
ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ

УДК 621.039.736

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.29>

АЛЬТЕРНАТИВНІ ЗВ'ЯЗУЮЧІ ДЛЯ ІММОБІЛІЗАЦІЇ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Злобенко Б.П., Федоренко Ю.Г., Розко А.М., Ольховик Ю.О.
Державна установа Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України
пр. академіка Палладіна, 34А, м. Київ
borys.zl@gmail.com, al.rozko@gmail.com, yolkhovyk@ukr.net

Під час експлуатації або при знятті з експлуатації енергоблоків АЕС утворюються рідкі органічні радіоактивні відходи, поводження з якими вимагає брати до уваги їхню природу і притаманні їм специфічні властивості. Більшість органічних відходів несумісні з навколишнім середовищем, тому варіант “розведення та скидання” не може бути застосовано до рідких органічних радіоактивних відходів. Крім іммобілізації радіонуклідів, органічні компоненти відходів повинні бути зруйновані або переведені в стабільну нетоксичну форму. Розглянуто і систематизовано технологічні особливості іммобілізації рідких органічних радіоактивних відходів (РОРВ) у геополімерну матрицю, яка може становити основу упаковки радіоактивних відходів та відповідати вимогам радіаційної безпеки для розміщення у сховищах для захоронення. Запропоновано застосування відповідних компонентів для покращення ефективності синтезу композиційних матеріалів з іммобілізованими РОРВ залежно від використаного технологічного регламенту та виду сировини. Розглянуто особливості механізму синтезу геополімерів в залежності від кількості СаО у сировині. Розглянуто переваги і недоліки різних способів кондиціонування РОРВ геополімерними зв'язуючими – пряме цементування, цементування емульсії та цементування насиченого маслом адсорбента.

Для синтезу геополімерів з різними механізмами утворення застосовано метакаолін, золу виносу Дарницької ТЕС та шлак Маріупольського металургійного комбінату. Синтезовано зразки з безпосереднім введенням масла у геополімер, а також з застосуванням попередньої емульгації і неорганічних адсорбентів. Отримано компаунди з межею міцності на стиск більше 10 МПа, що відповідає вимогам для захоронення радіоактивних відходів у приповерхневих сховищах. Найбільшу міцність мають зразки на основі матеріалу з високим вмістом СаО – шлак з додаванням метакаоліну. *Ключові слова:* рідкі органічні радіоактивні відходи, кондиціонування, геополімери, шлак, метакаолін.

Alternative binders for immobilization of liquid organic radioactive waste. Zlobenko B., Fedorenko Yu., Rozko A., Olkhovik Yu.

During the operation or decommissioning of NPP units, liquid organic radioactive waste (LORW) is generated, the management of which requires taking into account their nature and their specific properties. Most organic waste is incompatible with the environment, so the “dilution and disposal” option cannot be applied to liquid organic radioactive waste. Technological features of immobilization of liquid organic radioactive waste (LORW) into a geopolymer matrix, which can form the basis of radioactive waste packaging, and meet the requirements for placement in storage facilities for disposal are considered and systematized. Several ways to condition LORW with geopolymer binders are used in the work. This is the so-called direct method, when the oil is introduced into the geopolymer before it hardens; the method by which the oil is previously converted into an emulsion by means of surfactants, which is then mixed into the geopolymer, and the method of pre-saturation of solid adsorbents with oil. The use of appropriate components to improve the efficiency of synthesis of composite materials with immobilized LORW depending on the used technological regulations and the type of raw materials is proposed. The peculiarities of the mechanism of geopolymer synthesis depending on the amount of CaO in the raw material are considered. The advantages and disadvantages of several methods of conditioning RORV with geopolymer binders are considered.

Metakaolin, ash from the Darnytsya TPP and slag from the Mariupol Metallurgical Plant were used for the synthesis of geopolymers with different formation mechanisms. Samples with direct introduction of oil into the geopolymer, as well as with the use of pre-emulsification and inorganic adsorbents were synthesized. Compounds with a compressive strength of more than 10 MPa are obtained. Samples based on a material with a high content of CaO – slag with the addition of metakaolin have the greatest strength. *Key words:* liquid organic radioactive waste, conditioning, geopolymers, slag, metakaolin.

Постановка проблеми. Радіоактивні відходи (РАВ), що утворюються під час експлуатації або при знятті з експлуатації енергоблоків АЕС мають різноманітний склад. Деяка частина зазначених відходів повністю складається із органічних матеріалів, які можуть бути як в твердому, так і в рідкому стані. Поводження з твердими органічними радіоактивними відходами на АЕС України вирішується застосуванням технологій, передбачених у складі

комплексів з переробки РАВ. Хоча об'єм рідких органічних РАВ порівняно невеликий, поводження з ними вимагає брати до уваги їхню природу і притаманні їм специфічні властивості, такі як горючість, леткість, токсичність, радіаційна і хімічна стійкість.

На діючих українських АЕС для переробки рідких органічних радіоактивних відходів використовують наступні технології:

– На Запорізькій і Хмельницькій АЕС забруднена радіоактивне масло утилізується на установках спалювання потужністю 12 і 5 кг/год

– Рівненська АЕС використовує установку очищення масла потужністю 500 кг/год, призначену для регенерації накопиченого відпрацьованого мастила від усіх енергоблоків ВП РАЕС шляхом зневоднення і очищення від механічних домішок.

Чорнобильська АЕС, енергоблоки якої перебувають у стані зняття з експлуатації, не має будь-яких установок для переробки рідких органічних РАВ і накопичене радіоактивно забруднене масло (головним чином турбінне масло ТП-22) зберігається у сталевих танках у сховищах на площадці станції. Наразі загальний об'єм забрудненої оливи складає 145 м³, загальна активність внаслідок наявності ¹³⁷Cs оцінюється у 2,6Е+7Бк.

Оскільки багато органічних відходів несумісні з навколишнім середовищем, варіант “розведення та скидання” не може бути застосованим до рідких органічних радіоактивних відходів. Крім іммобілізації радіонуклідів, органічні компоненти відходів повинні бути зруйновані або переведені в стабільну нетоксичну форму [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Перші дослідження, пов'язані з прямим цементуванням рідких органічних радіоактивних відходів (РОРВ), були проведені у США в 1983 році [2]. Вони полягали в прямій іммобілізації насосного масла у портландцементі з добавками емульгатора та прискорювача тужавлення. Цементування характеризується невисоким наповненням матриці оливою (до 15–20% мас.) [3]. Дослідження, присвячені вивченню впливу органічних рідин на портландцементні пастах спричиняє уповільнення гідратації та структурні дефекти, які можуть викликати значне вимивання органічних сполук [4–5]. Щоб подолати цю проблему, було рекомендовано реалізувати етап абсорбції перед іммобілізацією РОРВ в портландцементі [3,6–8]. Нещодавно було показано, що кондиціонування РОРВ можна оптимізувати за допомогою альтернативних мінеральних в'язучих, які дозволяють обмежити, а іноді навіть виключити хімічні взаємодії між відходами та в'язучим. Серед цих альтернативних сполук геополімери та споріднені матеріали, активовані лугом [9], є досить перспективними для застосування.

Основний зміст. Пряме кондиціонування полягає в інкапсуляції РОРВ в тверду матрицю з метою отримання композиційного геоматеріалу, який може становити основу упаковки радіоактивних відходів, та відповідати вимогам для розміщення у сховищах для захоронення. Зазначений принцип заснований на емульгуванні РОРВ в розчині лужних силікатів (активаційний розчин) з наступним додаванням джерела алюмосилікату (метаколіну), що призводить до схоплювання композиту «РОРВ/геополімер».

Існують декілька способів кондиціонування РОРВ геополімерними зв'язуючими [5,6,9]. Це так званий прямий спосіб, коли масло вводиться у геополімер до початку його тужавлення; спосіб за яким масло попередньо за допомогою ПАР (поверхнево активні речовини) перетворюють у емульсію, що потім вмішується у геополімер, та спосіб попереднього насичення твердих адсорбентів маслом. В геополімер у такому разі вноситься насичений маслом адсорбент.

Попередніми дослідженнями встановлено, що перевагами прямого кондиціонування РОРВ за допомогою геополімерного методу в порівнянні з прямим кондиціонуванням за допомогою звичайних цементів є відсутність взаємодій РОРВ/геополімеру, що може спричинити затримку схоплювання або негативний вплив на кінцеві властивості матеріалу; при цьому дуже корисним є емульгування РОРВ в лужному силікатному розчині.

Для простоти геополімери та пов'язані з ними матеріали, активовані лугом, в решті тексту названі геополімерами (ГП).

Згідно з сучасними уявленнями [10] синтез геополімерів може відбуватися за двома механізмами в залежності від кількості СаО у сировині.

За відсутності, або малою кількістю СаО синтез геополімерів відбувається за такою схемою:

– на першому етапі оксиди кремнію та алюмінію розчиняються у лужному середовищі концентрованого розчину NaOH чи KOH ;

– на другому – похідні мономерних структур розщеплюються на мономери;

– на третьому етапі відбувається поєднання та ущільнення внаслідок перетворення мономерів у полімерні матеріали.

Типовим представником розглянутого механізму синтезу геополімерів є метаколін з якого як відомо, синтезовані перші геополімери.

За наявності у сировині великої кількості СаО механізм відтворення в'язучих змінюється [11–14]. У системах багатих СаО утворюються гелі типу СаО – Na₂O – Al₂O₃ – SiO₂ – H₂O шляхом механізмів гідратації подібних утворенню СаО – Al₂O₃ – SiO₂ – H₂O у портландцементі [14].

При зменшенні кількості СаО у системах утворюються гелі наступної будови Na₂O – Al₂O₃ – SiO₂ – H₂O внаслідок реакції поліконденсації (геополімерізації). У цьому випадку вода потрібна лише як середовище для розчинення і після поліконденсації вода звільняється на відміну від випадку з великою кількістю СаО, де вода вбудовується у структуру.

Типовим представником системи з високим вмістом СаО є відвальний доменний шлак, який при взаємодії з лужними активаторами утворює шлаколужне зв'язуюче (геополімер) – шлаколужний цемент [11, 15, 16].

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності синтезу композиційних матеріалів з іммобілі-

зованими POPB залежно від використаного технологічного регламенту та виду сировини. Розуміння фізико-хімічних процесів при цементуванні POPB геополімерами різними способами може покращити контроль процесу інкапсуляції та досягнення нормованих властивостей затверділих матеріалів.

Матеріали та методи досліджень. Для синтезу геополімерів з різними механізмами утворення застосовували метакаолін, золу виносу та шлак. Хімічний склад матеріалів наведено в таблиці 1.

Метакаолін отримували шляхом прогріву каоліну Глуховецького родовища протягом 4 годин за температури 800 °С. У метакаоліні в якості домішок у невеликій кількості спостерігались слюда та кварц.

Наступними компонентами, які застосовані для синтезу геополімерів, були близькі за властивостями золи виносу Трипільської та Дарницької ТЕС.

До складу золи входить недопал вугілля у кількості близько 20 %, а також алюмосилікатні мікросфери.

Для зменшення вмісту недопалу та мікросфер від золи відділяють фракцію <125 мкм. Як було встановлено до складу мікросфер також входять кристалічні речовини. Кристалічні речовини імовірно локалізуються в середині мікросфер тоді як їх поверхня має склоподібну будову. На електронно-мікроскопічних знімках спостерігаються численні лунки від мікросфер на поверхні геополімерних матриць – рис. 1.

У роботі [17] вказується, що не кожна зола придатна для створення геополімерів. Слід також зазначити, що відібрані з різних ділянок золосховища зразки можуть відрізнятися за складом та хімічною будовою. Це вимагає ретельної додаткової підготовки та контролю золи виносу, що призводить до деякого обмеження її застосування. Вважається [17], що золу виносу доцільно поєднувати із шлаком у тому випадку, коли вона вміщує велику кількість CaO.

Шлак Маріупольського металургійного комбінату використовувався у фракції <125 мкм. За співвідношенням Ca/(Si+Al) = 1 шлак відноситься до речовин з великим вмістом CaO [10]. З таблиці 1 видно, що у порівнянні з метакаоліном та золою шлак містить найменшу кількість Al₂O₃. У шлаку присутні як кристалічні речовини так і склофаза, кількість якої може сягати за масою 50 % і більше.

Найбільш важливою складовою шлаку є склоподібна (рентгеноаморфна) фаза, хімічна будова якої потребує дослідження. Можливо стверджувати, що у складі цієї фази присутні CaO та SiO₂. На користь цього свідчить той експериментальний факт, що на рентгенограмі геополімеру утворе-

ного на основі шлаку крім дифракційних рефлексів притаманних шлаку з'являються рефлекси нової кристалічної фази, ймовірно гідросилікату кальцію 2CaO·SiO₂·nH₂O.

У якості твердого адсорбенту для попереднього насичення маслом використано мінерал палигорськит фр. <0,4 мм висушений за температурою 110 °С протягом 5 годин – рис. 2. Вибір палигорськиту обумовлений тим, що з багатьох природних дисперсних мінералів він найбільше поглинав нафту та дизельне паливо [18]. Як було встановлено сухий палигорськит може поглинати та утримувати близько 60 % мас. компресорного масла.

У якості ПАР застосовували комерційну суміш за ТУ У 24.5 – 25470089-011-2004, основними компонентами якої є ПАР аніонні – від 5 % до 15 %, амфотерні менше 5 %, неіоногенні – менше 5 %, трилон – менше 5 %

Для кондиціонування застосовували неактивні сурогатні POPB, мінеральне компресорне масло КЗ-10 основні фізико-хімічні властивості якого наведені в таблиці 2. За в'язкістю та коефіцієнтом в'язкості це масло частково наближається до масла ТП-22.

Експериментальна частина. Зразки геополімерів вироблялися наступним чином: луг (KOH) розчинявся у воді і поєднувався з рідким склом. Суміш перемішувалася з порошковими компонентами із додаванням води до утворення конусу розпливу 14–16 см. Надалі у суміш вносилося масло, чи водомасляна емульсія або твердий адсорбент насичений попередньо маслом, після чого проводилося механічне перемішування при швидкості обертання мішалки 1400 об/хв ÷ 2000 об/хв протягом 5÷7 хв. Деякий час з суміші могли виходити пухирці. Суміш заливали у форми 5 см x 5 см x 5 см і залишали у формах до закінчення тужавлення. Час закінчення тужавлення визначався приладом Віка, конус якого заповнювали одночасно з формами. Після закінчення тужавлення зразки виймалися з форм, зважувалися і розміщувалися у ексикаторах в атмосфері насичених парів води за кімнатною температурою. Через 5÷7 діб починалася сушка зразків за кімнатною температурою.

Зразки виготовлялися партіями. У кожній партії було від 3 до 5 зразків зовнішній вигляд деяких представлено на рисунку 3.

Висихання зразків контролювалось періодичним зважуванням. Зразки висушувалися до постійної маси. Як приклад на рис. 4 наводяться криві втрати вологи з часом зразками ЗБ – (30–32).

Таблиця 1

Хімічний склад матеріалів, %

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	ВПП
метакаолін	55,3	34	1,25	0,1	0,1	0,45	0,2	0,6		8,0
зола	54,9	30,8	5,5	–	2,8	2,4	–	1,1	1,3	–
шлак	36,53	7,9	0,2	9,5	42,9		1,3	0,47	0,54	–

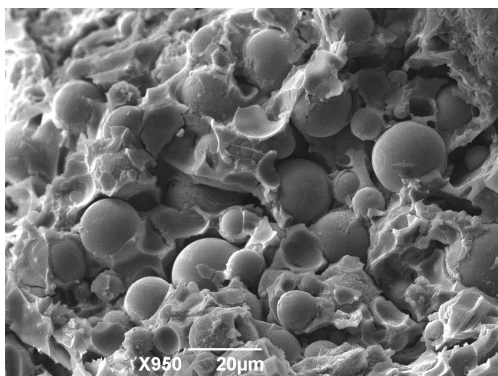


Рис. 1. Мікросфери на поверхні геополімерних матриць

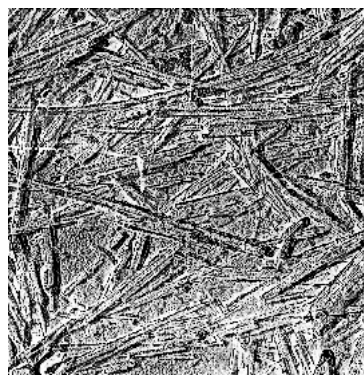


Рис. 2. Кристали палігорської Черкаського родовища (зб. 12·10⁴)

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості компресорного масла КЗ-10

Найменування показника	Норма по ГОСТ	Метод випробувань
Температура застигання не вище, °С	10	ГОСТ 20287
Температура спалаху, визначена у відкритому тиглі, не нижче, °С	205	ГОСТ 4333
В'язкість кінематична за температури 40°С, мм ² /с	73,7–96,2	ГОСТ 33
Густина за температури 20°С, г/см ³	0,9	ГОСТ 3900
Зольність, % не вище	0,005	ГОСТ 1461

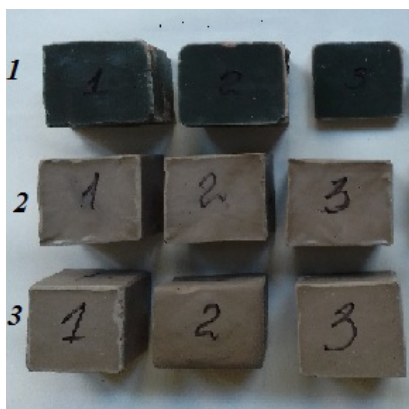


Рис. 3. Зразки композитів різних партій: 1 – ЗБ – 9 (15.12.2020), 2 – ЗБ-17 (18.02.2021), 3 – ЗБ-18 (22.02.2021)

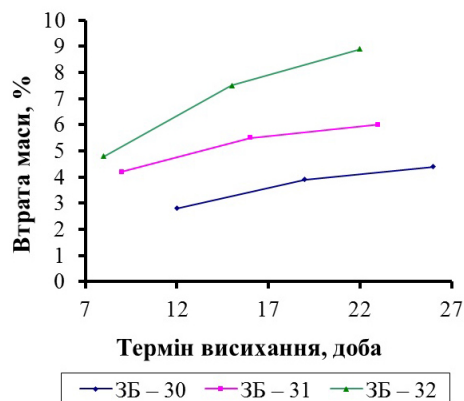


Рис. 4. Криві втрати вологи з часом зразками

Після висихання проводили вимірювання межі міцності на стиск.

Результати та їх обговорення. Порівняльні дослідження проводилися на монокомпонентних зразках у яких основою для геополімеру був шлак чи зола або метаксолін. Склад таких зразків наведено у таблиці 3.

Для утворення пастоподібного стану найменшої кількості води потребує шлак, найбільшої – метаксолін. У таблиці 4 надаються властивості вищезазначених зразків.

Найвищу щільність та найбільшу міцність демонструє зразок ЗБ – 9 на основі доменного шлаку. При вимірюванні пористості зразків шляхом їх насичення гасом для цього зразка отримані найменші значення – близько 0,5 %.

При висиханні зразка його розміри зменшуються. Якщо внаслідок нерівномірного висихання поверхня зразка висихає швидше ніж глибинні (внутрішні) шари, то у ньому утворюються тріщини. При повільному висиханні тріщини не утворювалися.

Вплив поєднання шлаку з метаксоліном у різних співвідношеннях вивчався на зразках ЗБ-30 – ЗБ-32 та ЗБ-13 – таблиця 5.

Як з'ясувалося при поєднанні двох механізмів геополімеризації збільшення кількості метаксоліну у зразках дещо зменшує їх межу міцності на стиск, але на таких зразках тріщини при висиханні не виникають.

Таблиця 3

Склад зразків компаундів з різним механізмом геополімеризації

Шифр	Склад, %					
	Шлак	Зола	Метакаолін	Рідке скло	КОН	Вода
ЗБ-9	68,5	–	–	15,8	5,5	10,3
ЗБ-11	–	60	–	15,3	5,3	19,3
ЗБ-12	–	–	46,2	11,8	4,0	37,9

Таблиця 4

Властивості зразків геополімерів з різними механізмами геополімеризації

Шифр	Si/Al	(Na+K)/Al	Термін тужавлення, хв	Щільність, г/см ³	Межа міцності, МПа
ЗБ-9	1,55	0,4	120	1,98	26,4
ЗБ-11	1,85	0,5	>180	1,50	6,2
ЗБ-12	1,6	0,43	>150	1,44	14,2

Таблиця 5

Склад зразків із різними співвідношеннями між компонентами

Шифр	Склад, %				
	Шлак	Метакаолін	Рідке скло	NaOH	Вода
ЗБ-30	53,8	5,4	17,9	6,8	16,1
ЗБ-31	49,3	9,9	16,4	6,3	18,1
ЗБ-32	44,9	13,5	15,0	5,7	21
ЗБ-13	39,7	19,9	15,2	5,3	19,9

Таблиця 6

Властивості зразків з маслом з різними співвідношеннями між компонентами

Шифр	Si/Al	Na/Al	Термін тужавлення, хв	Щільність, г/см ³	Межа міцності, МПа
ЗБ-30	4,3	2,2	190	1,96	21,0
ЗБ-31	3,57	1,1	>200	2,06	20,6
ЗБ-32	3,25	0,9	320	1,89	19,3
ЗБ-13	2,8	1,08	150	1,8	17,9

Дослідження показали, що шлак у складі зразків підвищує їх міцність, а метакаолін зменшує міцність зразків і підвищує пористість до 18 %.

У якості оптимального варіанту у зразках для цементування масла було прийнято співвідношення маси шлаку до метакаоліну як 2:1. З цим співвідношенням були синтезовані зразки ЗБ-16 – ЗБ-19 (таблиці 7, 8).

Таким чином при збільшенні масла у зразках межа міцності на стиск зменшується. Після повного висихання зразка максимальна кількість масла яке

може бути зацементовано у зразках у вигляді водомасляної емульсії становитиме приблизно 15 % мас.

Для вивчення особливостей цементування масла з використанням твердих адсорбентів були виготовлені зразки ЗБ-39, ЗБ-41 (таблиця 9).

Варіювання показали, що середня межа міцності на стиск становить у зразків ЗБ-39 – 10,7 МПа у ЗБ-41 – 12,5 МПа.

Очевидно, що збільшення кількості масла зменшує межу міцності. Підвищити ефективність цементування можливо за наступними варіантами. При

Таблиця 7

Цементування масла у геополімерних зразках

Шифр	Склад, %						
	Шлак	Метакаолін	NaOH	Рідке скло	Масло	ПАР	Вода
ЗБ-16	38,8	19,4	6,3	14,9	–	–	20,7
ЗБ-17	39,8	19,4	6,5	15,2	5,3	–	13,3
ЗБ-18	38,7	19,4	6,3	14,9	10,3	0,03	10,3
ЗБ-19*	34,7	17,4	5,7	13,3	18,5	0,02	10,4

Таблиця 8

Властивості зразків з маслом

Шифр	Si/Al	Na/Al	Термін тужавлення, хв	Щільність, г/см ³	Межа міцності, МПа
ЗБ-16	2,7	1,25	190	1,53	15,4
ЗБ-17	2,7	1,25	>80	1,48	13,4
ЗБ-18	2,7	1,25	>160	1,53	11,6
ЗБ-19*	2,7	1,25	90	1,49	3,2

* Після цементування на поверхні зразка з'являється масляна плівка.

Таблиця 9

Склад зразків з адсорбентом

Шифр	Склад, %					
	Шлак	Палигорськіт	КОН	Рідке скло	Масло	Вода
ЗБ-39	28,7	13,1	3,8	12,8	6,9	28,7
ЗБ-41	30,1	20,1	4	13,4	12,3	20,1

прямому способі цементування масла потрібно зменшувати коалесценцію його крапель у геополімері шляхом більшого їх подрібнення та скорочення початку тужавлення. Можливо також введення масла не спочатку, а через деякий час від остаточного поєднання всіх компонентів.

Позитивний результат було отримано при попередній механічній активації шлаку у активаторі, 14000 об/хв. При активації змінюється розподіл частинок за розмірами і домінуюча фракція має розмір 65 мкм – рис. 5.

Відносно зразків, у яких застосовувався твердий насичений маслом адсорбент, то їх міцність залежатиме як від кількості адсорбенту у зразках, так і від міцності частинок самого адсорбенту.

Слід також зазначити, що підвищення міцності зразків повинно узгоджуватися з властивостями вуглеводнів для кожного конкретного випадку цементування рідких вуглеводнів геополімерними зв'язуючими.

Головні висновки. Встановлено, що при геополімеризації у присутності масла, яке не змішується з водою, утворюються компаунди з межею міцності на стиск більше 10 МПа незалежно від способу цементування. При підвищенні у компаундах кількості масла їх міцність поступово спадає. Найбільшу міцність мають зразки на основі матеріалу з високим вмістом СаО – шлак з додаванням алюмосилікатного метаксаоліну для зменшення можливості утворення тріщин. Встановлено, що збільшення кількості метаксаоліну у зразках без масла від 5 % до 20 % зменшує їх міцність до 18 МПа.

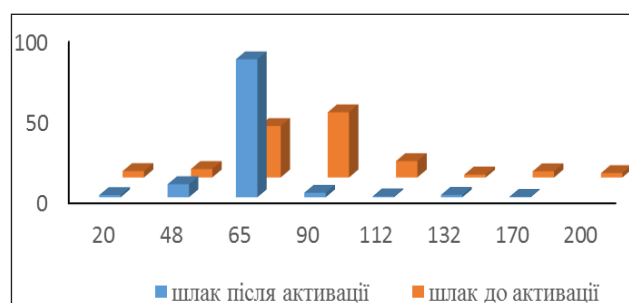


Рис. 5. Розподіл частинок за розмірами

При різних механізмах геополімеризації, а також враховуючи кристалічні фази у компонентах, відношення у зразках Si/Al; (Na + K)/Al може бути різним. Найбільш міцний геополімер на основі шлаку мав відношення Si/Al = 1,55 при; (Na + K)/Al = 0.4 у той же час як геополімер з використанням золи виносу при кращому співвідношенні Si/Al = 1,85 та (Na + K)/Al = 0.5 мав втричі меншу межу міцності.

Цементування водомасляних емульсій у кількості 18,5 % масла у зразках супроводжується утворенням масляної плівки на поверхні зразків і різким падінням межі міцності до 3,2 МПа. При меншій кількості масла межа міцності близько 12 МПа.

Для цементування масел найбільш перспективним є застосування шлаколуужних зв'язуючих з додаванням метаксаоліну.

Подяка. Проєкт отримав фінансування за програмою досліджень та навчання Євратому на 2019–2020 роки за грантовою угодою № 945098.

Література

1. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. МАГАТЭ, ВЕНА, 2005, IAEA-TCS-27
2. LIN, M., MACKENZIE, D.R., Tests of Absorbents and Solidification Techniques for Oil Wastes, Rep. BNL-NUREG-51589, Brookhaven National Lab, Upton, NY (1983).
3. Патент РФ2317605 С1 МПК G21F 9/16. Способ цементирования жидких радиоактивных отходов, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости, и устройство для его осуществления / ГУП Мос НПО «Радон», Варлаков А.П., Невров Ю.В., Горбунова О.А. и др., заявл. 04.07.2006 №2006] 2 3654/06]

4. Патент РФ 2437178, МПК G21F 9/20. Способ цементирования отработанных радиоактивных масел / ФГУП ПО «Маяк», Слюнчев О.М., Козлов П.В., Иванов И.А., заявл. 07.10.2010, опубл. 20.12.2011.
5. P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer. Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 2007. 42(9). p. 2917–2933.
6. J.L. Provis, and J.S.J. Van Deventer, eds. Introduction to geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications, ed. J.L. Provis and J.S.J. Van Deventer. Woodhead Publishing in Materials : Cambridge, UK, 2009.
7. V. Cantarel, F. Nouaille, A. Rooses, D. Lambertin, A. Poulesquen, F. Frizon, Solidification/stabilisation of liquid oil waste in metakaolin-based geopolymer, *J NucMat.* 2015. 464. p. 16–19.
8. V. Cantarel, D. Lambertin, A. Poulesquen, F. Leroux, G. Renaudin, F. Frizon, Geopolymer assembly by emulsion templating: emulsion stability and hardening mechanisms, *Ceram. Int.* 2018. 44. p. 10558–10568.
9. Charles Reeb, Christel Pierlot, Catherine Davy, David Lambertin “Incorporation of organic liquids in to geopolymer materials, A review of processing, properties and applications”/ *Ceramics International*, 2021. Vol. 47, n. 6, p. 7369–7385.
10. Naqi J. Jang, recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: a review, *Sustainability-Basel* 11(2) (2019) 537, <https://doi.org/10.3390/sull1020537>
11. Глуховский В.Д. Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев : Будівельник, 1978. 184 с.
12. Chemistry and applications. 3rd edition. France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2011. 614 p.
13. J.L. Provis, S.A. Bernal, Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annu. Rev. Mater. Rec.* 2014. 44(1). p. 299–327, <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
14. C. Shi, B. Qu, J.L. Provis, Recent progress in low-carbon binders, *Cem. Concr. Res.* 2019. 122. p. 227–250, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>
15. C. Li, H. Sun, L. Li, A review: the comparison between alkali-activated (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cement, *Cem. Concr. Res.* 2010. 40(9). p. 1341–1349, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
16. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Гоц В.І., Ковальчук Г.Ю. Цементи та бетоны на основі паливних зол і шлаків. Київ : видавництво ТОВ «ПК Експрес-Поліграф», 2012. 258 с.
17. Федоренко Ю.Г., Ольховик Ю.О., Розко А.М., Павлишин Г.П. Вплив компонентів геополімерних зв'язуючих на властивості компаундів при цементуванні борвміщуючих РРВ. *Ядерна енергетика та довкілля.* 2021. 2(21). С. 71–77. <http://doi.org/10.31717/2311-8253.21.2.6>
18. Задвернюк Г.П. Поглинання нафти і нафтопродуктів глинами Черкаського родовища. Зб. наук. праць ІГНС. 2011. Вип. 19. С. 109–114.