

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397)
УДК 691.33

**В.І. Шамрай, к.т.н., доц.
В.В. Мельник-Шамрай, к.с.-г.н.
А.Г. Темченко, д.т.н, проф.
А.М. Махно, аспірант
Р.М. Ігнатюк, аспірант**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону

Видобувна та переробна галузі характеризуються великою кількістю утворених відходів. У структурі утворення відходів станом на 2020 р. 96 % від загальної кількості належить відходам видобувної та переробної галузі. Саме тому розробка нових шляхів утилізації відходів гірничих підприємств є актуальною науково-практичною задачею.

У роботі наведено характеристику дрібнодисперсних відходів каменевидобувних та каменеобробних підприємств з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. Досліджено хімічний та гранулометричний склад відходів каменевидобувних та каменеобробних підприємств, а саме кам'яного шламу, що утворюється внаслідок різання природного каменю. На відміну від відходів каменеобробних підприємств, шлам з каменевидобувних підприємств характеризується сталим хімічним складом. Це пояснюється тим, що каменеобробні підприємства обробляють природний камінь з різних родовищ, що мають відмінний мінералогічний та хімічний склад. Оскільки для виготовлення геополімерів важливим є відношення Si / Al , яке має бути більшим за 3, було проаналізовано хімічний склад шламів з каменеобробних підприємств, які обробляють різні гірські породи. Дослідження показали, що відношення Si / Al становить більше 3.

Дослідженнями [35] встановлено, що 80–90 % частинок у складі золи для виготовлення геополімерного бетону повинні мати розмір менше за 45 мкм. Тому було наведено гранулометричний склад кам'яного шламу, який показав, що 14 % частинок має розмір менше за 50 мкм, та 79 % частинок має розмір від 50 до 100 мкм. Тоді як глина має частинки з розміром менше за 50 мкм у кількості 79 % та 14 % частинок у розмірі від 50 мкм до 100 мкм. Також було визначено гранулометричний склад піску як сировинного матеріалу, що використовується при виготовленні бетону.

Ключові слова: геополімерний бетон; кам'яний шлам; гранулометричний склад кам'яного шламу; хімічний склад кам'яного шламу; утилізація кам'яного шламу.

Актуальність теми. Сучасна каменевидобувна та каменеобробна промисловість характеризується проблемою переробки та утилізації відходів. Причиною її появи стало не лише збільшення обсягів будівництва, а й відсутність сучасних стандартів і відповідного законодавства, які передбачають раціональне використання природних ресурсів та охорону навколишнього середовища. Поряд з цією проблемою існує практика «самоутилізації» відходів на несанкціонованих звалищах, що спричиняє забруднення навколишнього середовища.

У розвинених країнах (країни ЄС, США, Канада) поводження з відходами каменеобробки регулюється чинним законодавством. Вартість переробки відходів виробництва каменю значно нижча, ніж їх вивезення на звалища. Крім того кожна компанія складає план поводження з відходами.

Екологічність, зменшення впливу на навколишнє середовище та пошук більш безпечних для навколишнього середовища рішень – це нові тенденції в матеріалах, які зараз розповсюджуються. Цей факт в основному зумовлений більшою екологічною свідомістю населення, більшою дефіцитністю ресурсів і, як наслідок, суворішими екологічними нормами в різних країнах [1–2].

Нині розробляється серія екологічно чистих матеріалів із низьким впливом на навколишнє середовище та низькими викидами парникових газів, головним чином у будівельному секторі. Слід враховувати, що будівельний сектор є одним із найбільш забруднюючих, оскільки споживає велику кількість сировини [3], використовує мало оптимізованих промислових процесів і виробляє величезну кількість продукції [4]. Ці фактори безпосередньо впливають на майбутній дефіцит основної сировини [5], а також споживання енергії, будучи галуззю, яка виробляє найбільше енергоспоживання у світі [6].

Додавання відходів до керамічних матеріалів для виробництва цегли проводилося з різними відходами, що призводило до кількох випадків успіху [7–8, 36]. Успіх цієї техніки базується на різних факторах; з одного боку, це зменшує кількість незайманого матеріалу, що використовується, скорочуючи операції з видобутку матеріалів, викиди, які це спричиняє, та вплив на навколишнє середовище на території. З іншого боку, нині використовуються невикористані відходи, таким чином, зменшується

економічна вартість кінцевого продукту, а отже, розміщення відходів, що використовуються на звалищах, зменшується. Крім того, інтеграція відходів у керамічні матеріали може надати особливі характеристики, які приносять користь кінцевому матеріалу. Серед цих характеристик – теплова та звукова ізоляція [9–10], а також легкість матеріалу [11]. Це включення легко здійснити, не зазнаючи значних змін у виробничій галузі, як у процесах, так і в машинах [12].

Також це є одним із варіантів, який приносить економічну та екологічну вигоду, зменшує відкладення матеріалів на звалищах та забезпечує нове життя відходів, і, отже, цілком відповідає новій круговій економіці [13]. Крім того, часто зустрічаються відходи, які за своїм хімічним складом можуть серйозно зашкодити навколишньому середовищу, або забруднюючи поверхневі води чи підземні води, або впливаючи на флору і фауну. З цими відходами слід поводитися з особливою обережністю та включати їх у матеріали, що спричиняють належне утримання елементів або хімічних сполук, що конфліктують. У цьому випадку включення в керамічні матеріали забруднюючих залишків є одним із найкращих варіантів, оскільки керамічна матриця утримує ці забруднення у великій пропорції та уникає їх фільтрації [14–16].

З іншого боку, галузь виробництва декоративного каменю виробляє в Європі приблизно 5 мільйонів тонн кам'яного шламу на рік [17]. Ці відходи утворюються безпосередньо під час різання каменю для подальшої його обробки та продажу. Було підраховано, що видобуток і переробка граніту та мармуру дають 40 % обсягу кам'яного шламу по відношенню до початкового обсягу, що становить 20 % цього відсотка, що відповідає праці обробленої в галузі промисловості [18]. Отже, це відходи, що утворюються у великій кількості, і їх неконтрольоване осадження може створити низку екологічних проблем.

Процес різання граніту виконується алмазним диском з подачею води, щоб уникнути нагрівання матеріалу та машин. Таким чином, кам'яний шлам виробляється зі зменшеним розміром частинок, близько десятків мікрометрів, і з низкою металевих елементів, таких як кобальт або мідь, що виходить із різального диска [19]. У той же час часто зустрічаються органічні сполуки, що надходять із мастильних матеріалів та жирів самого обладнання. Навіть якщо кам'яний шлам піддають подальшому відділенню від води флокуляцією, зазвичай отримують декілька відсотків флокулянтів, що є дуже обмежувальним фактором для їх повторного використання [20].

Тому кам'яний шлам – це відходи, які становлять проблему в Європі. Це ще більш серйозна проблема в таких країнах, як Україна, де екологічні норми є менш обмежувальними, а кам'яний шлам накопичується безпосередньо в районах, що прилягають до виробничої галузі у великих ямах. Ці котловани переважно не гідроізолювані і використовуються для осадження шламу власною силою тяжіння та повторного використання води. Тому використання таких котлованів може спричинити значне забруднення сільського господарства, живих істот та поверхневих чи підземних вод [21].

Виходячи з викладеного вище, осадження кам'яного шламу на звалищі може спричинити забруднення поверхневих та підземних вод через їх хімічний склад, а також серйозний вплив на рослинність через малий розмір частинок. Цю проблему намагалися вирішити шляхом його повторного використання та шляхом аналізу хімічного складу для вивчення його застосування. Основними сферами повторного використання кам'яного шламу були відновлення берегів [22], гідроізоляція підкладок [23] або дуже специфічні роботи в цивільному будівництві [24]. Під час цих операцій слід контролювати хімічний склад, оскільки велика частка елементів, що забруднюють, обмежувала б використання у перших двох варіантах, і для третього варіанта їх слід детально вивчити.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Вчені підкреслюють схожість складу та деяких механізмів твердіння різних в'язучих, у зв'язку з чим важче проводити чітку межу між різними лужними в'язучими. Найкраще вивчене структуроутворення в'язучого на основі доменного гранульованого шлаку. Зауважується, що у висококонцентрованому лужному розчині сполуки Si-O-Si та Al-O-Si розбудовуються, а потім переходять у колоїдний стан. Після збільшення кількості колективних частинок відбувається їх ущільнення та зміцнення [25].

Відповідно до аналізу праць, механізм лужної активації складається з послідовних реакцій руйнувань-перекладок, внаслідок чого виникають руйнування сировинних матеріалів та перетворення їх у малостійких структурних одиницях, які взаємодіють із коагуляційними структурами та в наступному застосуванні. На перших стадіях з'єднання Si-O-Si та Al-O-Si руйнуються у висококонцентрованому лужному розчині та переходять у колоїдний стан. Продукти гідратації шлаколужного в'язучого утворюються в результаті взаємодії гідросилікатів кальцію та гідроалюмосилікатів натрія, крім того, за наявності у в'язучому глинисті мінерали при їх взаємодії з лугом синтезуються гідроалюмосилікати (цеоліти) [26].

Дослідження показали, що продукти гідратації шлаколужного в'язучого є гідросилікатами кальцію та ксеноліту. Експериментами, що виконані методами рентгеноструктурного та диференціально-термічного аналізу, растрової електронної мікроскопії разом з рентгеновим мікроаналізом, підтверджено, що продуктом гідратації шлаколужного в'язучого на основі доменного шлаку є гель гідросилікату кальцію [27–28].

При використанні гідроксиду натрію або рідкого скла з гідроксидом натрію формується також гідротальцит. У той час у продуктах гідратації таких в'язучих не виявлено гідратів цеолітової групи [29]. Цеолітові фази (тоберморит, гідроксодаліт) та кристалічні сполуки $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ та $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ формують лише при високій водовіддачі відношення. Методом рентгенодифракційного аналізу виявлено, що при високій швидкості гідратації шлаку формується гель CSH ($n\text{CaO} \times \text{SiO}_2 \times m\text{H}_2\text{O}$), а на більш пізніх стадіях гідратації – гідротальцит. При використанні цього ж методу було показано, що у продуктах гідратації шлаків, активованому луку відсутні кристалічні продукти реакції, в цей час як електронно-мікроскопічний аналіз за місяць після початку гідратації виявив гідротальцит, кальцій (CaCO_3) та гідросилікат кальцію. Використовуючи як активатор гідроксиду натрію, за порівнянням з активатором на основі розчину рідкого скла та гідроксиду натрію, формуються продукти гідратації з більш високим молярним відношенням Si / Al . Це можна пояснити заміною атома кремнію на атоми алюмінію в силікатному зв'язку. Першим матеріалом, на основі якого отримано геополімер, був термічно оброблений каолін, який знаходиться під зворотною діяльністю лугів твердих тіл. Давидовиць Дж. запропонував схему процесу поліконденсації, яка протікає при твердінні геополімеру [30]. Відповідно до цього представлення, геополімери – полімерні матеріали. Вони мають структуру з повторюваними в зв'язках атомів кремнезему та алюмінію. Залежно від чередування атомів кремнезему та алюмінію геополімери підрозділяються на полісилати, полісилато-силокси (дисилокси). Структурні елементи сил мають форму тетрадрів, в основі яких лежать атоми кремнезему та алюмінію, пов'язані з 4-ма атомами кисню. Ці елементи здатні створювати дво- і тримірні структури. При синтезі атомів кремнію та алюмінію формують інші зв'язки $\text{Si} - \text{O} - \text{Al} - \text{O}$, завдяки яким геополімери не впливають на фізико-механічні властивості.

Геополімерні матеріали формуються в ході реакцій геополімеризації алюмосилікатних з'єднань у сильнолужному середовищі. Давидовиць Дж. вважає, що реакція отримання геополімерів протікає в трьох стадіях [30]:

- на першій стадії відбувається розчинення оксиду кремнію та алюмінію в лужному середовищі – концентрованому розчині NaOH або KOH ;
- на другому – розщеплення природних полімерних структур на мономері;
- на третій – схоплення в результаті перетворення мономерів у полімерні матеріали.

У твердих геополімерах поступово формуються тримірні алюмосилікатні структури з емпіричною формулою $M \{-(\text{Si} - \text{O})_z - (\text{Al} - \text{O})_n\} \times w \times \text{H}_2\text{O}$, де M – це атоми або катіони K , Na або Ca ; n – ступінь поліконденсації; z дорівнює 1, 2, 3 або більше. Структуру матеріалу формують тетрадри $[\text{SiO}_4]^{4-}$ і $[\text{AlO}_4]^{5-}$, пов'язані між собою оксигеновими мостиками. З'єднання $\text{Si} - \text{O} - \text{Al}$ замикаються в кільця. Покладні іони (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) компенсують від'ємнозарядженим чотирикоординатним Al [31].

Методами термічного аналізу, ядерного магнітного резонансу, ртутної порометрії було встановлено, що в порах геополімери містять воду та катіони натрію або калію, хімічно з ним не пов'язані. При висушенні вони мігрують на поверхню матеріалу і піддаються атмосферній карбонізації, що є причиною появи висолів на поверхнях виробів. Першим етапом структуроутворення геополімерів є розчинення алюмосилікатної сировини [31–32].

За даними Duxson, розчинення скловидного алюмосилікату відбувається таким чином: початок обміну іонів H^+ на Ca^{2+} і Na^+ , тоді – гідроліз алюмосилікатних сполук, руйнування деполімеризованої склоподібної структури та розведення сполук Si і Al на мономерних структурах. Відповідно до спрощеної моделі, запропонованої Duxson, процес геополімеризації починається з розчинення тонкоподрібненого, термічно обробленого алюмосилікатного шламу в лужному середовищі. При цьому на ступінь розчинення алюмосилікатного шламу впливає його дисперсність і реакційна здатність алюмінію в сировині [33].

Розчинення алюмосилікатної сировини за допомогою лужного гідролізу відбувається при достатній кількості вмісту води та забезпечується руйнування з'єднань алюмінію та кремнію, які переходять у розчин та накопичуються у вигляді окремих частин на поверхні (у мономерній формі) [34]. За допомогою накопичення твердих частинок у розчині відбувається його полімеризація, таким чином відбувається процес геополімеризації.

Метою статті є оцінка якісних властивостей дрібнодисперсних відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону.

Методологія дослідження. Щоб достовірно вивчити ефект додавання кам'яної суспензії при виробництві геополімерного бетону, необхідно провести процес сушіння для видалення води, що міститься в ньому, що дозволяє краще контролювати всі змінні під час дослідження, включаючи вологість. Однак наявність вологості на виробництві під час виробничого процесу не вплине на якість кінцевого матеріалу; це необхідно взяти до уваги, щоб не додавати надлишок води та дотримуватися оптимальних пропорцій матеріалів. Тому всі випробування, описані в методиці, проводяться з сухими матеріалами.

Кам'яний шлам, що використаний в цьому дослідженні, належить каменеобробним компаніям, що виробляють вироби з каменю, розташованим у безпосередній близькості від міста Житомир, Україна.

Кам'яний шлам виробляється в процесі різання природного каменю для виготовлення різних декоративних елементів. Використання води для запобігання нагріванню каменеобробного інструменту

утворює пульпу. Він осідає в шламовідстійниках для повторного використання води, після чого відбувається осідання, вилучення та висушування відходів природними процесами випаровування. Він має зменшений розмір частинок через процес утворення.

Початковий матеріал кам'яного шламу, з якого він походить, дуже схожий протягом усього виробничого процесу, а також використовуваних машин. Цей факт є суттєвим для використання відходів, оскільки він прямо вказує на те, що фізико-хімічні характеристики кам'яного шламу залишаються незмінними протягом часу, у різних виробництвах та в різні роки. Тому легко визначити відповідну комбінацію матеріалів з цими відходами, яка є стабільною і не має постійно змінюватися за властивостями відходів.

Фізико-хімічний аналіз властивостей вихідної речовини є фундаментальним для встановлення критеріїв, яких слід дотримуватися в дослідженні. Цей аналіз забезпечує інформацію, необхідну для оцінки сумісності матеріалів, а також про наявність певних хімічних елементів, які слід контролювати. Характеристика відходів має важливе значення для їх включення в матеріал, зокрема зменшення впливу на навколишнє середовище щодо його відкладення на звалищі. Наприклад, використання відходів із забруднюючими речовинами та елементами, шкідливими для навколишнього середовища, на звалищі або заповнення дорожньої інфраструктури не матиме ефективного повторного використання, оскільки їх вимивання може призвести до більшого забруднення підземних вод, ніж відкладення на звалищі. Рентгенівська флуоресценція проводилася з таким обладнанням ADVANT'XP + Thermo Fisher бренд (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США).

Визначення гранулометричного складу проводилося методом ситового аналізу на ситах із розміром комірок 500, 250, 200, 140, 100 та 50 мкм. Цей метод використовується переважно для піщаних зразків. Просіювання проводиться за допомогою сертифікованого набору калібрувальних сит. У ситовому методі визначають орієнтовний поперечний діаметр частинки, що пройшла крізь сито з певним діаметром отворів. За допомогою зазначених тестів можна буде оцінити наявність шкідливих хімічних елементів, елементів, що обумовлюють кінцевий продукт, або фізичних властивостей, які визначають сумісність матеріалів. Таким чином можна оцінити придатність використання кам'яного шламу.

Результати та обговорення. Для виробництва геополімерного бетону використовується низькокальцієва зола, що містить до 80 % алюмосилікатних оксидів, при співвідношенні $Si / Al = 2$. У цій золі кількість оксиду залізу становить близько 10...20 %, оксиду кальцію менше за 5%. Вміст вуглецю, що визначається за втратами при прожарюванні, в зоні уносу становило менше за 2 %. У золі міститься 80 % частинок із розміром менше за 50 мкм.

Як активатор процесу твердих речовин застосовувався розчин на основі силікату натрію з $M_c = 2$ та гідроксиду натрію. Застосовується рідке скло із вмістом $SiO_2 = 29,4 \%$, $Na_2O = 14,7 \%$ та $H_2O = 55,9 \%$, гідроксид натрію із вмістом чистого NaOH близько 97...98 %. Концентрація розчину гідроксиду натрію становить 8 і 16 моль/л. Розчин активатора підготовлений за 24 години до моменту використання.

Для вдосконалення укладеності разом з водою вводиться суперпластифікатор на основі нафталінового сульфонату в дозуванні 2 і 4 %.

Як найбільший наповнювач використовувався гранітний щебінь, а як мілкий- кварцевий пісок. Зміщення крупного та м'якого наповнювача складало 75...80 % обсягу бетону.

У зв'язку з тим, що до складу геополімерного бетону додають дрібнодисперсну золу, хімічний та гранулометричний склад якої схожий до відходів гірничого виробництва, в роботі розглядається можливість використання відходів каменеобробного та каменевидобувного виробництва у виготовленні геополімерного бетону. Оскільки 160 тис. гектарів території України вкрито промисловими відходами, а це близько 36 млрд тон твердих відходів, відповідно стає зрозумілим, що це серйозний виклик екології. Окрім соціально-екологічних проблем, важливими є й економічні. Багато країн вже давно навчилися заробляти на переробці промислових відходів. Їхня утилізація означає їхнє залучення у нові технологічні процеси з метою одержання корисного продукту. Тобто ці відходи можна використовувати як вторинну сировину, добриво, паливо, будівельні матеріали тощо.

Найбільші обсяги відходів накопичуються у видобувній (вугільні терикони, відвали порожньої породи) і переробній промисловості (металургія, хімічна промисловість) (рис. 1). У таблиці 1 можна побачити статистичні дані, надані Державною статистичною службою України. Ці дані стосуються відходів класу I–IV.

Таблиця 1

Щорічні тенденції утворення відходів I–IV класу в Україні за 2015–2020 рр.

Вид діяльності	Рік					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Сільське, лісове та рибне господарство	8736,8	8715,5	6188,2	5968,1	6750,5	5315,4
Добувна промисловість і розроблення кар'єрів	257861,9	237461,4	313738,2	301448,9	390563,8	391077,9
Переробна промисловість	31000,5	34093,0	32176,7	31523,2	30751,8	52311,0
Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря	6597,5	7511,5	6191,7	6322,7	5959,2	5333,7
Будівництво	376,2	300,2	493,8	378,8	188,7	14,5
Інші види економічної діяльності	1641,4	1442,0	1407,4	1148,7	1405,8	2371,3
Обсяг збирання відходів від домогосподарств	6053,3	6346,5	5858,0	5543,5	5896,7	5949,7
Утворення відходів, тис. т/рік	312267,6	295870,1	366054,0	352333,9	441516,5	462373,5

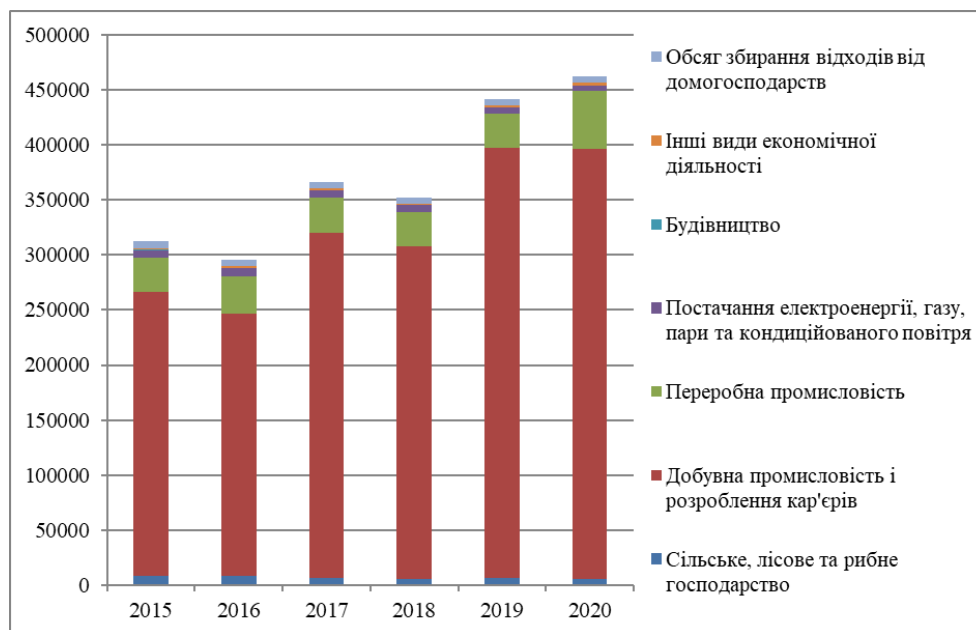


Рис. 1. Склад і тенденції утворення небезпечних відходів I–IV класів

Переважаючим компонентом утворених відходів класу I–IV є добувний / кар'єрний сектор, відходи якого сягнули піку 391 млн тонн в 2020 р. і склали 85 % від усіх небезпечних відходів.

Наступною найбільшою областю, де утворюються промислові відходи I–IV класів є переробна промисловість (11 % від загального обсягу відходів у 2020 році), на яке разом з гірничодобувною / кар'єрною промисловістю припадає близько 96 % від усіх таких відходів, що утворюються в країні (табл. 1). Тому питання утилізації відходів гірничих підприємств наразі стоїть досить гостро.

Відходи гірничорудних підприємств. До гірничорудних підприємств Житомирщини належать Іршанський ГЗК та Овруцьке рудоуправління. Іршанське родовище розташоване в долині річки Ірша і належить до четвертинних відкладів заплави і надзаплавних терас, розвинених у межах Володарськ-Волинського масиву магматичних порід основного складу. На корі вивітрювання цих порід і залягає титаноносний пласт. Гірничотехнічні умови забезпечують відпрацювання родовища двома способами: дражним у заплавної частині і роздільним у терасовій частині. В другому випадку розкриття здійснюється екскаваторами, а видобуток – бульдозерами з транспортуванням пісків до землерийних установок. Продукти видобутку і розкриття переважно піщані. Плотик представлений скельними породами і продуктами їх вивітрювання.

При видобутку розсіпних і корінних руд утворюються гірничопромислові відходи двох типів – розкривні породи і відходи збагачування. Породи розкриття – піски четвертинного і неогенового віку. Потужність таких пісків є непостійною. Мілко і тонкозернисті піски, розмір частинок яких 0,5–0,063 мм становлять близько 50 %, а частини менше за 0,063 мм – 40–50 %. Не менше 80 % їх хімічного складу – це кремнезем, глинозему – 9–10 %, інші оксиди є в незначних кількостях. Як показали дослідження, піски розкриття не становлять інтересу з точки зору практичного використання. Утворення каолінітової кори

вивітрювання кристалічних порід також є серед розкривних порід. Запаси таких утворень пороховані за промисловими категоріями, оскільки було встановлено, що вони придатні до використання в народному господарстві. Найбільш перспективний напрямок використання каолінів та каолінізованих порід є виробництво цементу. Було встановлено, що використання таких відходів як глинозёмовмісної добавки дозволяє підвищити концентрацію глинозёму в сировинній суміші і нормалізувати вміст алюмініатів у клінкері.

Відходи вугільних підприємств. Разом з видобутком вугілля щорічно на поверхню нашої планети підіймаються мільйони тонн пустої породи. Відходи, у вигляді золи або породи, складаються у відвали і терикони, тим самим займаючи великі площі території. Також вода, яку відкачують з шахт, може містити дрібні частинки вугілля і породи. Для відокремлення їх від води створюють спеціальні відстійники, у яких важкі фракції випадають в осад у вигляді шламу.

З метою зменшення негативного впливу природних відвалів на екологію та навколишнє середовище, пусту породу намагаються максимально залишити у виробленому просторі шахти. Якщо вже є відвали, намагаються проводити рекультивацію, як варіант – озеленення, а також використовувати породи як будівельний матеріал.

При певній обробці порода може бути використана як сировина для енергетичної промисловості. Переробка відвалів для отримання глинозёму могла б допомогти уникнути проблеми утилізації токсичних вугільних відходів. Одним з методів отримання глинозёму є спікання. Основним принципом спікання є обробка сировини двома видами кислот і спікання отриманої суміші при високих температурах (900–1000 °C). Зазвичай використовують сірчану, сірчисту, соляну або азотну кислоти.

У сільському господарстві сланцеві породи відвалів можуть використовуватись як добрива, оскільки містять достатню кількість мікроелементів, необхідних для життєдіяльності рослин. Ще одним із напрямів використання пустої породи є виробництво будівельних матеріалів. Горілу шахтну породу териконів після нескладної механічної переробки на місці можна використовувати як заповнювач у цементних бетонах і для виготовлення стінових виробів (блоки, камені, цегла).

Золошлакові відходи. Теплоенергетика є ще одним напрямом, в якому утворюється велика кількість твердих відходів. За добу роботи теплоелектростанцій спалюється до 10 тисяч тонн вугілля, в результаті чого залишається близько 1 тисячі тонн шлаку і золи.

В Україні щорічно утворюється близько 8 млн тонн золошлакових відходів, складування яких супроводжується низкою вкрай негативних наслідків для довкілля та здоров'я людей. Обсяги вже накопичених відходів сягають майже 300 мільйонів тонн, які займають значні території. Водночас майже всі золошлакові полігони вугільних ТЕС вже майже заповнені, а розширювати їх немає можливості, оскільки потрібні нові території. Наприклад, у розвинених країнах утилізується 70–95 % відходів від спалювання вугілля, а в Нідерландах і Данії – 100 %. Загалом у Європі вугільна зола активно використовується як сировина в цементобетонній промисловості з 1950-х рр.

Сама золошлакова суміш являє собою штучне мінеральне утворення складного складу. Вона складається з органічної і мінеральної фази, які можна легко відрізнити під мікроскопом. Органічна фаза представлена наполовину згорілим паливом (кокс, напівкокс), сажистим вуглецем. Розміри уламків коксу і напівкоксу досягають 0,1–0,5 мм, мають гострокутну форму уламків. Мінеральна фаза складається з частинок скла, зерен магнетиту, кварцу, карбонатів, золистого пилу. Розміри частинок цієї фази не перевищують 0,07–0,15 мм.

Альтернативним використанням вугільної золи може слугувати приклад Прибалтійської ДРЕС в Естонії, що працює на горючих сланцях. Щорічно на ДРЕС утворюється більш ніж 3 мільйони тонн золи, 56 % якої вдруге використовується в сільському господарстві для вапнування ґрунтів. Ця зола багата окислами кальцію, магнію, калію і фосфору. При внесенні таких добрив у ґрунт середня врожайність зернових культур в Естонії підвищується у 2 рази.

Відходи металургії. Якщо говорити про відходи чорної металургії, то вони утворюються вже на стадії видобутку руди. Слід зауважити, що більшу частину (близько 70 %) пустих порід і відходів збагачення можна використовувати для виробництва будівельних матеріалів. У шламосьховищах Криворізьких ГЗК, що займаються переробкою залізистих кварцитів, вже накопичено 500 мільйонів тонн відходів збагачення, і щорічно вони поповнюються на десятки мільйонів тонн. Порода, яка відправляється у відвали, може містити рідкісні метали, зокрема золото. За деякими оцінками експертів, у відвали Криворізького ГЗК щороку надходить близько 10 тонн золота, а за весь час накопилось не менше ніж 250 тонн.

У кольоровій металургії також утворюються шлаки, однак їх використовують не більше ніж на 15 %. Це зумовлено тим, що ці відходи містять велику кількість рідкісних і кольорових металів. Головним завданням є максимально вилучити корисні компоненти, після чого ці шлаки можна використовувати в будівельній індустрії.

Відходи каменеобробки. Житомирська область належить до тих областей, економічний потенціал яких переважно залежить від роботи гірничих та каменеобробних підприємств. Разом з цим, широке зосередження каменеобробних і каменедобувних підприємств призводить до накопичення твердих

мінеральних відходів від переробки природного каменю типу габро, граніту та шламу, після розпилу та шліфування кам'яних блоків.

Такі відходи умовно можна поділити за формою та розмірами:

– негабаритні блоки, бут, щебінь, тобто шматки каменю неправильної форми розмірами 5–70 мм (щебінь), більше 70 мм (бут) і більше 400 мм (блоки);

– окіл (бій), тобто малоформатні плити каменю товщиною 5–50 мм з колотими і пиляними краями неправильної форми, що мають термооброблену, поліровану або пиляну поверхню, вони є відходами розпилювання і окантування плит;

– обапіл, тобто відходи пасерування і розпилювання блоків, що мають неправильну форму з однією обробленою плоскою поверхнею з лінійними розмірами, які зіставні з розмірами блоків;

– штиб і шлам, тобто дрібнодисперсні відходи каменю, утворені в результаті здійснення процесів різання та шліфування, розмірами більше за 0,5 мм (штиб) і менше 0,5 мм (шлам).

Більшість з цих відходів застосовується в будівництві для фундаментів, внутрішнього та зовнішнього облицювання тощо. Що не скажеш про шлам.

Шлам – дисперсні тверді неорганічні відходи, які отримано в результаті технологічних процесів на металургійних, хімічних та інших виробництвах і які в суміші з водою мають текучу властивість. Досі багато хто дискутує з приводу використання шламу. Саме тому в роботі наводиться порівняння фізико-хімічних властивостей кам'яного шламу із такими сировинними матеріалами, як глина та пісок, з метою їх використання як сировини для виготовлення будівельних матеріалів.

Рентгенівський флуоресцентний аналіз відобразив усі хімічні елементи з найвищою атомною вагою, що присутні у зразках. Результати рентгенівського флуоресцентного аналізу глини, піску та кам'яних шламів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Рентгенівський флуоресцентний аналіз глини, піску та кам'яних шламів

Компоненти	Глина, wt, %	Пісок, wt, %	Кам'яний шлам (з основних порід, таких як габро та лабрадорит), wt, %	Кам'яний шлам (з кислих порід, таких як граніти), wt, %
SiO ₂	52,62 ±0,25	96,81 ±0,24	50,79 ±0,25	65,80 ±0,24
Al ₂ O ₃	17,83 ±0,19	1,30 ±0,06	19,30 ±0,20	15,17 ±0,18
Fe ₂ O ₃	7,84 ±0,13	0,17 ±0,0059	9,31 ±0,15	4,35 ±0,10
K ₂ O	5,63 ±0,12	0,11 ±0,0060	0,86 ±0,15	4,25 ±0,10
MgO	3,44 ±0,09	0,06 ±0,0024	3,47 ±0,09	1,56 ±0,06
CaO	3,19 ±0,09	0,20 ±0,0021	9,71 ±0,15	3,55 ±0,09
TiO ₂	0,769 ±0,038	0,05 ±0,0049	1,89 ±0,07	0,579 ±0,029
Na ₂ O	0,165 ±0,015	0,09 ±0,0091	3,70 ±0,09	3,44 ±0,09
P ₂ O ₅	0,154 ±0,008	-	0,277 ±0,014	0,1750 ±0,0087
MnO	0,154 ±0,008	0,09 ±0,0091	0,121 ±0,0060	0,0623 ±0,0031
ZrO ₂	0,0379 ±0,0049	-	-	0,0236 ±0,0027
V ₂ O ₅	0,0357 ±0,0031	-	0,0380 ±0,0024	-
SrO	0,0344 ±0,0036	0,02 ±0,0019	0,0646 ±0,0032	0,0499 ±0,0025
RuO ₄	0,0318 ±0,0021	-	-	-
Rb ₂ O	0,0273 ±0,0048	-	-	-
PdO	0,0273 ±0,0040	-	-	0,0124 ±0,0047
S	0,0247 ±0,0013	-	-	-
SO ₃	-	0,09 ±0,0091	0,191 ±0,0095	0,0655 ±0,0037
NiO	0,0233 ±0,0020	-	-	-
PtO ₂	0,0184 ±0,0039	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,0164 ±0,0023	-	0,0211 ±0,0023	-
Cl	0,0095 ±0,0008	-	0,0521 ±0,0053	0,0621 ±0,0058
Co ₃ O ₄	0,0078 ±0,0023	-	0,0150 ±0,0022	-
MoO ₃	0,0063 ±0,0018	-	-	-
ZnO	0,0062 ±0,0027	-	0,0123 ±0,0060	0,0170 ±0,0061
As ₂ O ₃	-	-	0,0875 ±0,018	0,0917 ±0,0190
Tb ₄ O ₇	-	-	0,0304 ±0,0059	-
Sm ₂ O ₃	-	-	0,0265 ±0,0078	-

Рентгенівська флуоресценція таких природних матеріалів, як глина відображає типовий склад силікату алюмінію. У свою чергу також є оксиди калію, кальцію, натрію та заліза, які наявні у польових шпатах. Що стосується піску, то він на 97 % складається з кремнезему, і саме тому він може використовуватися для підвищення вмісту SiO₂ у геополімерному бетоні.

З іншого боку, хімічний склад кам'яного шламу (з основних порід типу габро та лабрадориту) відображає чудову хімічну сумісність із червоною глиною, оскільки вона містить ті ж мінерали у своєму утворенні. Якщо порівняти хімічний склад кам'яного шламу (з основних порід типу габро та лабрадориту) та кам'яний шлам (з кислих порід типу гранітів), то основна відмінність полягає у збільшеній кількості оксиду кремнію, що позитивно відображається на якісних показниках геополімерного бетону, оскільки відношення Si / Al має бути більше за 3. З іншого боку, оксиди феруму, кальцію та магнію наявні у меншій кількості, вони також позитивно впливають на якісні властивості геополімерного бетону, і це було доведено неодноразово у дослідженнях [35]. Варто зазначити, що відношення Si / Al у кам'яному шламі (з основних порід типу габро та лабрадориту) складає менше 3, тому виникає питання, чи раціонально її використовувати у виготовленні геополімерного бетону, і чи потрібно додавати сировинні матеріали для збільшення вмісту SiO_2 . Оскільки на кам'янообробних підприємствах здійснюють виробництво продукції з різних гірських порід, хімічний склад кам'яного шламу буде залежати від об'ємів різання певних видів природного каменю, але буде незмінним на кам'янодобувних підприємствах, оскільки там постійно ріжеться один і той самий вид каменю. На кам'янообробних підприємствах України, в основному оброблюють основні та кислі породи (габро, лабрадорити та граніти), хімічний склад кам'яного шламу яких представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Рентгенівський флуоресцентний аналіз кам'яних шламів

Компоненти	Кам'янообробка Кванта (80 % – лабрадорит), wt, %	Кам'янообробка Нікогран (габро, граніт), wt, %	Кам'янообробка Грантех (габро, граніт, лабрадорит, флокулянт), wt, %	Кам'янообробка Кераніт (габро, гранодіорит), wt, %
SiO_2	56,710	65,800	68,33	61,01
Al_2O_3	17,840	15,170	14,03	15,43
Fe_2O_3	7,380	4,350	4,23	6,91
CaO	7,290	3,550	2,46	5,1
Na_2O	3,690	3,440	3,39	3,57
MgO	2,420	1,560	0,978	2,19
K_2O	2,090	4,250	4,82	3,59
TiO_2	1,420	0,579	0,595	0,877
P_2O_5	0,206	0,175	0,187	0,451
SO_3	0,204	0,066	0,0796	0,0519
Mn_2O_3	0,093	0,062	0,0661	0,095
SrO	0,055	0,050	0,0347	0,0535
ZnO	0,016	0,017	0,0302	0,0311
Cr_2O_3	-	-	-	-
As_2O_3	-	0,092	-	0,0643
Cl	0,059	0,062	0,0521	0,0722
Si/Al	3,18	4,34	4,87	3,95

Як видно з таблиці 3, хімічний склад кам'яного шламу на всіх кам'янообробних підприємствах має відношення $Si / Al > 3$, що відповідає вимогам до сировини для виготовлення геополімерних блоків.

Також варто вирізнити низький вміст сірки та миш'яку як у глині, так і в шламах різання каменю. Обидва елементи суворо контролюються екологічними нормами, і їх необхідно контролювати в кінцевому продукті за допомогою методів вилуговування, щоб вони були в межах, встановлених нормативами, і не спричиняли забруднення навколишнього середовища. В кам'яному шламі відсутні важкі метали у великій кількості, які припускають певні обмеження.

Для виготовлення будь-якого будівельного матеріалу важливим є гранулометричний склад сировини, що використовується. Дослідженнями встановлено, що 80–90 % частинок у складі золи для виготовлення геополімерного бетону повинні мати розмір менше за 45 мкм [35]. Також у виготовленні геополімерного бетону бере участь тонкий пісок та в деяких випадках додають глину. Тому для оцінки придатності кам'яного шламу у виготовленні геополімерного бетону було визначено його гранулометричний склад основних сировинних матеріалів, який представлено на рисунку 2.

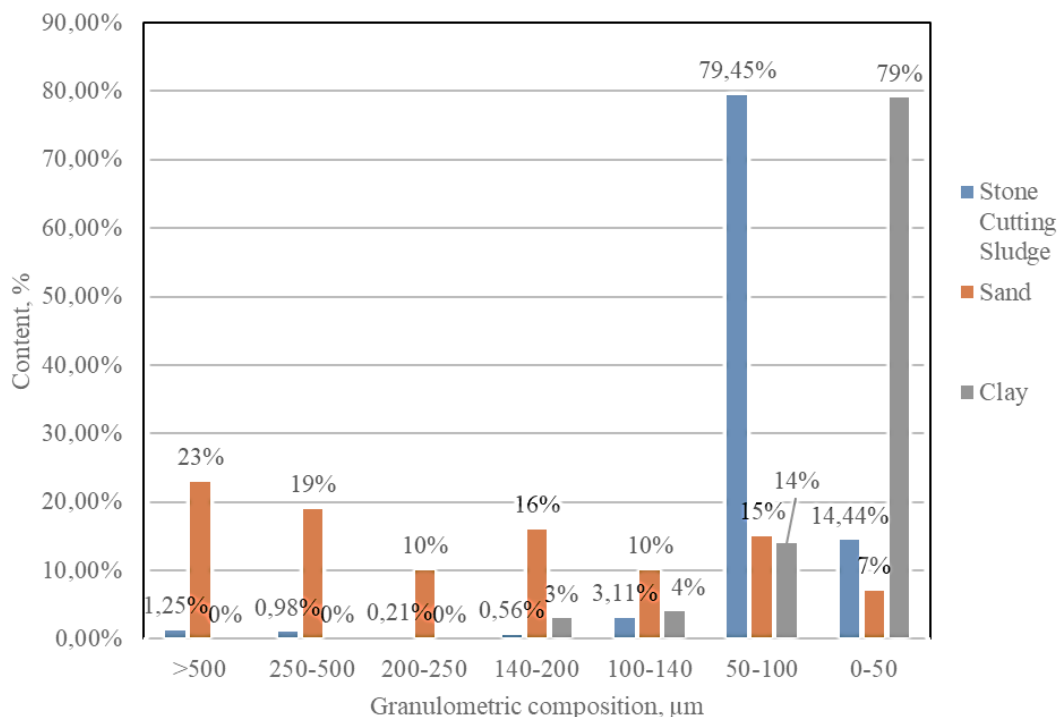


Рис. 2. Гранулометричний склад кам'яного шламу, піску та глини

Як видно з рисунка 2, кам'яний шлам складається з частинок розміром 50–100 мкм – 79,45 % та 0–50 мкм – 14,44 %. Глина містить у собі розміри частинок фракцій до 50 мкм в кількості 79 % та 14 % фракції від 50 до 100 мкм. Тоді як пісок містить 7 % частинок до 50 мкм та 15 % частинок від 50 до 100 мкм. Таким чином, кам'яний шлам є подібним до глини за гранулометричним складом з дещо збільшеними частинками, і потребує подальшого вивчення при виготовленні геополімерів з нього.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Видобувна та переробна галузі України продукують близько 96 % загальної кількості відходів I–IV класу. При цьому найбільш небезпечними є дрібнодисперсні відходи.

Проведений хімічний аналіз кам'яного шламу показав, що у ньому не містяться небезпечні речовини, які могли б завадити до його використання у геополімерних бетонах. Дослідження показали, що відношення Si / Al становить більше 3, і відповідає критерію, що використовується для оцінки придатності сировини для виготовлення геополімерного бетону.

Кам'яний шлам містить 14 % частинок розміром менше за 50 мкм та 79 % частинок розміром від 50 до 100 мкм. Тоді як глина має частинки з розміром менше за 50 мкм у кількості 79 та 14 % частинок у розмірі від 50 до 100 мкм. При цьому зола, яку додають до геополімерного бетону, має розмір частинок менше за 45 мкм у кількості 80–90 %. Таким чином існує потреба подальшого вивчення фізико-механічних властивостей при виготовленні геополімерів з кам'яного шламу.

Список використаної літератури:

1. Mining waste and its sustainable management: advances in worldwide research / J.Aznar-Sánchez et al. // Minerals. – 2018. – Vol. 8, No. 7. – P. 284. DOI: 10.3390/min8070284.
2. Re-Thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations / M.Tayebi-Khorami et al. // Minerals. – 2019. – Vol. 9, No. 5. – P. 286. DOI: 10.3390/min9050286.
3. Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks / M.I. Almeida et al. // Journal of cleaner production. – 2015. – Vol. 92. – P. 206–215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.073.
4. CO2 emission linkage analysis in global construction sectors: alarming trends from 1995 to 2009 and possible repercussions / L.Zhang et al. // Journal of cleaner production. – 2019. – Vol. 221. – P. 863–877. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.231.
5. Subashi De Silva G.H.M.J. Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge / G.H.M.J. Subashi De Silva, M.P.D.P. Mallwattha // Construction and building materials. – 2018. – Vol. 179. – P. 390–399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.187.
6. Composition of energy outflows embodied in the gross exports of the construction sector / B.Liu et al. // Journal of cleaner production. – 2020. – Vol. 248. – P. 119–296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119296.
7. A state of the art review to enhance the industrial scale waste utilization in sustainable unfired bricks / V.Gupta et al. // Construction and building materials. – 2020. – Vol. 254. – P. 119220. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119220.

8. Production of bricks from waste materials – A review // *Construction and building materials*. – 2013. – Vol. 47. – P. 643–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043.
9. Application of ceramic waste in brick blocks with enhanced acoustic properties / *L.Fiala et al.* // *Journal of cleaner production*. – 2020. – Vol. 261. – P. 121–185. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121185.
10. Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures / *S.Ozturk et al.* // *Construction and building materials*. – 2019. – Vol. 217. – P. 592–599. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114.
11. Lightweight clay bricks manufactured by using locally available wine industry waste / *R.Taurino et al.* // *Journal of building engineering*. – 2019. – Vol. 26. – P. 100892. DOI: 10.1016/j.jobeb.2019.100892.
12. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks / *D.Eliche-Quesada et al.* // *Applied clay science*. – 2011. – Vol. 52, No. 3. – P. 270–276. DOI: 10.1016/j.clay.2011.03.003.
13. Review of life-cycle assessment applications in building construction / *A.Singh et al.* // *Journal of architectural engineering*. – 2011. – Vol. 17, No. 1. – P. 15–23. DOI: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000026.
14. Recycling of Malaysia's EAF steel slag waste as novel fluxing agent in green ceramic tile production: sintering mechanism and leaching assessment / *P.T. Teo et al.* // *Journal of cleaner production*. – 2019. – Vol. 241. – P. 118–144. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118144.
15. *Cusidó J.A.* Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: leachability and toxicity studies / *J.A. Cusidó, L.V. Cremades* // *Waste management*. – 2012. – Vol. 32, No. 6. – P. 1202–1208. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.024.
16. *Mao L.* Addition of waste glass for improving the immobilization of heavy metals during the use of electroplating sludge in the production of clay bricks / *L.Mao, H.Guo, W.Zhang* // *Construction and building materials*. – 2018. – Vol. 163. – P. 875–879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.177.
17. *Graziani A.* I lapidei struttura del settore e tendenze innovative / *A.Graziani, G.Giovannelli*. – Rome : Centro Studi Fillea, 2015. – 25 p. [Electronic resource]. – Access mode : http://www.filleacgil.it/nazionale/accordi/all_1817.pdf.
18. Preliminary investigations on stone cutting sludge processing for a future recovery / *L.Zichella et al.* // *Journal of cleaner production*. – 2018. – Vol. 178. – P. 866–876. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.226.
19. Residual sludge management: A possible reuse as loam / *G.A. Dino, M.Fornaro, E.Corio, E.Fornaro* // EU H2020 ITN “REMEDIATE” View project Pioneering an EU-wide understanding of Secondary Raw Materials availability from landfills View project Residual sludge management: A possible reuse as loam : Proceedings of the 10th IAEG congress, Nottingham, UK, 6–10 September. – 2006.
20. *Montanari E.* Una particolare categoria di rifiuti provenienti da attività estrattiva: i limi di lavaggio inerti-Problematiche inerenti e quadro normative / *E.Montanari* // *J. Ord. Geol. Emilia-Romagna*. – 2007. – Vol. 27. – P. 31–36. [Electronic resource]. – Access mode : http://www.geologiemiiliaromagna.it/rivista/2007-27_Montanari.pdf.
21. Environmental management of the stone cutting industry / *K.Nasseridine et al.* // *Journal of environmental management*. – 2009. – Vol. 90, No. 1. – P. 466–470. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.11.004.
22. *Mancini R.* Applicazioni e trattamenti in campo ingegneristico e industrial / *R.Mancini, M.Fornaro, G.A. Dino* // Politecnico di Torino. – Torino, Italy, 2005 [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf>.
23. EUR-Lex–31999L0031–EN–EUR-Lex [Electronic resource]. – Access mode : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>.
24. *Aliabdo A.A.* Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete / *A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty, E.M. Auda* // *Construction and building materials*. – 2014. – Vol. 50. – P. 28–41. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005.
25. *Khale D.* Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review / *D.Khale, R.Chaudhary* // *Journal of materials science*. – 2007. – Vol. 42, No. 3. – P. 729–746. DOI: 10.1007/s10853-006-0401-4.
26. *Provis J.L.* Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? / *J.L. Provis* // *Materials and structures*. – 2013. – Vol. 47, No. 1–2. – P. 11–25. DOI: 10.1617/s11527-013-0211-5.
27. Slag-alkaline binders based on dump waste blast furnace slag / *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2019. – No. 5. – P. 160–167. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-126-5-160-167.
28. *Yu G.* Microstructure and mechanical properties of fly ash-based geopolymer cementitious composites / *G.Yu, Y.Jia* // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12, No. 7. – P. 853. DOI: 10.3390/min12070853.
29. *Rožek P.* Geopolymer-zeolite composites: a review / *P.Rožek, M.Król, W.Mozgawa* // *Journal of cleaner production*. – 2019. – Vol. 230. – P. 557–579. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.152.
30. *Davidovits J.* Geopolymer chemistry and applications, 5th ed. / *J.Davidovits*. – Geopolymer Institute, 2020. – 698 p.
31. *Bell J.L.* Nanoporosity in aluminosilicate, geopolymeric cements / *J.L. Bell, W.M. Kriven* // *Microscopy and microanalysis*. – 2004. – Vol. 10, S02. – P. 590–591. DOI: 10.1017/s1431927604884496.
32. Hard X-ray nanotomography of amorphous aluminosilicate cements / *J.L. Provis et al.* // *Scripta materialia*. – 2011. – Vol. 65, No. 4. – P. 316–319. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.04.036.
33. Geopolymer technology: the current state of the art / *P.Duxson et al.* // *Journal of materials science*. – 2006. – Vol. 42, No. 9. – P. 2917–2933. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z.
34. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials / *J.S.J. van Deventer et al.* // *Waste and biomass valorization*. – 2010. – Vol. 1, No. 1. – P. 145–155. DOI: 10.1007/s12649-010-9015-9.
35. Effect of iron oxide (Fe₂O₃) on the properties of fly ash based geopolymer / *W.W.A. Zailani et al.* // *IOP conference series: materials science and engineering*. – 2020. – Vol. 877. – P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899x/877/1/012017.
36. Development of ceramic materials for the manufacture of bricks with stone cutting sludge from granite / *J.M. Terrones-Saeta et al.* // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10, No. 7. – P. 621. DOI: 10.3390/min10070621.

References:

1. Aznar-Sánchez, J. et al. (2018), «Mining waste and its sustainable management: advances in worldwide research», *Minerals*, Vol. 8, No. 7, pp. 284, doi: 10.3390/min8070284.
2. Tayebi-Khorami, M. et al. (2019), «Re-Thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations», *Minerals*, Vol. 9, No. 5, pp. 286, doi: 10.3390/min9050286.
3. Almeida, M.I. et al. (2015), «Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks», *Journal of cleaner production*, Vol. 92, pp. 206–215, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.073.
4. Zhang, L. et al. (2019), «CO2 emission linkage analysis in global construction sectors: alarming trends from 1995 to 2009 and possible repercussions», *Journal of cleaner production*, Vol. 221, pp. 863–877, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.231.
5. Subashi De Silva, G.H.M.J. and Mallwattha M.P.D.P. (2018), «Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge», *Construction and building materials*, Vol. 179, pp. 390–399, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.187.
6. Liu, B. et al. (2020), «Composition of energy outflows embodied in the gross exports of the construction sector», *Journal of cleaner production*, Vol. 248, pp. 119–296, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119296.
7. Gupta, V. et al. (2020), «A state of the art review to enhance the industrial scale waste utilization in sustainable unfired bricks», *Construction and building materials*, Vol. 254, pp. 119220, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119220.
8. «Production of bricks from waste materials – A review» (2013), *Construction and building materials*, Vol. 47, pp. 643–655, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043.
9. Fiala, L. et al. (2020), «Application of ceramic waste in brick blocks with enhanced acoustic properties», *Journal of cleaner production*, Vol. 261, pp. 121–185, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121185.
10. Ozturk, S. et al. (2019), «Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures», *Construction and building materials*, Vol. 217, pp. 592–599, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114.
11. Taurino, R. et al. (2019), «Lightweight clay bricks manufactured by using locally available wine industry waste», *Journal of building engineering*, Vol. 26, pp. 100892, doi: 10.1016/j.job.2019.100892.
12. Eliche-Quesada, D. et al. (2011), «The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks», *Applied clay science*, Vol. 52, No. 3, pp. 270–276, doi: 10.1016/j.clay.2011.03.003.
13. Singh, A. et al. (2011), «Review of life-cycle assessment applications in building construction», *Journal of architectural engineering*. – 2011. – Vol. 17, No. 1. – P. 15–23, doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000026.
14. Teo, P.T. et al. (2019), «Recycling of Malaysia's EAF steel slag waste as novel fluxing agent in green ceramic tile production: sintering mechanism and leaching assessment», *Journal of cleaner production*, Vol. 241, pp. 118–144, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118144.
15. Cusidó, J.A., Cremades, L.V. and Cusidó, J.A. (2012), «Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: leachability and toxicity studies», *Waste management*, Vol. 32, No. 6, pp. 1202–1208, doi: 10.1016/j.wasman.2011.12.024.
16. Mao, L., Guo, H. and Zhang, W. (2018), «Addition of waste glass for improving the immobilization of heavy metals during the use of electroplating sludge in the production of clay bricks», *Construction and building materials*, Vol. 163, pp. 875–879, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.177.
17. Graziani, A. and Giovannelli, G. (2015), *I lapidei struttura del settore e tendenze innovative*, Centro Studi Fillea, Rome, 25 p., [Online], available at: http://www.filleacgil.it/nazionale/accordi/all_1817.pdf
18. Zichella, L. et al. (2018), «Preliminary investigations on stone cutting sludge processing for a future recovery», *Journal of cleaner production*, Vol. 178, pp. 866–876, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.226.
19. Dino, G.A., Fornaro, M., Corio, E. and Fornaro, E. (2006), «Residual sludge management: A possible reuse as loam», *EU H2020 ITN "REMEDIATE" View project Pioneering an EU-wide understanding of Secondary Raw Materials availability from landfills View project Residual sludge management: A possible reuse as loam*, Proceedings of the 10th IAEG congress, Nottingham, UK, 6–10 September.
20. Montanari, E. (2007), «Una particolare categoria di rifiuti provenienti da attività estrattiva: i limi di lavaggio inerti-Problematiche inerenti e quadro normative», *J. Ord. Geol. Emilia-Romagna*, Vol. 27, pp. 31–36, [Online], available at: http://www.geologiemiiliaromagna.it/rivista/2007-27_Montanari.pdf
21. Nasseridine, K. et al. (2009), «Environmental management of the stone cutting industry», *Journal of environmental management*, Vol. 90, No. 1, pp. 466–470, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.11.004.
22. Mancini, R., Fornaro, M. and Dino, G.A. (2005), «Applicazioni e trattamenti in campo ingegneristico e industrial», *Politecnico di Torino*, Torino, Italy, [Online], available at: <http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf>
23. EUR-Lex-31999L0031-EN-EUR-Lex, [Online], available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>
24. Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. and Auda, E.M. (2014), «Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete», *Construction and building materials*, Vol. 50, pp. 28–41, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005.
25. Khale, D. and Chaudhary, R. (2007), «Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review», *Journal of materials science*, Vol. 42, No. 3, pp. 729–746, doi: 10.1007/s10853-006-0401-4.
26. Provis, J.L. (2013), «Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?», *Materials and structures*, Vol. 47, No. 1–2, pp. 11–25, doi: 10.1617/s11527-013-0211-5.

27. «Slag-alkaline binders based on dump waste blast furnace slag» (2019), *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, No. 5, pp. 160–167, doi: 10.32434/0321-4095-2019-126-5-160-167.
28. Yu, G. and Jia, Y. (2022), «Microstructure and mechanical properties of fly ash-based geopolymer cementitious composites», *Minerals*, Vol. 12, No. 7, pp. 853, doi: 10.3390/min12070853.
29. Rožek, P., Król, M. and Mozgawa, W. (2019), «Geopolymer-zeolite composites: a review», *Journal of cleaner production*, Vol. 230, pp. 557–579, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.152.
30. Davidovits, J. (2020), *Geopolymer chemistry and applications*, 5th ed., Geopolymer Institute, 698 p.
31. Bell, J.L. and Kriven, W.M. (2004), «Nanoporosity in aluminosilicate, geopolymeric cements», *Microscopy and microanalysis*, Vol. 10, S02, pp. 590–591, doi: 10.1017/s1431927604884496.
32. Provis, J.L. et al. (2011), «Hard X-ray nanotomography of amorphous aluminosilicate cements», *Scripta materialia*, Vol. 65, No. 4, pp. 316–319, doi: 10.1016/j.scriptamat.2011.04.036.
33. Duxson, P. et al. (2006), «Geopolymer technology: the current state of the art», *Journal of materials science*, Vol. 42, No. 9, pp. 2917–2933, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
34. J.S.J. van Deventer et al. (2010), «Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials», *Waste and biomass valorization*, Vol. 1, No. 1, pp. 145–155, doi: 10.1007/s12649-010-9015-9.
35. Zailani, W.W.A. et al. (2020), «Effect of iron oxide (Fe₂O₃) on the properties of fly ash based geopolymer», *IOP conference series: materials science and engineering*, Vol. 877, pp. 012017, doi: 10.1088/1757-899x/877/1/012017.
36. Terrones-Saeta, J.M. et al. (2020), «Development of ceramic materials for the manufacture of bricks with stone cutting sludge from granite», *Minerals*, Vol. 10, No. 7, pp. 621, doi: 10.3390/min10070621.

Шамрай Володимир Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-9441-9379>.

Наукові інтереси:

- видобуток та обробка природного каменю;
- обробка природного каменю.

E-mail: kgt_shvi@ztu.edu.ua.

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-3551-5085>.

Наукові інтереси:

- лісові екосистеми;
- радіоекологічні проблеми Українського Полісся;
- оцінка впливу на довкілля.

E-mail: org_vvm@ztu.edu.ua.

Темченко Анатолій Георгійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- енергозберігаючі технології відкритої розробки залізрудних родовищ.

E-mail: temchenko_oa50@ukr.net.

Махно Артур Миколайович – аспірант кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7428-9578>.

Наукові інтереси:

- відкрита розробка родовищ корисних копалин;
- видобуток та обробка природного каменю.

E-mail: artma28@gmail.com.

Ігнатюк Роман Мирославович – аспірант кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7393-243X>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- обробка природного каменю;
- раціональне природокористування.

E-mail: krrkp_irm@ztu.edu.ua.

Shamrai V.I., Melnyk-Shamrai V.V., Temchenko A.H., Makhno A., Ihnatiuk R.M.

Research on the qualitative properties of stone quarrying and stone processing waste for the purpose of using them as raw materials for the production of geopolymer concrete

Mining and processing industries are characterized by a large amount of generated waste. In the structure of waste generation as of 2020, 96 % of the total amount belongs to waste from the mining and processing industry. That is why the development of new ways of disposal of waste from mining enterprises is an urgent scientific and practical task. The paper describes the characteristics of finely dispersed waste from stone mining and stone processing enterprises with the aim of using them as raw materials for the production of geopolymer concrete. The chemical and granulometric composition of waste from stone mining and stone processing enterprises, namely stone sludge, which is formed as a result of cutting natural stone, was studied. In contrast to waste from stone processing enterprises, sludge from stone mining enterprises is characterized by a stable chemical composition. This is explained by the fact that stone processing enterprises process natural stone from various deposits that have an excellent mineralogical and chemical composition, natural stone from the same deposit have similar mineralogical and chemical composition. Since the Si/Al ratio, which must be greater than 3, is important for the manufacture of geopolymers, the chemical composition of sludge from stone processing enterprises that process various rocks was analyzed. Studies have shown that the Si/Al ratio is greater than 3. Research has established [35] that 80-90 % of the particles in the fly ash composition for the production of geopolymer concrete should have a size of less than 45 μm . Therefore, the granulometric composition of the stone sludge was given, which showed that 14 % of the particles have a size of less than 50 μm , and 79 % of the particles have a size of 50 μm to 100 μm . Whereas clay has particles with a size of less than 50 μm in the amount of 79 % and 14 % of particles with a size of 50 μm to 100 μm . The granulometric composition of sand, as a raw material used in the production of concrete, was also determined.

Keywords: geopolymer concrete, stone sludge, granulometric composition of stone sludge, chemical composition of stone sludge, utilization of stone sludge

Стаття надійшла до редакції 23.03.2023.