

<https://doi.org/>
УДК 621.039

Розко А.М., Федоренко Ю.Г., Ольховик Ю.О., Павлишин Г.П.

Розко А.М. канд. геол. н., ст. н. с. Інститут геохімії мінералогії та рудоутворення ім. Семененка М.П. НАН України ORCID:0000-0002-4614-5569, al.rozko@gmail.com

Федоренко Ю.Г. н. с., - ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

Ольховик Ю.О. д. т. н., зав. відд., - ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

Павлишин Г.П. гол.матем. - ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

МЕЖА МІЦНОСТІ НА СТИСК КОМПАУНДІВ, ОТРИМАНИХ ПРИ ЦЕМЕНТУВАННІ ВИСОКОСОЛЬОВИХ БОРВМІЩУЮЧИХ РРВ ГЕОПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ

В роботі розглядається перспективність цементування борвміщуючих рідких радіоактивних відходів (РРВ) геополімерними зв'язуючими. Відомо, що геополімерні компаунди можуть бути створені на основі відходів виробництва – мелених шлаків металургійних комбінатів, зол виносу ТЕС і т.п. До геополімерів можуть залучатися луги, які входять до складу РРВ. Міцність геополімерів з часом може збільшуватись у 1,5 – 2 рази, при синтезі геополімерів повітря не забруднюється CO₂. Враховані властивості імітату РРВ, який за температури понад 600 С є концентрованим розчином солей. При охолодженні імітату спостерігаються явища переохолодження і спонтанної кристалізації метаборату натрію. Якщо до імітату додається дисперсний цеоліт фр. < 140 мкм у кількості 10 % від маси імітату, а також рідке скло та суміш шлаку із золою у співвідношенні 1:1, то переохолодження не спостерігається, а метаборат натрію кристалізується у вигляді дрібніших кристалів. Експериментально підтверджено, що кількості лугів, які присутні в імітаті РРВ для утворення міцних геополімерних компаундів не вистачає. Це пояснюється тим, що при перетворенні тетраборату натрію на метаборат з розчину частково виділяється вода та гідрооксид натрію. Для підвищення лужності імітату у цьому випадку необхідно додаткове внесення лугів у експериментально підбраній кількості. Для вивчення межі міцності на стиск було експериментально підбрано співвідношення між компонентами і створено базовий зразок, який мав склад: імітат РРВ, рідке скло, суміш золи із шлаком, КОН, цеоліт. Відносно базового складу проводилося варіювання маси компонентів у зразках. Маса збільшувалася (зменшувалася), на 17 % за постійної маси імітату та цеоліту. Зразки компаундів виготовлялися у однакових умовах при співвідношенні між компонентами, яке не повторювалося. Після витримки і сушки було виміряно межу міцності на стиск, яка для всіх зразків мала середнє значення 9,6±1.5 МПа, окремі зразки мали різну межу міцності, що залежала від складу компаундів. Розрахунки дозволили отримати рівняння, з якого випливає, що в інтервалі варіювання рідке скло та луги (КОН) зменшують межу міцності, у той час як суміш золи із шлаком межу міцності на стиск збільшує. Це може бути враховано при подальших дослідях по залученню геополімерів для цементування РРВ.

Ключові слова: цементування борвміщуючих рідких радіоактивних відходів, геополімери, компаунд, межа міцності на стиск.

Вступ. Межа міцності при одноісному стиску – одна з важливих характеристик компаундів, яка для цементованих рідких радіоактивних відходів (РРВ), згідно документу [1], повинна складати не менше 4,9 МПа. До вимірювання межі міцності звертаються для оцінки радіаційної стійкості компаундів, їх морозостійкості, а також стійкості до тривалого перебування у воді. Вивчення цієї характеристики компаундів особливо важливе при застосуванні нових матеріалів – геополімерних зв'язуючих (геополімерів).

Геополімери – це матеріали з цеолітоподібною структурою, що мають в'язучі властивості і утворюються при обробці алюмосилікатів природного та техногенного походження лугами.

Зазвичай синтез геополімерів відбувається після розчинення оксидів кремнію та алюмінію, розщеп-

лення природних структур на мономери та перетворення мономерів на мінерал-полімерні матеріали.

Вивченню механізму синтезу геополімерів присвячені роботи Дж. Давидовця [2,3,4], В.Д. Глуховського [5] та інших дослідників [6-9].

Останнім часом інтерес до геополімерів значно зріс завдяки новим напрямкам їх застосування, наприклад, при будівництві покриття для летовища в Австралії, виробництві каналізаційних труб фірмою «Рокла», для створення кераміки з регульованою поруватістю [10]. Вважається, що пошук нових геополімерних зв'язуючих обумовлений, головним чином, економічними та екологічними чинниками

Інтерес до геополімерів як зв'язуючих компаундів посилюється завдяки тому, що на даний час на АЕС України накопичено 18,6 тис м³ РРВ [11], для кондиціонування яких потрібні не лише ефективні

методи, а й дешеві і доступні матеріали, якими є в геополімерах відходи виробництва (шлак, зола, шлам і т.д.).

Перспективність застосування геополімерів для цементування РРВ базується на наступних положеннях:

– геополімерні матеріали дозволяють створити зразки з межею міцності більше 50 МПа;

– у геополімерних матеріалах радіоактивні катіони можуть вбудовуватись у кристалічну цеолітоподібну структуру, фіксуватися в ній і таким чином значно знижувати швидкість вилугування;

– завдяки зниженій кількості зв'язаної води стає можливим підвищення радіаційної стійкості та морозостійкості геополімерних компаундів;

– луги (NaOH, KOH), що входять до складу РРВ, можуть бути залучені при активації геополімерів із метою надання їм в'язучих властивостей;

– матеріали для синтезу геополімерів широко розповсюджені, мають інфраструктуру отримання і переробки (глини, цеоліт, і т.д.), окрім того, в геополімерах можуть використовуватися дисперсні матеріали техногенного походження (золи, шлаки, тощо);

– експериментом встановлено, що з часом міцність геополімерів збільшується у 1,5 – 2 рази;

– при виготовленні геополімерів не утворюється, як при виробництві портландцементу, великої кількості CO₂, що в умовах глобального потепління важливо враховувати;

– опанування методами цементування РРВ геополімерами з одночасним вивченням механізмів геополімеризації може зробити цей метод не лише екологічно, але й економічно доцільним.

До складу РРВ входять речовини (солі) у високих концентраціях (до 750 г/дм³), які суттєво впливають на властивості компаундів (знижують межу міцності, підвищують швидкість вилугування тощо).

Метою роботи було дослідження можливості цементування високосольових борвміщуючих РРВ геополімерними зв'язуючими і як перший крок - вивчення межі міцності на стиск різних за складом геополімерних компаундів.

Матеріали та методи

Цементування РРВ геополімерами може виконуватися за наступною схемою (рис.1).

Схема показує, які матеріали і в якій послідовності можуть входити до складу шлаколузних геополімерних (надалі геополімерних) компаундів.

У якості геополімерів у роботі випробовувалися: шлак Маріупольського металургійного комбі-

нату, зола виносу Дарницької ТЕС, цеоліт Сокирицького родовища України. Хімічні складові та фізичні характеристики геополімерів наведено в таблицях 1-4.



Рис. 1 Схема цементування РРВ.

Fig. 1 LRW cementing scheme

Шлак мав наступні властивості: *Якісні показники:*

Масова доля вологи – 0,1 %;

Залишок на ситі 0,08 – 1,25%; Питома поверхня – 288м²/кг.

Таблиця 1. Хімічний склад шлаку, %:

Table 1. Chemical composition of slag, %:

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

Цеоліт.

Таблиця 2. Хімічний склад цеоліту, % (сертифікат Сокирицького цеолітового комбінату)

Table 2. Chemical composition of zeolite, % (Sokyrnytsia zeolite plant's certificate)

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

Таблиця 3. Фізичні характеристики цеоліту (сертифікат Сокирицького цеолітового комбінату)

Table 3. Physical characteristics of zeolite (Sokyrnytsia zeolite plant's certificate)

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

Таблиця 4. Хімічний склад золошлаків Дарницької ТЕЦ, %**Table 4.** Chemical composition of ash slag from Darnytsia HPC, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
43,2÷68,4	17,8÷30,8	4,8÷20,4
K_2O	CaO	SO_3
43,2÷68,4	2,0÷3,0	1,0÷1,3

З таблиці видно, що у залежності від місця відбору проб та фракцій зразків масова доля компонентів змінюється у широких межах, тому при подальшому розвитку робіт цю ситуацію необхідно враховувати.

Вивчення кристалічної складової золошлаків виявило присутність у них муліту ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), кварцу (SiO_2) та оксиду заліза (Fe_3O_4).

Рідке скло, згідно сертифікату, мало наступні властивості:

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

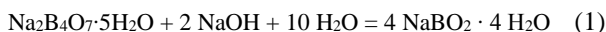
Імітат РРВ та його властивості

Імітат кубового залишку наближався до складу РРВ Запорізької АЕС. Додатково у імітат вносилися поверхнево активна речовина (ПАР) – «ЦИТ», а також додавався нітрат стабільного цезію та хлорид стронцію (табл. 5).

Для отримання базового імітату солі змішували з водою у співвідношенні 1 : 1.

Вивчення поведінки імітату показало, що після змішування всіх компонентів (солей) із водою температура суміші піднімається до (55÷60)°С. За такою температури солі, що входять до складу імітату, перебувають у розчиненому стані.

Поступове зниження температури суміші відбувається приблизно до 27°С, після чого спостерігається підвищення її до 38°С. У суміші починають утворюватись кристали метаборату натрію, згідно з рівнянням 1:



У випадку, коли до імітату за температурою близько 60°С додали рідке скло у кількості 33% від маси імітату, температура суміші знижується приблизно до 46°С і надалі поступово спадає протягом наступних 130 хвилин. Переохолодження суміші не спостерігається. Дрібні кристали метаборату посту-

пово збільшуються, і суміш повністю закристалізовується. Внесення у суміш цеоліту у кількості 10% від маси імітату змінює процес охолодження (рис. 2)

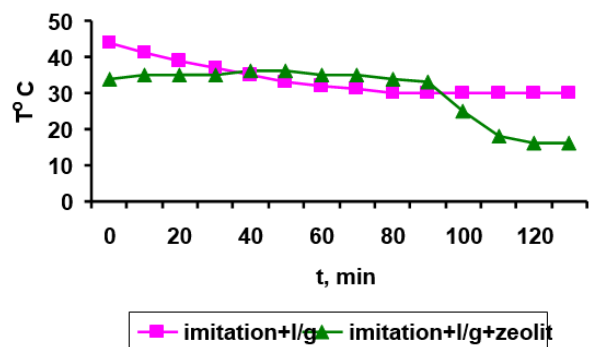
Таблиця 5. Сольовий склад імітату кубового залишку**Table 5.** Salt composition of the basic imitation of VAT residue

Компоненти	Вміст, % мас.
$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	60,1
$NaNO_3$	13,1
$NaCl$	0,5
KOH	3,4
$NaOH$	21,7
Fe_2O_3	0,5
NH_4OH	0,2
$CsNO_3$	0,1
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$	0,1
ПАР	0,4

Спочатку температура суміші на декілька градусів підвищується, суміш перебуває у рідкому стані, надалі у суміші починають випадати кристали метаборату натрію і температура спадає з 36°С до 16°С.

Кристали осідають на дно, а зверху утворюється тонкий шар рідини з $pH \geq 10$. Вмішування у суміш імітату рідкого скла з цеолітом – золи та шлаку – невелике таке різке охолодження, температура компаунду змінюється повільно і з меншим інтервалом; спочатку вона спадає, потім підвищується на декілька градусів, а надалі починає поступово знижуватися. У цей час відбувається цементування РРВ, голка приладу Віка входить у суміш на 1 - 3 мм.

Вибір цеоліту для внесення у суміш обумовлений тим, що у поєднанні зі шлаком цеоліт дає геополімерний матеріал, який перевершує за міцністю геополімери з каоолінітом, бентонітом і т.і. [13].

**Рис. 2.** Хід температури при охолодженні імітату в присутності рідкого скла (l/g) та цеоліту.**Fig. 2.** Temperature curve during cooling of the imitation in the presence of liquid glass (l/g) and zeolite

Не зважаючи на високі значення межі міцності на стиск компаундів, цементування імітату шлаком, цеолітом і тільки лугами, що присутні в імітаті, не дозволило отримати межю міцності компаунду на стиск >4,9 МПа. Використання лугів імітату показало, що їх кількість потребує збільшення. Подальші

дослідження виявили необхідність внесення до складу компаундів золи виносу, рідкого скла та КОН. Методом проб та помилок був отриманий компаунд ГЦ-48, який мав наступний склад: імітат – 34 %, суміш золи із шлаком – 49,5 %, рідке скло – 15,3 %, КОН – 0,6 %. Межа міцності на стиск була > 4,9 МПа.

Вибір та оптимізація складу геополімерних компаундів

Для вивчення впливу кожної компоненти, що входять до складу компаундів, було проведено експеримент [14] за участю трьох чинників: рідкого скла, суміші золи із шлаком у співвідношенні 1 : 1 та лугів – КОН.

Експеримент проводили при незмінній кількості імітату РРВ і постійному режимі створення геополі-

мерних компаундів. За базовий склад було обрано зразок з шифром ГЦ – 48, масу компонентів якого збільшували чи зменшували на 17%. Якщо обрати чинник 1 (X1) – рідке скло, чинник 2 (X2) – суміш золи із шлаком, а чинник 3 (X3) – луги КОН, то при варіюванні було отримано комбінації чинників, наведені у таблиці 7.

Таблиця 6. Чинники та їх маси

Table 6. Factors and their masses

№ фактору	X1(+)	X1(-)	X2 (+)
Кількість, г	175	125	468
№ фактору	X2 (-)	X3 (+)	X3 (-)
Кількість, г	332	8,78	6,23

Номери зразків та співвідношення між факторами надаються у наступній таблиці 7.

Таблиця 7. Схема експерименту

Table 7. Experiment design

N зразків N фактору	ГЦ-59	ГЦ-60	ГЦ-61	ГЦ-62	ГЦ-63	ГЦ-64	ГЦ-65	ГЦ-66
Ф1	+	+	+	+	-	-	-	-
Ф2	+	+	-	-	+	+	-	-
Ф3	+	-	+	-	+	-	+	-

«+» – означає збільшення компоненти на 17 %;

«-» – зменшення компоненти на 17%.

Зразки виготовлялися у такій кількості, щоб у першому наближенні охопити дослідження всіх нормованих показників (Рис. 3).

Після виготовлення компаундів вони до 7 діб витримувалися при підвищеній вологості, а надалі підсихали близько 10 діб у нормальних умовах.



Рис. 3 Зразки цементних компаундів для експериментів.

Fig. 3 Samples for the experiment

Результати вимірювання межі міцності на стиск [15] наведено у таблиці 8.

Таблиця 8. Межа міцності на стиск, МПа

Table 8. Compressive strength, MPa

N зразків	ГЦ-59	ГЦ-60	ГЦ-61	ГЦ-62
Межа міцності	10,4	9,0	6,6	9,7
N зразків	ГЦ-63	ГЦ-64	ГЦ-65	ГЦ-66
Межа міцності	11,2	10,2	8,0	11,4

Наведені результати дозволили отримати наступне рівняння регресії:

$$W = 12,6 - 0,025 m_{p/c} + 0,009 m_{z/sh} - 0,39 m_{KOH} \quad (2)$$

Коефіцієнт кореляції $R = 0,68$

W – межа міцності на стиск, МПа

$m_{p/c}$ – маса рідкого скла у компаунді, г

$m_{z/sh}$ – маса суміші золи із шлаком, г

m_{KOH} – маса гідроксиду калію, г

Рівняння показує, що у виготовленому компаунді при незмінній кількості імітату РРВ міцність компаунду залежить від наступних факторів:

рідке скло – знижує межу міцності;

суміш золи із шлаком – підвищують межу міцності;

КОН – зменшує межу міцності.

Слід зазначити, що такий вплив факторів проявляють у межах інтервалів варіювання. Якщо вико-

ристати результати у %, то отримаємо наступне рівняння (3):

$$W = 16,6 - 0,028 m_{p/c} + 0,013 m_{з/ш} - 3,34 m_{KOH}$$

$$R = 0,68 \quad (3),$$

де позначення такі, як у попередньому рівнянні, але у %.

Вплив факторів на межу міцності має той же характер при $R = 0,68$.

Таким чином, для підвищення межі міцності на стиск необхідно зменшити кількість рідкого скла і лугів та збільшити кількість золи зі шлаком. Але останнє буде підвищувати співвідношення золи зі шлаком до кількості імітату у компаунді, тому кожна зміна повинна узгоджуватися з наступними дослідженнями.

Висновки

1. Встановлено, що застосування геополімерних зв'язуючих, до складу яких входять у різних співвідношеннях зола, шлак, луги (KOH), рідке скло та цеоліт, при цементуванні імітату борвміщуючих РРВ з концентрацією солей до 750 г/дм^3 , дозволяє отримати компаунди, які мають середню межу міцності на стиск $9.6 \pm 1.5 \text{ МПа}$, що задовольняє вимогам нормативного документу,

2. Визнано, що кількість лугів, які входять до складу імітату РРВ, недостатня для самостійного формування геополімерних компаундів необхідної міцності на стиск. Підвищити цей показник вдалося шляхом додавання до компаундів рідкого скла та лугів – KOH.

Досліджено складні взаємні зв'язки між компонентами (факторами) у зв'язуючих та їх вплив на межу міцності компаундів.

3. Рідке скло в інтервалі від 13,4% до 20,7% зменшує міцність зразків, але збільшує тривалість періоду тужавлення;

– суміш золи із шлаком у співвідношенні 1 : 1 у межах від 39,3% до 50,4% збільшує межу міцності на стиск, але одночасно збільшує відношення об'єму компаунду до об'єму імітату, яке у дослідках складало $2.9 \pm 0,22$;

– кількість додаткових лугів (KOH) може бути зменшена або замінена на NaOH.

4. Усі характеристики компаундів пов'язані між собою складом та способом виготовлення. Зміна складу для поліпшення певної характеристики одночасно змінює інші, тому важливим є вивчення кожної характеристики геополімерних компаундів і її залежності від їх складу.

Література

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

2. Davidovits Josef The Piramides: An Enigma Solved. New York: Dorset Press, – 1988

3. Davidovits J. Soft Mineralurgu and Geopolimers. In proceeding of Geopolimer 88 International Conference, The Universite de Technologie. Compiagne. Franse, – 1988. – pp. 49-56.

4. Davidovits J. Chemistry of Geopolimeric Systems Terminology// Proc/ Int/. Conf. "Geopolimer"/ France, 1999

5. Глуховский В.Д. Грунтосиликаты, их свойства, технология изготовления и область применения: Автореферат дис. д.т.н. – Киев, 1965.

6. Чекарев А.С., Получение глинополимерных материалов с применением природных компонентов. / Чекарев А.С., Сео Д.К., Скорина В.С., Чекарева Г.Д. Вестник Казанского технологического университета, 2010, № 8, С.272–276.

7. Кривенко П.В. Цементи та бетони на основі паливних зол і шлаків: / Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Гоц В.І., Ковальчук Г.Ю. Монографія – Київ: ТОВ «ІПК Експрес-Поліграф», 2012. 258 с.

8. P.Duxson Geopolimer technology: the current state of the art // P.Duxson, A. Fernandez – Jimenez, J.L. Provis/ J. Mater. Sci, 2007.V.42, P. 2917-2933.

9. Khaled, Chagudhary. Mechanism of geopolymerization and factors influencinyits development // P. 729 – 746

10. Kumar S, Kumar R Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer, Ce-ramics international, Vol. 37, 2011, pp 533-541.

11. Свицерский В.А. Технологии отверждения жидких радиоактивных отходов / Свицерский В.А., Глуховский В.В., Глуховский И. В. Дашкова Т.С. // Ядерная радиационная безопасность 2019, 1(18), С. 68-74.

12. Асканский бентонит [Электронный ресурс], <https://lityo.com.ua/askanskij-bentonit-vozvrashhaetsya>

13. A. Rozko, Yu. Fedorenko, H. Zadvernyuk Zeolite as a component of binding materials for liquid radioactive waste conditioning Пошукова та екологічна геохімія, гол. редактор Жовінський Е.Я. № 1(20), 2019, – С.29- 31

14. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. / Новик Ф.С., Арсов Я.Б. : Машиностроение; 1980, – 304 С.

15. ДСТУ БВ. 2.7 –: 187. 2009. Будівельне матеріалознавство. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск / За ред. П.В.Кривенко.. - К.: Ліра-К, 2012. - 624 с

References

1. HOST R 51883-2002 Radioactive cemented wastes. General specifications. Gosstandart of Russia. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002. 7 p. RD 306.4.008 - 2004.

2. Davidovits Josef (1988): Dorset Press, pp. 72 – 78

3. Davidovits J. (1988), International Conference, The Universite de Technologie. Compiagne. Franse., pp. 49-56.

4. Davidovits J. (1999), Proc. Int.. Conf. "Geopolimer". France,

5. V.D. Glukhovsky (1965), Hruntosylykaty, ykh svoystva, tekhnolohyya yzhotovlenyya y oblasti prymerenyuya: dissertation abstract D.techn.n. Kiev.

6. A.S. Chekmarev, et. al. (2010), Visnik Kazanskoho Universitetu Technologiy, 8, RU pp. 272-276.

7. Kryvenko PV, et. al.. (2012), LLC IPK Express-Polygraph : Kiev, UA. 258 p.
8. P.Duxson, et. al.. (2007), Mater. Sci, **42**, P. 2917-2933.
9. Khaled, Chagudhary. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development pp. 729 – 746
10. Kumar S, Kumar R (2011) Ce-ramics international, Vol. 37, p. 533-541.
11. Svidersky V.A. et.al. (2019) Yadernaya ta Radiationa bezpeka, 1 (18), pp. 68–74.
12. Askan Bentonite Returns (2019), available at: <https://lityo.com.ua/askanskij-bentonit-vozvrahsya>
13. A. Rozko, Yu. Fedorenko, H. Zadvernyuk (2019), Search and environmental geochemistry, ch. editor E. Zhovinsky. No. 1 (20), pp. 29–31
14. Novik F.S, Arsov Ya.B. (1980). Mechnostroenie, RU. 304 p.
15. DSTU BV. 2.7 - 187: Tsementy. Metody vyznachennya mitsnosti na z'hyn i stysk. Building materials science. Ed. P.V. Kryvenko. K.: Lyra-K, 2012. 624 p.

COMPRESSING STRENGTH LIMIT OF COMPOUNDS PRODUCED BY CEMENTATION ON HIGH SALINE BORON-CONTAINING LRW WITH GEOPOLYMER BINDERS

Rozko A., Ph.D.(Geol), Senior Researcher, the M. P Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, ORCID:0000-0002-4614-5569, al.rozko@gmail.com

Fedorenko Yu., Researcher, State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine»

Olkhovik Yu., Dr.Sc. (Tech), State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine"

Pavlishin H., Chief Specialist, State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine»

The prospects of boron-containing liquid radioactive waste (LRW) solidification using cement with geopolymer binders have been considered. It is known that geopolymer compounds can be produced on the basis of industrial wastes – ground slag from metallurgical plants, TPPs' ash-slag, etc. Geopolymers may comprise alkalis that are part of LRW. The strength of geopolymers may increase by 1.5 – 2 times over time. The synthesis of geopolymers does not pollute the air with CO₂. The properties of a LRW simulator, which was a concentrated salt solution at the temperature above 60 °C, were taken into account. During the cooling of the simulator, the phenomena of hypothermia and spontaneous crystallization of sodium metaborate have been observed. If <140 μm fraction of dispersed zeolite was added in the amount of 10 mass% to the simulator together with liquid glass and 1 : 1 mixture of slag and ash, the hypothermia was not observed, while sodium metaborate crystallized in the form of smaller crystals. It has been experimentally validated that the amount of alkalis present in the LRW simulator was not sufficient for formation of strong geopolymer compounds. It is attributed to the fact that in the process of sodium tetraborate conversion to metaborate, water and sodium hydroxide were partially removed from the solution. To increase the alkalinity of the simulator, experimentally determined amounts of alkali were added. To study the compressive strength limit, the ratio of the components has been experimentally determined and a basic sample containing the LRW simulator, liquid glass, ash and slag mixture, alkalis (KOH) and zeolite was produced. As to the basic composition, the mass of the components (factor experiment) in the samples varied. The mass increased by 17%, while the mass of simulator and zeolite was constant. Compound samples were made under the same conditions with different ratios of the components. The compressive strength was measured after exposure and drying. The average value for all samples was 9.6 ± 1.5 MPa. Some samples had different compressive strength limits depending on the composition of the compounds. The calculations allowed generating an equation according to which liquid glass and alkali (KOH) reduce the compressive strength limit in the variation interval, while the ash and slag mixture increases it. This should be taken into account in further experiments on application of geopolymers for LRW cementation.

Key words: prospects of solidification of boron-containing liquid radioactive waste, geopolymer, compound, the compressive strength limit