

В.К. Костенко, д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри природоохоронної діяльності
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Україна, 82100.

М.І. Таврель, старший викладач кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
Південне шосе, 80, м. Запоріжжя, Україна, 69008.

О.П. Богомаз, PhD, доцент, доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка»
Південне шосе, 80, м. Запоріжжя, Україна, 69008.

О.І. Кутняшенко, к-т. техн. наук, доцент, доцент кафедри природоохоронної діяльності
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Україна, 82100.

Т.В. Костенко, д-р. техн. наук, професор, професор кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій
Національний університет цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18034.

Анотація. Внаслідок повномасштабного вторгнення значні площі населених пунктів України зазнали руйнувань, що створює нагальну потребу в ефективних та економічних рішеннях для ліквідації руїн і відновлення інфраструктури. Великі обсяги будівельних відходів становлять екологічну проблему, але одночасно є потенційним джерелом вторинної сировини для будівництва. У цьому контексті особливе значення набуває застосування мобільних механізованих комплексів для збору, подрібнення та сортування уламків. Методологія дослідження включає аналіз міжнародного досвіду, розробку технологічної схеми мобільної інтенсивної розборки та узгодження параметрів виробничих процесів для забезпечення високої продуктивності та екологічної безпеки. Метою роботи є обґрунтування технології мобільної розборки з подальшою переробкою будівельних відходів для використання у дорожніх, бетонних та фундаментних роботах у післявоєнний період. Результати дослідження демонструють, що запропонована технологія дозволяє ефективно сортувати та подрібнювати матеріали, зменшувати логістичні витрати, повторно використовувати до 50% природного щебеню та піску, а також скорочувати негативний вплив на довкілля. Обмеження пов'язані з різною продуктивністю машин, складом відходів та необхідністю попереднього кагатування матеріалу. Практична цінність полягає у зниженні вартості будівництва та прискоренні відбудови зруйнованих населених пунктів. Наукова новизна визначається гармонізацією технологічних процесів та інтеграцією мобільних методів інтенсивної розборки, що забезпечує економічний і екологічний ефект. Запропонована технологія поєднує принципи циркулярної економіки із реальними потребами післявоєнного будівництва.

Ключові слова: мобільна розборка, переробка будівельних відходів, вторинні матеріали, дробарні комплекси, інтенсивне подрібнення, сепарація фракцій, циркулярна економіка, післявоєнна відбудова, продуктивність машин, екологічна безпека

ТЕХНОЛОГІЯ РЕЦИКЛІНГУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗБОРЦІ ЗРУЙНОВАНИХ СПОРУД

Постановка проблеми. Сучасні умови відбудови зруйнованих внаслідок бойових дій населених пунктів України вимагають пошуку ефективних та економічних технологічних рішень, спрямованих на раціональне використання наявних ресурсів. Важливим є прискорення ліквідації руїн та відбудови населених пунктів і підприємств. Значні обсяги уламків, що утворилися у результаті руйнувань житлових, промислових та транспортних об'єктів, становлять екологічну проблему, проте водночас є потенційним джерелом вторинної сировини. Використання важкої будівельної техніки, зокрема екскаваторів, бульдозерів і дробарок, дає змогу ефективно здійснювати збирання, транспортування та переробку цих матеріалів із подальшим їхнім використанням у процесах відбудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових публікацій та технічних звітів свідчить про те, що в розвинених країнах Європейського Союзу, Китаю та Японії накопичено

досвід окремих випадків застосування мобільних дробарних установок для переробки будівельних відходів, які забезпечують високі екологічні показники у порівнянні зі стаціонарними [1-4]. Дослідження показують, що мобільні дробарні комплекси мають кращі екологічні показники порівняно зі стаціонарними установками, зокрема скорочують транспортування та утилізацію відходів на 30-35% і знижують вартість будівництва завдяки заміщенню первинних матеріалів [5]. Вартість отримання такої сировини є суттєво нижчою, ніж витрати на видобуток, дроблення та транспортування природних матеріалів.

Повторно перероблені будівельні відходи [6], зокрема бетон та цегла, використовуються як заповнювачі у дорожньому будівництві [7], у виробництві бетонних блоків [8], а також у ландшафтних роботах. Значна увага приділяється економічним аспектам переробки – витрати на отримання вторинного щебеню істотно нижчі, ніж на

видобування та транспортування природних матеріалів [9, 10]. Встановлено, що показники міцності та довговічності відповідають нормативним вимогам при повторному використанні будівельних матеріалів [11] за умови дотримання технологічних вимог та обмеженого обсягу заміни матеріалу [12, 13].

За оцінками досліджень, використання переробленого бетону в дорожніх основах дає змогу знизити загальну вартість будівництва на 20-30%, а витрати на виробництво вторинного щебеню – на 40-60% порівняно з видобутим природним [7].

Таким чином, використання вторинних будівельних матеріалів в Україні у післявоєнних умовах відкриває можливість поєднати економічну ефективність з екологічною безпекою, скоротити потребу у первинних природних ресурсах та прискорити відбудову зруйнованої інфраструктури.

Постановка завдання та його вирішення.

Традиційне виробництво будівельних матеріалів потребує значних фінансових витрат і супроводжується виснаженням природних ресурсів, що ускладнює процес відбудови у сучасних умовах. Джерела руйнувань після обстрілів розташовано хаотично, тому їх розборка і відновлення потребують значних витрат часу і фінансів на пересування спеціальної техніки, а також на логістичні операції з вивезення відходів та доставку нових будівельних матеріалів. Водночас величезні обсяги будівельних відходів, що утворилися внаслідок руйнувань, можуть розглядатися як перспективне джерело вторинної сировини, що є актуальним рішенням проблеми. Так, переробка уламків бетону, цегли та асфальту за допомогою важкої техніки дає змогу зменшити обсяги будівельних відходів, скоротити екологічне навантаження на довкілля та знизити вартість будівництва за рахунок повторного використання матеріалів. Враховуючи світовий досвід та сучасні тенденції розвитку циркулярної економіки, впровадження технологій збору й переробки будівельних залишків набуває особливого значення для України, оскільки поєднує економічну ефективність, екологічну безпеку та соціальну необхідність.

Метою роботи є обґрунтування технології мобільної інтенсивної розборки зруйнованих споруд із подальшою переробкою уламків для їхнього використання у будівництві в контексті післявоєнної відбудови.

У результаті повномасштабного вторгнення РФ на території України зафіксовано руйнування понад 236 тис. об'єктів, з них 209 тис. - приватних (індивідуальних) будинків; 27 тис. - багатоквартирних будинків; 0,6 тис. - гуртожитків. Найбільшого ураження зазнали житлово-комунальна інфраструктура, підприємства торгівлі та промисловості, транспортна мережа, аграрний сектор та енергетика [14]. Унаслідок таких масштабних пошкоджень у населених пунктах серед віцілілих житлових масивів сформувалися розрізнені ділянки суцільних руйнувань, що потребують комплексного розчищення та підготовки до

відбудови. Ліквідація руйнувань задля наступної відбудови обумовлює необхідність використання маневрової організації ведення інтенсивних робіт. Водночас слід мінімізувати виникнення негативного впливу на довкілля та прилеглі населені території. Крім того, у подальшому виникає необхідність виготовлення та доставки на розчищені майданчики нових будівельних матеріалів.

Однією з основних проблем демонтажу будівель і споруд є утворення великої кількості відходів, які складаються з суміші бетону, цегли, кераміки, скла, арматури, труб, деревини, асфальту та інших матеріалів. Така маса має різноманітний склад і гранулометрію, що унеможливорює її безпосереднє використання у будівельних процесах. Зазвичай ці відходи вивозяться на полігони, що призводить до швидкого переповнення відведених площ, забруднення ґрунтів і підземних вод, збільшення витрат на транспортування та утилізацію, а також до втрати потенційно цінної сировини, яку можна було б використати повторно.

Виникає необхідність обґрунтування технології, яка базується на високому рівні мобільності та механізації основних виробничих процесів із використанням засобів, що зменшують негативний вплив на навколишнє середовище. Необхідна можливість швидкого перебезування техніки з одного об'єкту на інший. Основним позитивним показником ефективності має бути переробка уламків у будівельні матеріали або їхні напівфабрикати.

Запропоновано технологію, загальна схема якої включає такі основні етапи (рис. 1). Спочатку руйни переводять у безпечний стан, усуваючи ризик обвалень. Далі екскаватор із навісним обладнанням і бульдозер видаляють непридатні до переробки матеріали (залізобетонні, металеві, пластикові та дерев'яні деталі тощо) і вивозять їх на полігони. Решту уламків за допомогою навісного пристосування на екскаваторі типу гідромолоту подрібнюють до розміру, необхідного для подачі у приймальний отвір дробарки. Підготований до подрібнення матеріал укладають бульдозером у кагат. За допомогою фронтального навантажувача або породонавантажувальної машини матеріал подають до приймального бункера пересувної дробарки, яка, під час подрібнення уламків, знаходиться у мобільному пункті сепарації. Пункт сепарації являє собою відкритий з одного торця намет, змонтований на розбірному каркасі. З одного боку утворено відкидні дверцята задля обміну заповнених контейнерів на порожні (рис. 2). Перероблений матеріал спрямовують до дискового сепаратора або гуркотів. Під конвеєром встановлюють контейнери для відсортованого матеріалу певних фракцій. Для всмоктування пилу, що утворюється під час подрібнення та сепарації матеріалу, у мобільному пункті сепарації прокладено жорсткий трубопровід із відростками. На кінці трубопроводу, перед вентилятором, розташовано фільтруючий елемент.

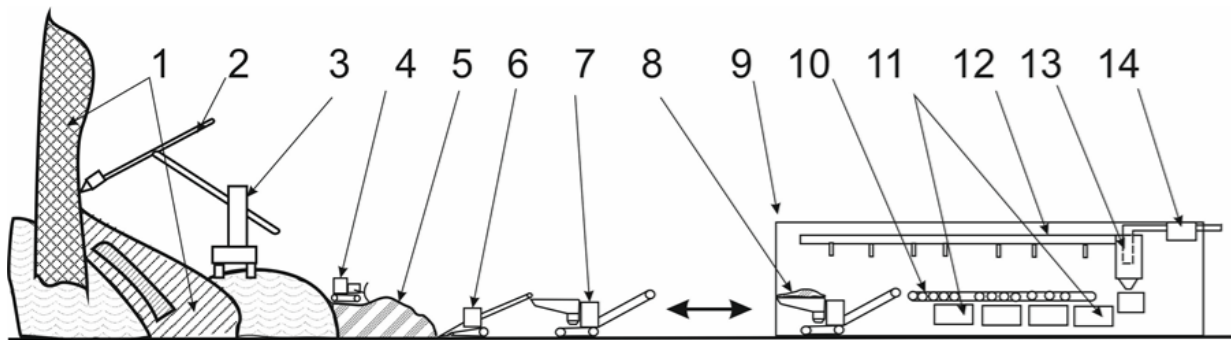


Рисунок 1 – Схема технології мобільної інтенсивної розборки зруйнованих споруд з переробкою уламків задля подальшого використання у будівництві: 1 – початковий стан руїн, 2 – навісне обладнання екскаватора, 3 – екскаватор, 4 – бульдозер, 5 – кагат, 6 – породонавантажувальна машина, 7, 8 – пересувна дробарка, відповідно, під час завантаження кузова та при подрібненні породи, 9 – пункт сепарації, 10 – дисковий сепаратор, 11 – контейнери для відсортованого матеріалу, 12 – жорсткий трубопровід з відростками, 13 – фільтруючий елемент, 14 – вентилятор

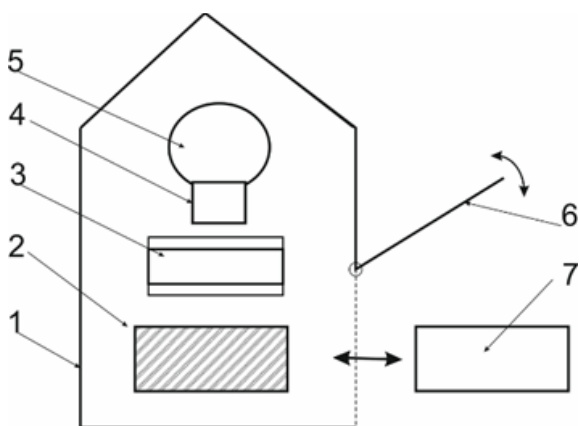


Рисунок 2 – Схема поперечного перерізу пункту сепарації матеріалу: 1 – каркасна тимчасова споруда; 2 – контейнер для збору відсіяного матеріалу; 3 – дисковий сепаратор; 4 – патрубок вентиляційного всмоктувального трубопроводу; 5 – трубопровід; 6 – двері для обміну контейнерів; 7 – порожній контейнер

Запропонованій технології розборки руїн властива певна гнучкість – у разі дефіциту засобів механізації можливе переміщення уламків від екскаватора з використанням дробарки як транспортного засобу. Підготовані на першому етапі уламки завантажують ковшовим екскаватором до бункера пересувної дробарки, яка доставляє їх від місця екскавації руїн до окремо розташованого пункту сепарації. Однак така зміна організації робіт призводить до зниження швидкості розбирання завалів та виробництва будівельних матеріалів.

Розглянемо більш детально послідовність технологічних процесів. Спочатку здійснюється первинне сортування, під час якого великогабаритні конструкції та металеві елементи відділяються від загальної маси для подальшої спеціалізованої переробки. Ситуацію ускладнює наявність завислих фрагментів споруд, що мають нестійке положення, які створюють небезпеку робітникам та призводять до здороження виробництва. У деяких випадках доцільно використовувати способи мікровибухового

обвалення конструкцій з розтрощенням цегельних і бетонних елементів.

У процесі переробки будівельних відходів провідну роль відіграє важка будівельна техніка, яка забезпечує інтенсивне механізоване виконання всіх етапів технологічного циклу - від розчищення території після руйнувань до отримання відсортованих фракцій, придатних для повторного використання. Застосування ручної праці в цьому випадку є неефективним через великі обсяги матеріалу, високі витрати часу та ризик для робітників у зоні зруйнованих конструкцій.

У переробних роботах доцільно використовувати багатофункціональні екскаватори зі змінним навісним обладнанням, здатні виконувати комплекс різнотипних завдань - від демонтажу до навантаження та очищення території. Завдяки універсальній системі навісних пристроїв один екскаватор може послідовно здійснювати декілька технологічних операцій, що підвищує ефективність робіт. Наявність різних варіантів навісних інструментів (робочих органів) забезпечує адаптацію техніки до конкретних умов будівельного майданчика, типу уламків та обсягів матеріалу. Такий підхід дозволяє гнучко організувати процес демонтажу і переробки, скорочуючи потребу в залученні додаткових одиниць техніки та оптимізуючи витрати ресурсів.

Екскаватори забезпечують вибірковий демонтаж та дроблення окремих масивних елементів будівельних конструкцій, таких як плити перекриття чи залізобетонні балки. За допомогою захватів видаляють непридатні до переробки на місці металобрухт, уламки залізобетонних конструкцій, вироби з пластику, дерев'яні деталі, які відправляють на спеціалізовані полігони. Екскаватор із навісним гідромолотом зменшує габарити придатних до переробки уламків до розміру, допустимого для завантаження у дробарку, як правило, від 0,6 до 1,0 м. За допомогою ковша екскаватора здійснюється навантаження уламків на транспортні засоби.

Одним із ключових механізмів технологічного процесу є бульдозер, який забезпечує первинне очищення території, переміщення відходів і формування потоків матеріалу до подальших етапів

переробки. Виконуючи функції штовхання, розрівнювання та подавання уламків у зону завантаження, ця машина створює безперервність технологічного циклу. Залежно від обсягів руйнувань та фізико-механічних властивостей уламків, застосовують гусеничні або колісні модифікації техніки, що здатні ефективно працювати у важких умовах рельєфу та при переміщенні великогабаритних фрагментів матеріалу.

Фронтальні навантажувачі, здійснюють подавання будівельних відходів з кагатів до дробильних установок, а також транспортування у подальшому сепарованих матеріалів. Можливо використання породонавантажувальних гірничих машин типу 2ПНБ2, які підбирають уламки з ґрунту і, за допомогою вбудованого конвеєра, підіймають на необхідну для навантаження висоту.

На наступному етапі здійснюється подрібнення уламків будівельних матеріалів до заданих фракцій. Для цього застосовують пересувні дробильні установки, які забезпечують гнучкість процесу та можливість оперативного переміщення між ділянками робіт. Такі агрегати здатні переробляти різномірні матеріали - від бетону та цегли до асфальту й кам'яних фрагментів - із налаштуванням режимів відповідно до технологічних вимог. Мобільні дробарки різних типів відрізняються конструкцією та принципом дії, однак усі вони дозволяють регулювати розміри вихідних фракцій, оптимізуючи продуктивність процесу залежно від міцності матеріалу та необхідного ступеня подрібнення.

Багато сучасних подрібнювачів обладнано системами автоматичного управління та контролю, що забезпечує більш точний та ефективний процес подрібнення матеріалів. На практиці використовуються пересувні дробарки різної продуктивності, що дають змогу адаптувати процес подрібнення до складу матеріалу та умов майданчика. Існує широкий діапазон моделей, що мають різну продуктивність і можливості. Об'єм завантажувального бункера дробарок варіюється у широкому діапазоні - до 6 м³ і більше. Продуктивність подрібнювальних агрегатів визначається типом обладнання, характеристиками матеріалу та налаштуваннями режимів подрібнення, що враховується під час планування процесу. У середньому продуктивність мобільних щоківих дробарок 50-400 т/год (для бетону, цегли, будівельних відходів); роторних 70-500 т/год (добре підходять для асфальту, бетону); конусних 80-600 т/год (ефективні для твердих і абразивних матеріалів, гравію, щебеню). Для невеликих будівельних майданчиків часто застосовують установки продуктивністю 30-150 т/год.

У пункті сепарації здійснюється розділення отриманої маси за розміром часток на фракції: дрібну, середню та велику. Дрібна фракція до 5 мм, включає також пил і пісок, використовується як наповнювач у бетонних і будівельних сумішах. Середня фракція, представлена щебенем розміром від 5 до 40 мм, придатна для застосування у дорожніх основах, виробництві бетонних блоків та у

фундаментних роботах. Великі фрагменти, зокрема бутові каміння розміром від 50 до 100 мм, застосовуються для укріплення укосів, у габійних конструкціях чи при облаштуванні тимчасових доріг. Фракції каміння, що перевищують 100 мм, можна використовувати при заповненні вирв, ям тощо.

Залежно від налаштування подрібнювальних агрегатів, на виході з подрібнювача, отримують суміш шматків різного розміру. При інтенсивному подрібненні домінують фракції малого розміру, при меншому - великого, але присутні, як правило, всі. Задля описування складу подрібненого матеріалу використовують гранулометричні криві або їх спрощений варіант - гранулометричні діаграми. Вони вказують, яка частина об'єму подрібненого матеріалу у процентному відношенні належить до певної фракції (рис. 3), при цьому сума всіх складових $\Sigma Q_i = 100\%$. Гранулометричні показники залежать від багатьох чинників: співвідношення вихідних матеріалів у складі уламків, їх фізико-механічних властивостей, налаштування дробарки тощо, тому встановлювати вид реальної діаграми доцільно експериментальним шляхом. Такі дані потрібні для планування виготовлення будівельних напівфабрикатів, а також для режиму обміну у пункті сепарації заповнених контейнерів на порожні.

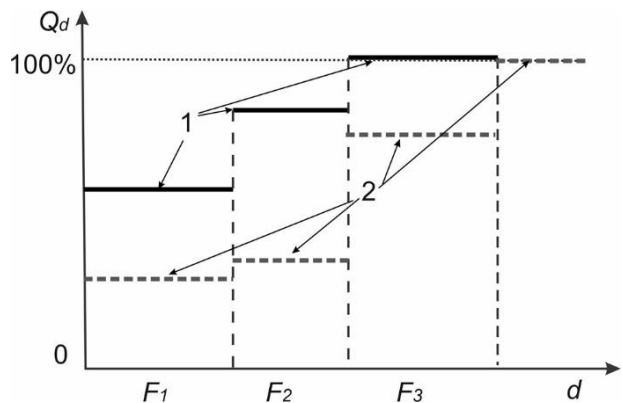


Рисунок 3 – Гранулометрична діаграма подрібненого матеріалу після сепарації:

Q_d – кількість подрібненого матеріалу, %; d – розмір частин; F_1 - F_3 – діапазони розмірів фракцій продукції; 1, 2 – гранулометричні лінії відповідно малопрочного і твердого матеріалу

Подрібнений матеріал подається на дисковий сепаратор зверху. Обертові диски створюють каскадний ефект: дрібніші частинки проходять крізь проміжки між дисками, тоді як більші переміщуються для подальшої обробки або видалення. Дрібна фракція вивантажується знизу, а решта матеріалу завдяки обертанню дисків переміщується по їх поверхні до місця вивантаження більшої фракції, після чого відсіювання повторюється.

Дискові сепаратори відомі своїми можливостями самоочищення. Обертові диски, постійно перемішуючи матеріал, допомагають попередити засмічення та забивання, при цьому мінімізуючи час простою для очищення та обслуговування. Це призводить до підвищення експлуатаційної

ефективності та зменшення витрат, пов'язаних з перервами у процесі просіювання. Конструкція дисків забезпечує більшу площу поверхні просіювання, що дозволяє збільшити пропускну здатність матеріалу та підвищити продуктивність. Обертальний рух дисків вимагає менше енергії порівняно з альтернативними технологіями просіювання, що призводить до економії енергії та зниження експлуатаційних витрат.

Матеріал певної фракції, що проникає під диски, постулає до металевих контейнерів. Заповнені контейнери, за допомогою навантажувача, видаляють через бокові двері приміщення сепараційного пункту, а на їх місце встановлюють порожні. Гранулометрична діаграма є підґрунтям планування ротації контейнерів.

Подрібнення та сепарація супроводжуються інтенсивним утворенням пилу, що становить небезпеку як для працівників, так і для довкілля. Задля обмеження розповсюдження пилових часток процеси подрібнення і сепарації виконують в обмеженому просторі сепараційного пункту обладнаного примусовою всмоктувальною вентиляцією з фільтруванням повітря. Повітряно-пилова суміш відсмоктується з робочої зони, до патрубків вентиляційної труби, проходить через очисні пристрої назовні, а зібраний пил накопичується в окремих ємностях. Цей матеріал може використовуватися повторно, наприклад, як мінеральна добавка у виробництві сухих сумішей або як компонент стабілізаційних шарів у дорожньому будівництві.

Для реалізації запропонованої удосконаленої технології необхідно визначити виробничі показники та вимоги до техніки, що застосовується. Для цього слід узгодити взаємодію всіх виробничих процесів. Виходячи з основних технічних характеристик машин – таких як ємність ковшів та бункерів, швидкість подрібнювання та пересування, а також необхідність перерв на обслуговування та зміну виду робіт – слід спроектувати безперервний ланцюг операцій. Це дозволить визначити продуктивність усього комплексу робіт і планувати темпи як розборки площі руїн, так і рециклінгу матеріалів.

Домінуючим у технологічному ланцюгу є процес подрібнення уламків у дробарці. Її продуктивність Q_{dr} визначає решту суміжних показників, це головний показник роботи усього комплексу машин. Змінну продуктивність доцільно визначати, виходячи з паспортного показника годинної продуктивності Q_{do} , т/год та реального робочого часу машини t_{dr} . Тривалість робочого часу дробарки визначається як тривалість зміни ($t_c=8$ годин) за відрахуванням часу на виконання дій з приведення установки до робочого стану на початку і вкінці зміни, зупинок на ротації контейнерів, планових перерв. Всі прості дробарки доцільно об'єднати у вигляді коефіцієнта машинного часу k_{dr} – показника чистої роботи з подрібнення уламків протягом зміни:

$$Q_{dr} = t_c \cdot Q_{do} \cdot k_{dr}, m \quad (1)$$

Дисковий сепаратор працює одночасно з дробаркою, його продуктивність Q_{dc} також слід визначити як $Q_{dc}=Q_{dr}$, тип сепаратора обирають по каталогу, орієнтуючись на величину Q_{do} , а саме на найближчий більший показник. Динаміка накопичення фракцій подрібнених матеріалів визначається побажанням замовника, що впливає на регулювання режимів роботи дробарки та сепаратора, і в даній публікації не розглядається.

Фронтальний навантажувач повинен забезпечувати регулярне наповнення об'єму W_{dr}, m^3 приймального бункера дробарки, забезпечуючи її годинну продуктивність Q_{do} , т/год. Слід врахувати, що коефіцієнт розпушування, складеного з великих шматків середовища, дорівнює приблизно $k_{rr}=1,3$, на таку величину зменшується його густина ρ , у порівнянні з густиною $\rho = 2,5-3,0$ т/м³ суцільного будматеріалу. Функції машини полягають у завантаженні ковшу навантажувача об'ємом W_{dk} , уламками масою $Q_{dk}=W_{dk} \cdot \rho / k_{rr}$, доставці партії до пункту сепарації, розвантаження до бункера дробарки. Час одного циклу доставки t_{dk} , год, що витрачається на переміщення від кагату до пункту сепарації і назад визначається як поділ відстані $2l$, м між цими пунктами на швидкості v_{dk} , км/год навантажувача, тобто $t_{dk}=2l/v_{dk}$. Тривалість вантажно-розвантажувального циклу включає також втрати часу на заповнення ковшу t_{dz} та розвантаження у бункер t_{du} , такі дані визначаються технічними характеристиками машини. Повна тривалість циклу складе $t_{dp}=t_{dk}+t_{dz}+t_{du}$, год. Прийmemo, що коефіцієнт машинного часу навантажувача близький до такого показника дробарки. Необхідна кількість повних циклів у зміні визначається як $n_c=t_c \cdot k_{dr}/t_{dp}$.

Навантажувач повинен протягом зміни забезпечувати безупинне заповнення бункера дробарки, тобто:

$$Q_{dr} = n_c \cdot Q_{dk} = \frac{t_c \cdot k_{dr} \cdot W_{dk} \cdot \rho}{k_{rr} \cdot t_{dp}} \quad (2)$$

З цього виразу можна визначити, яку місткість ковша навантажувача слід обирати, виходячи з продуктивності комплексу:

$$W_{dk} = \frac{Q_{dr} \cdot k_{rr} \cdot t_{dp}}{t_c \cdot k_{dr} \cdot \rho} \quad m^3 \quad (3)$$

Виконання робіт першого етапу з розборки руїн екскаватором не пов'язано жорстко з операціями наступного етапу, але повинна витримуватись вимога забезпечення об'єму кагату достатнього для роботи не менш двох-трьох змін комплексу. Це пояснюється виконанням важко прогнозованих видів робіт, зокрема зі зрушенням стін, вилученням та відвантаженням металобрухту, залізобетону, пластику тощо. Внаслідок цього може бути порушена ритмічність виконання робіт по відбору придатних до переробки уламків та поповнення кагату. Пропонується не тільки починати роботи першого етапу на кілька змін раніше наступних

операцій, але й обирати технічні показники екскаваторів і бульдозерів такими, що у 1,5-2 рази перевищують продуктивність дробарки Q_{dc} .

Таким чином, всі технологічні процеси та технічні характеристики обладнання узгоджені з основним показником – змінною продуктивністю Q_{dc} яка відповідає продуктивності комплексу.

Запропонована технологія розбирання руїн з рециклінгом відходів дозволяє зекономити значну частину будівельних матеріалів, що відповідає принципам циркулярної економіки та сприяє сталому розвитку будівельної галузі.

Наукову новизну становить нова послідовність технологічних процесів та обґрунтована гармонізація їхніх параметрів, що забезпечує економічний і екологічний ефект

Практичне значення полягає у тому, що вторинні будівельні матеріали можуть замінювати до 50% природного щебеню та піску в бетонних розчинах. Використання переробленого бетону в дорожніх основах дозволяє зменшити вартість робіт. Крім того, зменшується потреба у видобутку первинних матеріалів, зокрема граніту, піску та гравію, що є особливо важливим у післявоєнних умовах, коли логістика постачання ускладнена.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність удосконалення технології використання мобільних механізованих комплексів для збору, подрібнення та переробки зруйнованих будівельних матеріалів у процесі інтенсивного відновлення міської інфраструктури. Механізоване перетворення будівельних відходів на структуровані фракції дозволяє ефективно використовувати вторинну сировину, замінюючи велику частину природних

матеріалів у будівельних та дорожніх роботах. Впровадження мобільних дробильно-сортувальних комплексів забезпечує оперативність робіт, скорочує логістичні витрати та мінімізує негативний вплив на довкілля за рахунок зменшення пилового навантаження та зниження викидів шкідливих речовин.

Запропонований високий рівень механізації виробничих процесів визначає значні експлуатаційні витрати на паливе й амортизацію обладнання, але це нейтралізується за рахунок різкого скорочення строків ліквідації руїн та рециклінгом будматеріалів. З економічної точки зору, переробка будівельних відходів зменшує витрати на виробництво та транспортування первинних матеріалів, сприяє енергозбереженню та підвищує фінансову ефективність відбудови міст. Екологічні та економічні переваги технології взаємопов'язані – одночасне скорочення обсягів сміття, повторне використання ресурсів і зниження впливу на навколишнє середовище створюють умови для сталого розвитку будівельної галузі.

Таким чином, впровадження мобільних методів переробки будівельних відходів із застосуванням бульдозерів і дробарок є ефективним, екологічно безпечним та економічно виправданим рішенням для прискореної та раціональної відбудови України у післявоєнний період, поєднуючи принципи циркулярної економіки з практичними потребами відновлювального будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Application of aggregates from construction and demolition wastes in concrete: review / H. Luo et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 10. P. 4277. DOI: 10.3390/su16104277.
2. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling / G. Bonifazi et al. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2025. P. 101032. DOI: 10.1016/j.cogsc.2025.101032.
3. Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China / J. Li et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. P. 121371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121371.
4. Dosho Y. Development of a sustainable concrete waste recycling system. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2007. Vol. 5, no. 1. P. 27–42. DOI: 10.3151/jact.5.27.
5. The effect of phase change materials on the physical and mechanical properties of concrete made with recycled aggregate / Z. Jia et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 10. P. 2601. DOI: 10.3390/buildings13102601.
6. Systematic review of construction waste management scenarios: Informing life cycle sustainability analysis / A. T. Balasbaneh et al. *Circular Economy and Sustainability*. 2024. DOI: 10.1007/s43615-024-00424-z.
7. Sustainable usage of demolished concrete waste as a sub-base material in road pavement / M. A. Mazhar et al. *Frontiers in Sustainability*. 2023. Vol. 4. DOI: 10.3389/frsus.2023.1060878.
8. Tam V. W. Y., Soomro M., Evangelista A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 172. P. 272–292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
9. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete / B. Wang et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 171. P. 105565. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
10. Phutthimethakul L., Kumpueng P., Supakata N. Use of flue gas desulfurization gypsum, construction and demolition waste, and oil palm waste trunks to produce concrete bricks. *Crystals*. 2020. Vol. 10, no. 8. P. 709. DOI: 10.3390/cryst10080709.
11. Omary S., Ghorbel E., Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 108. P. 163–174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.
12. Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature / E. Q. R. Santiago et al. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2009. Vol. 2, no. 3. P. 211–221. DOI: 10.1590/s1983-41952009000300001.

13. Ginga C. P., Ongpeng J. M. C., Daly M. K. M. Circular economy on construction and demolition waste: a literature review on material recovery and production. *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 13. P. 2970. DOI: 10.3390/ma13132970.

14. KSE Institute. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року. Київ : Київська школа економіки, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (дата звернення: 30.09.2025).

Стаття надійшла до редакції...

V.K. Kostenko, M.I. Tavrel, O.P. Bohomaz, O.I. Kutnyashenko, T.V. Kostenko

TECHNOLOGY FOR RECYCLING CONSTRUCTION MATERIALS DURING THE DISMANTLING OF DESTROYED STRUCTURES

As a result of the full-scale invasion, significant areas of Ukrainian settlements have been destroyed, creating an urgent need for effective and cost-efficient solutions for rubble removal and infrastructure restoration. Large volumes of construction waste pose an environmental problem but also represent a potential source of secondary raw materials for construction. In this context, the use of mobile mechanized complexes for collecting, crushing, and sorting debris is of particular importance. The research methodology includes analysis of international experience, development of a technological scheme for mobile intensive dismantling, and coordination of production process parameters to ensure high productivity and environmental safety. The aim of the work is to justify a technology for mobile dismantling with subsequent recycling of construction waste for use in road, concrete, and foundation works in the post-war period. The results demonstrate that the proposed technology allows efficient sorting and crushing of materials, reduces logistics costs, enables reuse of up to 50% of natural gravel and sand, and minimizes negative environmental impact. Limitations are associated with varying machine productivity, waste composition, and the need for preliminary stockpiling of material. The practical value lies in reducing construction costs and accelerating the restoration of destroyed settlements. The scientific novelty is determined by the harmonization of technological processes and integration of mobile intensive dismantling methods, providing both economic and environmental benefits. The proposed technology combines circular economy principles with the real needs of post-war construction.

Keywords: mobile dismantling, construction waste recycling, secondary materials, crushing complexes, intensive crushing, fraction separation, circular economy, post-war reconstruction, machine productivity, environmental safety

REFERENCES

1. Application of aggregates from construction and demolition wastes in concrete: review / H. Luo et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 10. P. 4277. DOI: 10.3390/su16104277.

2. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling / G. Bonifazi et al. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2025. P. 101032. DOI: 10.1016/j.cogsc.2025.101032.

3. Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China / J. Li et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. P. 121371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121371.

4. Dosho Y. Development of a sustainable concrete waste recycling system. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2007. Vol. 5, no. 1. P. 27–42. DOI: 10.3151/jact.5.27.

5. The effect of phase change materials on the physical and mechanical properties of concrete made with recycled aggregate / Z. Jia et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 10. P. 2601. DOI: 10.3390/buildings13102601.

6. Systematic review of construction waste management scenarios: Informing life cycle sustainability analysis / A. T. Balasbaneh et al. *Circular Economy and Sustainability*. 2024. DOI: 10.1007/s43615-024-00424-z.

7. Sustainable usage of demolished concrete waste as a sub-base material in road pavement / M. A. Mazhar et al. *Frontiers in Sustainability*. 2023. Vol. 4. DOI: 10.3389/frsus.2023.1060878.

8. Tam V. W. Y., Soomro M., Evangelista A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 172. P. 272–292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.

9. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete / B. Wang et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 171. P. 105565. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.

10. Phutthimethakul L., Kumpueng P., Supakata N. Use of flue gas desulfurization gypsum, construction and demolition waste, and oil palm waste trunks to produce concrete bricks. *Crystals*. 2020. Vol. 10, no. 8. P. 709. DOI: 10.3390/cryst10080709.

11. Omary S., Ghorbel E., Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 108. P. 163–174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.

12. Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature / E. Q. R. Santiago et al. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2009. Vol. 2, no. 3. P. 211–221. DOI: 10.1590/s1983-41952009000300001.

13. Ginga C. P., Ongpeng J. M. C., Daly M. K. M. Circular economy on construction and demolition waste: a literature review on material recovery and production. *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 13. P. 2970. DOI: 10.3390/ma13132970.

14. KSE Institute. (2025). [Звіт про прями збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року] Report on direct damages to infrastructure due to Russian military aggression in Ukraine as of November 2024. Kyiv: Kyivska shkola ekonomiky. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf [data zverennya: 30.09.2025] [in Ukrainian].