорочують, а рідке скло та гідроксид калію подовжують. Отримані результати можуть бути враховані для оптимізації складу геополімерних в'язучих для цементування РРВ.

Вступ

Проектами спорудження діючих енергоблоків АЕС України не передбачалося будівництво уста-

новок із глибокої переробки рідких радіоактивних відходів (РРВ) з отриманням продукту, характеристики якого відповідають критеріям прийнятності для остаточного захоронення. У зв'язку з цим на АЕС

© Ю. Г. Федоренко, Ю. О. Ольховик¹, А. М. Розко, Г. П. Павлишин, 2021

України ємності для тимчасового зберігання РРВ близькі до наповнення. За багато десятиліть роботи з радіоактивними відходами ще й досі не створено просту, надійну й дешеву технологію переробки основної маси РРВ у безпечну форму, придатну для захоронення. Це одна з найсерйозніших невирішених проблем ядерної галузі.

Одним із найпоширеніших методів переробки й кондиціонування РРВ низького та середнього рівнів активності є *цементування* завдяки доступності й дешевизні матричних матеріалів і відносній простоті технологічних процесів та устаткування. Однак шлако-лужні цементи мають значно кращі експлуатаційні властивості порівняно з традиційним портландцементом.

Перспективними компонентами (складниками) геополімерних в'язучих, що можуть застосовуватися для цементування РРВ є шлак, зола, рідке скло, луги (KOH, NaOH) [1–3].

Властивості геополімерних компаундів у загальному випадку залежать не тільки від способу їхнього синтезу, особливостей компонентів, а також від складу РРВ, що поєднуються з геополімерними в'язучими та утворюють компаунд.

На сьогодні в Україні не існує нормативних вимог до геополімерних компаундів на відміну від компаундів на портландцементі [4]. Частково це можна пояснити тим, що відомості про цементування РРВ геополімерними в'язучими перебувають у стадії вивчення. Це новий напрям застосування геополімерів, і багато питань про співвідношення між компонентами геополімерів (цеоліт, РРВ, вода, поверхнево-активні речовини та ін.) практично не досліджено. У рекламних проспектах щодо застосування геополімерів SiAl для цементування РРВ склад в'язучих та умов цементування не розголошується, що не дає змоги порівнювати їх за ефективністю та економічністю з результатами інших досліджень. Відомі позитивні результати кондиціонування РРВ геополімерами контактного твердіння [5, 6], але цей метод потребує уточнення в разі цементування закристалізованих РРВ.

Метою роботи було вивчення впливу компонентів геополімерних в'язучих (рідке скло з кремнієвим модулем 2,9, суміш золи Дарницької ТЕЦ зі шлаком Маріупольського металургійного комбінату в співвідношенні 1 : 1 та гідроксид калію, взятих у різних співвідношеннях) у разі цементування борвмісних високосольових РРВ на властивості компаундів, які створені за єдиним процесом (схемою), що відображена на рис. 1.

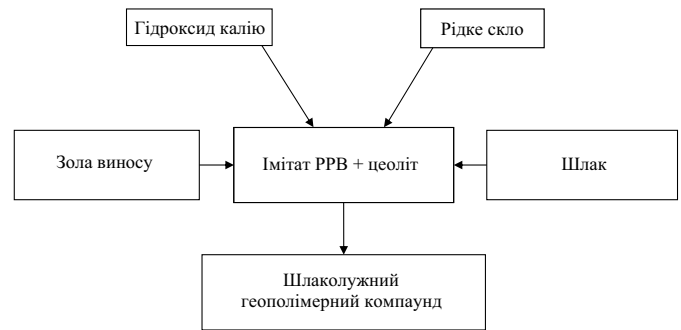


Рис. 1. Схема цементування РРВ геополімерними зв'язуючими

Матеріали та методи

Наводимо властивості обраних для виконання роботи матеріалів.

Хімічний склад шлаку

Маріупольського металургійного комбінату, %

SiO ₂	36,53
Al ₂ O ₃	7,92
Fe ₂ O ₃	0,24
MnO.....	0,1
CaO.....	42,94
MgO.....	9,47
S.....	0,54
K ₂ O+Na ₂ O.....	1,29
TiO ₂	0,47

Якісні показники: масова частка вологи — 0,1 %; залишок на ситі 0,08–1,25 %; питома поверхня — 288 м²/кг.

Хімічний склад цеоліту, %

(сертифікат Сокирницького цеолітового комбінату)

SiO ₂	71,5
Al ₂ O ₃	13,1
Fe ₂ O ₃	0,9
NiO ₂	0,2
CaO.....	2,1
MgO.....	1,07
P ₂ O ₅	0,03
K ₂ O+Na ₂ O.....	5,03
F.....	0,02
Cu.....	0,02

Фізичні характеристики цеоліту

Густина, кг/дм ³	2,37
Питома поверхня, м ² /кг.....	50–65
Пористість, %.....	44
Іонно-обмінна ємність, мг-екв/г.....	1,5
Термостійкість, °C.....	700
Вміст основної речовини, %.....	70

Хімічний склад золошлаків Дарницької ТЕЦ, % мас.

SiO ₂	43,2÷68,4
Al ₂ O ₃	17,8÷30,8
Fe ₂ O ₃	4,8÷20,4
K ₂ O.....	43,2÷68,4
CaO.....	2,0÷3,0
SO ₃	1,0÷1,3

Зола виносу містить неконтрольовану кількість вугілля, що не згоріло. Для дослідів відбирали фракцію < 120 мкм, яка вміщувала його найменшу кількість, але точні значення не контролювалися. Вивчення кристалічних складників золошлаків виявило присутність у них муліту (3 Al₂O₃ · 2 SiO₂), кварцу (SiO₂) та оксиду заліза (Fe₃O₄).

Рідке скло відповідно до сертифікату мало такі властивості:

- щільність не нижче 1,42 г/см³;
- масова частка оксиду кремнію не більше 27,32 %;
- масова частка оксиду кальцію не більше 10,4 %;
- силікатний модуль 2,8÷3,0.

Імітат кубового залишку (КЗ) наближався до складу РРВ Запорізької АЕС. Додатково в імітат вносили дезактивуючий препарат «Щит-КС» ТУ У 20,4–31454306–001:2014, який широко застосовують на АЕС України. Для контролю вилуговування методом атомно-адсорбційної емісії додавався нітрат стабільного цезію та хлорид стронцію. Для отримання базового імітату [7] солі змішували з водою, маса солей в 1 л імітату була приблизно 700 г.

Вивчення поведінки імітату показало, що після змішування всіх солей з водою температура суміші підіймається до (55÷60) °С. За такої температури солі, що входять до складу імітату, перебувають переважно в розчиненому стані.

Експериментально підібраний базовий склад компаунда, % мас.

Імітат.....	34,6
Рідке скло.....	15,3
Суміш золи зі шлаком.....	49,5
КОН.....	0,6

У роботі розглядався вплив на властивості компаундів таких компонентів (факторів): рідкого скла, суміші золи зі шлаком та гідроксиду калію (зразки ГЦ-59 — ГЦ-66). У всіх зразках маса внесеного імітату була незмінною, вміст сухих солей складав 20–25 %. До роботи залучався факторний аналіз трьох факторів на двох рівнях [8]. Якщо обрати су-

марну масу означених компонентів за 100 %, то під час створення компаундів кожен із факторів змінювався на ± 17 %. У зразках комбінація мас компонентів не повторювалася.

Виготовлення зразків компаундів проводилося за схемою (див. рисунок). Після поєднання всіх компонентів з імітатом суміш перебувала в рідкому стані, що дало змогу заповнити форми у вигляді куба з ребром 5 см для вимірювання межі міцності на стиск, морозостійкості, довготривалого контакту з водою. Для вивчення радіаційної стійкості зразки мали розміри 1,5×1,5×1,5 см. Швидкість вилуговування визначали на прямокутних зразках із площею контактної поверхні від 96 до 104 см².

Після виготовлення зразки від 7 до 10 діб перебували в умовах підвищеної вологості, а надалі підсушувалися за температури 16÷18 °С.

Межу міцності на стиск визначали за [9]. Зменшені розміри зразків враховувалися множенням отриманих результатів на коефіцієнт 0,7.

Для вивчення морозостійкості зразки заморожувалися за температури –19 °С. Після нагріву зразків до кімнатної температури заморожування повторювали. Кількість циклів заморожування-відтанення дорівнювала 30.

Результати та обговорення

Зразки компаундів, які заливали у відповідні форми, з часом починали тужавитися. Враховуючи те, що до початку тужавлення елементи цезію та стронцію перебувають у розчинному стані й можуть вбудовуватися в геополімерну матрицю, то після закінчення тужавлення, яке вимірюється приладом Віка, рухомість елементів стає малоюмовірною. Тому з компонентним складом зразків пов'язувалася важлива технологічна характеристика — термін закінчення тужавлення. Розрахунки показали таке співвідношення:

$$H(t) = 11,9 + 0,9m_{\text{p/c}} - 0,3m_{\text{з/ш}} + 4,7m_{\text{КОН}}, \quad R_s = 0,9, \quad (1)$$

де $H(t)$ — термін закінчення тужавлення, хв; $m_{\text{p/c}}$ — маса рідкого скла, г; $m_{\text{з/ш}}$ — маса суміші золи зі шлаком, г; $m_{\text{КОН}}$ — маса гідроксиду калію, г; R_s — коефіцієнт кореляції між експериментальним та розрахованим значеннями $H(t)$.

Включення в рівняння компонентів, означених у грамах, обумовлено тим, що крім факторів, які розглядаються, на властивості компаундів впливають

також кількість імітату, кількість води в компаундах тощо, які в цій роботі не розглядалися. Кількість імітату до всіх зразків вносились однакова, але внаслідок варіювання мас компонентів її частка змінювалася від 30,6 до 37,8%. Для врахування цього фактора кількість зразків необхідно було збільшити у 2 рази (до 16 зразків різного складу на кожний показник). З рівняння (1) виходить, що рідке скло та гідроксид калію подовжують термін завершення процесу тужавлення, водночас як суміш золи зі шлаком цей процес прискорюють.

При аналізі щільності зразків було отримано рівняння

$$\rho = 1,94 - 3 \cdot 10^{-4} m_{\text{p/c}} + 2,6 \cdot 10^{-4} m_{\text{з/ш}} - 2,9 \cdot 10^{-2} m_{\text{КОН}}, \quad R_s = 0,58, \quad (2)$$

де ρ — щільність зразків компаундів, г/см³.

З отриманого рівняння видно, що за низьким значенням R_s рідке скло та особливо гідроксид калію полегшують зразки, у той час як суміш золи зі шлаком роблять їх більш щільними.

Слабка залежність від компонентів спостерігається також для пористості компаундів:

$$\varphi = 3,5 + 0,01 m_{\text{p/c}} + 0,004 m_{\text{з/ш}} + 0,54 m_{\text{КОН}}, \quad R_s = 0,53, \quad (3)$$

де φ — пористість зразків, %; інші позначення, як у попередніх рівняннях.

Залежність межі міцності на стиск компаундів може бути представлена як

$$W = 12,6 - 0,025 m_{\text{p/c}} + 9 \cdot 10^{-3} m_{\text{з/ш}} - 0,39 m_{\text{КОН}}, \quad R_s = 0,68, \quad (4)$$

де W — межа міцності на стиск, МПа.

Це важливий показник, який використовується для оцінювання структурної стабільності матриці, морозо- та водостійкості за тривалого перебування компаундів у воді тощо. Зменшення цього показника рідким склом та гідроксидом калію необхідно враховувати під час виготовлення компаундів. Якщо як аргументи означити масу компонентів у процентах від маси компаундів, то отримуємо нове рівняння, в якому будуть інші коефіцієнти, але вплив компонентів на межу міцності залишаться як у попередньому рівнянні:

$$W = 16,6 - 0,028 m_{\text{p/c}} + 0,013 m_{\text{з/ш}} - 3,4 m_{\text{КОН}}, \quad R_s = 0,68, \quad (5)$$

де маси компонентів надаються в процентах.

При вивченні швидкості вилуговування цезію та стронцію з компаундів за роботою [10] були отримані

Таблиця 1. Швидкість вилуговування (10^{-3} г/(см² · доба))

№ зразка	Cs		Sr	
	за 7 діб	за 28 діб	за 7 діб	за 28 діб
ГЦ-59	26,7	9,3	3,5	2,1
ГЦ-60	20,4	7,2	3,4	1,75
ГЦ-61	28,9	10,7	2,7	1,0
ГЦ-62	22,9	11,0	2,4	1,0
ГЦ-63	25,5	9,2	3,5	1,7
ГЦ-64	25,2	8,9	3,3	1,54
ГЦ-65	23,9	10,7	3,0	1,06
ГЦ-66	23,1	8,4	3,2	1,6

результати, наведені в табл. 1. Під час розрахунків відповідних регресій автори орієнтувалися на результати вилуговування на 28-му добу.

На цей момент швидкість вилуговування цезію описується рівнянням

$$Z_{\text{Cs}28} = 0,01 + 5 \cdot 10^{-6} m_{\text{p/c}} - 1,1 \cdot 10^{-5} m_{\text{з/ш}} + 4,2 \cdot 10^{-4} m_{\text{КОН}}, \quad (6)$$

$R_s = 0,78$, де Z_{Cs} — швидкість вилуговування цезію на 28-му добу, г/(см² · доба).

Решта позначень, як у рівнянні (7).

Водночас вплив в'язучих компонентів на вилуговування стронцію має протилежний характер:

$$Z_{\text{Sr}28} = 2,6 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-7} m_{\text{p/c}} + 4,5 \cdot 10^{-6} m_{\text{з/ш}} - 2,9 \cdot 10^{-6} m_{\text{КОН}}, \quad (7)$$

$R_s = 0,8$, де $Z_{\text{Sr}28}$ — швидкість вилуговування стронцію на 28-му добу, г/(см² · доба).

Порівнюючи результати швидкості вилуговування на 28-му добу (див. табл. 1), видно, що швидкість вилуговування стронцію наближається до нормативного показника $1 \cdot 10^{-3}$ г/(см² · доба), у той час як швидкість вилуговування стронцію на порядок вища. Це можна пояснити значною кількістю катіонів K^+ у компаунді, що присутні в імітаті й додаються в геополімерне в'язуче. Якщо враховувати лише КОН, що додається в геополімерне в'язуче, то кількість катіонів K^+ майже в 50 разів перевищує кількість катіонів Cs^+ . За хімічними властивостями катіони K^+ подібні до Cs^+ , і тому вони під час синтезу встигають зайняти вакантні посадкові місця і зафіксуватися в геополімерних матрицях зразків. Результати вимірювання швидкості вилуговуван-

ня цезію зі зразків на 7-му та 28-му добу дозволили розрахувати термін досягнення нормованої швидкості вилуговування і зв'язати її з їхнім компонентним складом.

Рівняння в цьому випадку має такий вигляд

$$N = 454,1 + 0,26m_{\text{р/с}} - 0,64m_{\text{з/ш}} + 11,4m_{\text{КОН}}, R_s = 0,74, (8)$$

де N — термін, за який швидкість вилуговування цезію виходить на нормативний показник, який становить $1 \cdot 10^{-3}$ г/(см² · доба) [1].

Маси компонентів у зразках означені в грамах.

Рівняння (8) свідчить, що цей термін подовжують рідке скло та КОН, у той час як суміш золи зі шлаком його скорочує.

Для вивчення морозостійкості була залучена обмежена кількість зразків. Установлено, що після заморожування та подальшого відтаювання межа міцності на стиск знижується в середньому на 13,7%.

Автори підкреслюють, що наведені в рівняннях 6–8 коефіцієнти регресії були отримані в умовах застосування концентрацій стабільних цезію та стронцію, які набагато перевищують питомий масовий вміст радіоактивних ізотопів ^{137,134}Cs та ⁹⁰Sr у реальних РРВ. Тому для реальних РРВ зазначені кількісні показники можуть помітно відрізнятися від наведених у цій роботі, але якісна картина впливу компо-

нентів геополімерних в'язучих на властивості компаундів залишиться незмінною.

У графічному вигляді результат досліджень наведено в табл. 2.

Висновки

1. Досліджено вплив компонентів, що входять до складу геополімерних в'язучих, на властивості компаундів, отриманих за цементування високосольового борвмісного імітату РРВ.

2. Установлено, що в інтервалі від 13,4 до 20,8% від маси компаунда рідке скло подовжує термін закінчення процесу тужавлення компаундів, зменшує їхню щільність, збільшує їхню пористість, зменшує межу міцності на стиск, збільшує швидкість вилуговування цезію та стронцію на 28-му добу, збільшує час виходу вилуговування цезію на нормований показник $1 \cdot 10^{-3}$ г/(см² · доба).

3. Суміш золи зі шлаком у співвідношенні 1:1 в інтервалі від 39,3 до 47,7% від маси компаунда зменшує час закінчення процесу тужавлення і збільшує щільність зразків та їхню пористість, збільшує межу міцності на стиск, зменшує швидкість вилуговування цезію, підвищує швидкість вилуговування стронцію, зменшує час виходу швидкості вилуговування цезію на нормований показник.

4. Гідроксид калію в інтервалі від 0,64 до 1,1% від маси компаундів збільшує час закінчення процесу тужавлення, зменшує межу міцності на стиск зразків компаундів, зменшує щільність, підвищує пористість, підвищує швидкість вилуговування цезію, зменшує швидкість вилуговування стронцію та подовжує час виходу швидкості вилуговування цезію на показник $1 \cdot 10^{-3}$ г/(см² · доба).

5. Отримані рівняння дають змогу прогнозувати властивості компаундів при змінній співвідношенні компонентів геополімерних в'язучих.

6. Виконана робота дає уявлення щодо об'єму експериментальних досліджень, необхідних для розробки технологічного регламенту цементування РРВ геополімерними в'язучими з отриманням кінцевого продукту, прийняттого для передачі на захоронення.

Список використаної літератури

- ГОСТ Р 51883–2002. Отходы радиоактивные цементованные. Общие технические требования. Госстандарт России. — Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 7 с.

Таблиця 2. Вплив компонентів геополімерних в'язучих на властивості компаундів

Компоненти в'язучих	Властивості компаундів							Морозостійкість	Радіаційна стійкість
	Закінчення тужавлення	Щільність	Пористість	Межа міцності	Швидкість вилуговування Cs	Швидкість вилуговування Sr	Термін досягнення показника $1 \cdot 10^{-3}$ г/(см ² · доба)		
Рідке скло	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑	Залежності не виявлено	Зразки після дози 10 кГр зовні не змінилися
Шлак, зола	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑		
КОН	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑		

Примітка. «↑» — збільшує, підвищує, подовжує; «↓» — зменшує, знижує, скорочує.

2. Davidovits J. The Pyramids: An Enigma Solved / J. Davidovits. — New York : Dorset Press, 1988.
3. Davidovits J. Soft mineralurgy and geopolymers / J. Davidovits // Material International Conference “Geopolimer 88” (Universite de Technologie, Compiègne, France). — 1988. — P. 49–56.
4. Davidovits J. Chemistry of geopolymeric systems terminology / J. Davidovits // Material International Conference “Geopolimer” (France). — 1999.
5. СОУ ЯЕК 1.037:2013. Короткоіснуючі низько- та середньоактивні відходи АЕС. Вимоги до кінцевого продукту переробки. — Затверджено Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 790 від 28 жовтня 2013 р. — Київ, 2013.
6. Глуховский В. Д. Грунтосиликаты, их свойства, технология изготовления и область применения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Д. Глуховский; М-во высш. и сред. спец. образования УССР. — Киев : Инж.-строит. ин-т, Науч.-исслед. лаб. грунтосиликатов, 1965. — 44 с.
7. Цементування боратвмісних рідких радіоактивних відходів за підвищеної температури / Ю. О. Ольховик [та ін.] // Ядерна енергетика та доквілля. — 2019. — Вип. 13 (1). — С. 59–66.
8. Получение глинополимерных материалов с применением природных компонентов / А. С. Чекмарев [и др.] // Вестн. Казан. технол. ун-та. — 2010. — Вып. 8. — С. 272–276.
9. ДСТУ БВ. 2.7:187.2009. Будівельне матеріалознавство. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск / за ред. П. В. Кривенко. — Київ : Ліра-К, 2012. — 624 с.
10. ГОСТ Р 52126–2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания; введ. Постановлением Госстандарта России от 30 октября 2003 г. № 305-ст. — Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003.

Yu. G. Fedorenko¹, Yu. A. Olkhovik¹, A. N. Rozko², G. P. Pavlyshyn¹

¹ SI “Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine”, 34a, Palladin ave, Kyiv, 03142, Ukraine

² M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, 34, Palladin ave, Kyiv, 03142, Ukraine

Influence of Geopolymer Binder Components on Properties of Compounds during Cementation of Boron-Containing Liquid Radioactive Waste

The paper presents an analysis of the experimental results of the use of geopolymer binders for cementing boron-containing liquid radioactive waste (LRW). The dependence of the properties of compounds on the component composition of binders has been studied.

The following components are considered: liquid glass with a silicon modulus of 2.9, a mixture of ash of Darnytsya TPP with slag of the Mariupol metallurgical plant in a ratio of 1: 1 and potassium hydroxide.

To perform a factor analysis of the effect, the mass of these substances was taken as three factors in the analysis at two levels. For the manufacture of compounds imitation LRW was mixed with zeolite in a ratio of 10:1 at a temperature of about 60°C.

Subsequently, the above components were added to the mixture, the weight of which varied by ±17% relative to the weight of the base compound. To study the properties, samples of different sizes 5×5×5 cm, 1.5×1.5×1.5 cm and rectangular samples with an outer surface from 96 cm² to 104 cm² were made.

Each property was studied in 8 samples. The obtained results allowed to construct linear equations that quantitatively link the corresponding characteristic of the compound with the composition of the binders.

The correlation coefficients between the experimental and the data calculated by the equation are estimated. The average values of the correlation coefficients may indicate that not all factors were taken into account. The obtained regularities show that in the conditions of the experiment slag and ash increase, and liquid glass and potassium hydroxide reduce the rate of setting of the samples.

The density of the samples is increased by ash and slag, while liquid glass and potassium hydroxide are reduced. The compressive strength of liquid glass and potassium hydroxide is reduced, while the mixture of ash and slag is increased. The leaching rate Cs of liquid glass and potassium hydroxide is increased, the mixture of ash and slag is reduced. At the same time, the leaching rate of Sr increases the ash/slag mixture, while liquid glass and potassium hydroxide decrease.

The time during which the leaching of Cs reaches the normative values, slag and ash are reduced, and liquid glass and potassium hydroxide are lengthened. The obtained results can be taken into account when optimizing the composition of geopolymer binders for cementing LRW.

Keywords: geopolymer binders, cementation, boron-containing liquid radioactive waste, leaching of radionuclides.

References

1. GOST R51883–2002. *Otkhody radioaktivnyye tsementirovannyye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. Gosstandart Rossii* [Radioactive cemented wastes. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2002, 7 p. (in Russ.)
2. Davidovits J. (1988). *The Pyramids: An Enigma Solved*. New York: Dorset Press.
3. Davidovits J. (1988). Soft mineralurgy and geopolymers. Proceedings of the Material International Conference “Geopolimer 88” (Universite de Technologie, Compiègne, France), pp. 49–56. (in Fr.)
4. Davidovits J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems terminology. Proceedings of the Material International Conference “Geopolimer”. France. (in Fr.)
5. SOU YaEK 1.037:2013. Short-lived low- and intermediate-level waste of NPPs. Requirements for the final processing product. Approved by the order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, dated October 28, 2013, no. 790. Kyiv, 2013. (in Ukr.)
6. Glukhovskiy V. D. (1965). Gruntosilikaty, ikh svoystva, tekhnologiya izgotovleniya i oblast' primeneniya [Soil silicates, their properties, manufacturing technology and application (ScD thesis)]. (in Russ.)
7. Olkhovik Yu. A., Fedorenko Yu. A., Rozko A. N., Saenko S. Yu., Shkuropatenko V. A. (2019). [Cementation of boron-containing liquid radioactive waste at elevated temperature]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 13, no. 1, pp. 59–66. (in Ukr.)
8. Chekmarev A. S., Seo D. K., Skorina V. S., Chekmareva G. D. (2010). Polucheniye glinopolimernykh materialov s primeneniye prirodnikh komponentov [Production of clay polymer materials using natural components. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan University of Technology], vol. 8, pp. 272–276. (in Ukr.)
9. DSTU BV.2.7–187:2009. Tsementy. Metody vyznachennya mitsnosti na z-hyn i stysk [Cements. Methods for determining the flexural and compressive strength]. Kyiv: Lira-K, 2012. 624 p. (in Ukr.)
10. GOST R52126–2003. Radioactive waste. Long time leach testing of solidified radioactive waste forms. Moscow: Standartinform Publ. (in Russ.)

Надійшла 22.06.2021

Received 22.06.2021