

**В.І. Шамрай, к.т.н., доц.
В.В. Мельник-Шамрай, к.с.-г.н., доц.
Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.
Я.О. Наумов, асистент
Р.Р. Меринов, аспірант**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кількісна оцінка відходів при розпилюванні природного каменю дисковими пилами

У статті представлено комплексну кількісну оцінку утворення відходів при розпилюванні блоків природного каменю дисковими пилами, що є актуальним завданням для каменеобробної галузі. Дослідження вирішує науково-практичну проблему, що полягає у значній розбіжності між теоретичними розрахунками та фактичними обсягами втрат сировини на виробництві. Ця розбіжність призводить не лише до прямих економічних збитків через втрату дорогоцінного матеріалу, але й ускладнює виробниче планування та калькуляцію собівартості продукції.

Дослідженням підтверджено зворотну залежність між товщиною слябів та відсотком відходів. Практичні показники втрат, отримані в ході експерименту, значно перевищують ідеальні розрахункові значення. Наприклад, при розпилюванні на сляби товщиною 20 мм фактичні втрати сягають 51,41 %, тоді як теоретичний розрахунок прогнозує лише 34 %. Встановлено, що ключовою причиною такої різниці є подвійна природа відходів: крім технологічного шламу, що є неминучим наслідком роботи різального інструменту, утворюються геометричні відходи («обапол») через неправильну форму сировинних блоків. Аналіз 29 окремих блоків показав, що висока варіативність фактичних втрат (від 34 до 54 %) зумовлена переважно індивідуальною геометрією кожного блоку, що робить узагальнені розрахунки недостатньо точними для практичного застосування.

Головним результатом роботи є розроблена чотириетапна методика кількісної оцінки відходів, що дозволяє подолати обмеження існуючих підходів. Вона містить вхідний контроль із визначенням нетто- та бруто-об'ємів для попередньої оцінки геометричних втрат; теоретичне моделювання для розрахунку ідеального об'єму шламу; емпіричний аналіз для складання фактичного матеріального балансу після розпилювання; введення емпіричного коефіцієнта коригування (К). Цей коефіцієнт враховує неідеальності реального виробничого процесу (вібрації, знос інструменту тощо) і дозволяє створити вдосконалену прогностичну модель. Таким чином, запропонована методика перетворює оцінку відходів зі статичної констатації втрат на дієвий інструмент для економічно обґрунтованого планування, точного прогнозування та оптимізації технологічних процесів у каменеобробній галузі.

Ключові слова: *кількісна оцінка відходів; розпилювання природного каменю; кам'яний шлам; дискові пили; геометричні відходи; обробка каменю; коефіцієнт коригування.*

Актуальність теми. Обробка природного каменю, спрямована на виробництво високоякісної продукції, такої як плити та сляби, нерозривно пов'язана з утворенням значної кількості дрібнодисперсних відходів у вигляді шламу. Дослідження показують, що залежно від товщини різання від 19 до 27 % об'єму цінного кам'яного блоку перетворюється на відходи внаслідок технологічних операцій розпилювання та шліфування. Це призводить до значних прямих втрат дорогоцінної сировини та зниження ефективності виробництва. Водночас практичні спостереження демонструють, що фактична кількість утворених відходів майже завжди перевищує ідеальні розрахункові значення [1]. Таким чином, виникає науково-практична проблема, що полягає у відсутності єдиного підходу до точної кількісної оцінки та аналізу утворення відходів на всіх етапах виробництва для подальшої оптимізації технологічного процесу [2, 3].

Підвищення конкурентоспроможності каменеобробних підприємств вимагає впровадження інструментів для суворого контролю над використанням сировини та зниження собівартості продукції. Точна кількісна оцінка відходів є ключовим елементом такого контролю. Розробка та застосування обґрунтованої методики розрахунку дозволяє не лише точно прогнозувати матеріальні втрати, але й оптимізувати технологічні параметри, зокрема товщину різання для досягнення балансу між продуктивністю та рівнем відходів. Такий підхід своєю чергою дає можливість вдосконалити виробниче планування та калькуляцію витрат, а також виявляти й аналізувати причини перевищення фактичних втрат над теоретичними, вказуючи на можливу неефективність обладнання чи процесів [4].

Актуальність дослідження полягає у необхідності розробки комплексного науково-методичного підходу до кількісної оцінки відходів при розпилюванні природного каменю. Наукова задача полягає в

обґрунтуванні та розробці математичної моделі для розрахунку об'єму шламу, що утворюється під час розпилювання, з урахуванням головних параметрів, таких як розміри блоку, товщина слябів та товщина алмазного інструменту. Невід'ємною частиною завдання є проведення порівняльного аналізу теоретичних розрахунків та емпіричних даних для валідації запропонованих методик та оцінки реальної ефективності виробництва [5].

Отже, розробка наукових засад для комплексної кількісної оцінки відходів каменеобробки є важливим завданням. Його вирішення сприятиме підвищенню ефективності використання природних ресурсів, зниженню втрат сировини та створенню підґрунтя для подальшої оптимізації технологічних процесів у галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Зростання обсягів виробництва в каменеобробній галузі нерозривно пов'язане з утворенням значної кількості дрібнодисперсних відходів [6]. У процесі розпилювання та шліфування природного каменю утворюється пульпа – суміш води та дрібних частинок каменю, яка після обробки в очисних спорудах і зневоднення за допомогою фільтр-пресів перетворюється на шлам з вологістю 22–28 %. Ефективне управління цими відходами вимагає точної кількісної оцінки їх утворення на всіх етапах технологічного процесу, що і є предметом детального аналізу в низці досліджень [7, 9].

У наукових працях було розроблено та обґрунтовано методику розрахунку об'єму відходів, що утворюються на етапі розпилювання кам'яних блоків. Ця методика базується на комплексі формул, які дозволяють визначити об'єм вихідних слябів, кількість втраченого каменю (W) та відсоток відходів ($\%W$) залежно від вхідних параметрів, таких як розміри блоку, товщина слябів (TS) та товщина алмазного сегмента пили (TD). Ключовим висновком цих досліджень є встановлення зворотної залежності між товщиною слябів, що виготовляються, та відсотком відходів. Так під час розпилювання на сляби товщиною 2 см утворюється близько 26–27 % відходів, тоді як при товщині 3 см цей показник знижується до 19–21 %. Аналогічна зворотна залежність існує і між товщиною різання та продуктивністю виробництва [8].

Важливим аспектом, що розглядається в дослідженнях, є порівняння ідеальних розрахункових значень із фактичними результатами, отриманими в умовах реального виробництва. Практика показує, що реальний відсоток відходів майже завжди перевищує ідеальні показники [8]. Наприклад, для слябів товщиною 2 см розрахункове значення відходів становить 26 %, проте на практиці цей показник коливається в межах від 23 до 32 %. Для слябів товщиною 3 см ідеальне значення – 19 %, а фактичний діапазон – від 15 до 29 %. Ця розбіжність підкреслює необхідність мінімізації відходів для наближення до оптимальних розрахункових значень [10].

Аналіз наукових джерел показує, що теоретична база для кількісної оцінки відходів при розпилюванні каменю є добре розробленою. Існуючі праці визначають основні фактори втрат сировини та пропонують відповідні розрахункові формули. Проте часто ці дослідження зосереджені на теоретичних аспектах, тоді як практична кількісна оцінка об'ємів шламу, що утворюється при роботі саме дискових пил у реальних виробничих умовах, потребує додаткової уваги. Відтак існує потреба в дослідженнях, що дозволять отримати точні емпіричні дані та на їх основі валідувати або скоригувати існуючі математичні моделі [11].

Метою статті є кількісна оцінка та аналіз утворення дрібнодисперсних відходів при розпилюванні природного каменю.

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні математичного моделювання та аналізу емпіричних даних для кількісної оцінки утворення дрібнодисперсних відходів при розпилюванні природного каменю.

На першому етапі дослідження фіксувалися вхідні параметри, зокрема об'єми кам'яних блоків до початку обробки, та вихідні дані – об'єми отриманих слябів після завершення операції розпилювання. Дослідження проводилося на прикладі розпилювання блоків на сляби товщиною 20 та 30 мм за допомогою дискового верстата, армованого алмазними сегментами (товщина сегмента – 9 мм).

Для розрахунку було застосовано комплекс математичних формул, що дозволили визначити такі показники:

- обсяг кам'яних блоків, що надходять на розпилювання ($Q_{\text{вх}}$);
- кількість слябів, виготовлених з 1 м³ блоку (N);
- загальну площу виготовлених слябів (A);
- продуктивність процесу (P);
- обсяг виготовлених слябів ($Q_{\text{вих}}$);
- кількість каменю, що перетворився на відходи (W);
- відсоток кам'яних відходів ($\%W$).

Аналітична частина методології містила порівняльний аналіз. Спочатку розрахунки проводилися для ідеального теоретичного випадку (розпилювання блоку об'ємом 1 м³) для отримання еталонних значень. Потім ці ідеальні показники порівнювалися з фактичними результатами, отриманими в умовах реального виробництва, що дозволило виявити розбіжності та встановити, що практичні значення відсотків відходів переважно перевищують ідеальні.

Результати та обговорення. Було проведено дослідження, в якому блоки розпилювалися за допомогою дискового верстата на сляби 20 та 30 мм. Перед розпилюванням записувалися об'єми блоків. Після закінчення операції розпилювання записували об'єми слябів.

У таблиці 1 показано результати розрахунку на основі розпилювання блоку ($L = 1$ м, $Y = 1$ м, $H = 1$ м) на сляби товщиною 20 та 30 мм. Було встановлено, що на кожен м^3 блоків, що йдуть на операцію розпилювання, утворюється 0,34 та 0,25 м^3 відходів у вигляді кам'яного шламу відповідно. Також встановлено, що з кожного 1 м^3 блоку ми отримуємо 33 та 25 м^2 плит товщиною 20 та 30 мм відповідно.

Таблиця 1

Результати теоретичного розрахунку кількості утворених відходів після розпилювання блоків природного каменю

Параметр	Товщина слябів	
	20 мм	30 мм
Обсяг кам'яних блоків, що надходять на розпилювання, $Q_{\text{вх}}, \text{м}^3$	1	1
Кількість слябів, виготовлених з 1 м^3 блоку, N , шт.	33	25
Площа виготовлених плит, $A, \text{м}^2$	33	25
Продуктивність процесу розпилювання, $P, \text{м}^2/\text{м}^3$	33	25
Обсяг виготовлених слябів, $Q_{\text{вих}}, \text{м}^3$	0,66	0,75
Кількість каменю, що перетворився на відходи, $W, \text{м}^3$	0,34	0,25
Відсоток кам'яних відходів, $\%W$	34	25

За результатами проведеного експериментального дослідження було кількісно оцінено вплив товщини слябів природного каменю на обсяг утворення відходів (табл. 2). Аналіз емпіричних даних демонструє чітку залежність між заданою товщиною слябів та ефективністю використання сировини. Встановлено, що при розпилюванні на тонші сляби, зокрема товщиною 20 мм та у комбінації 20 і 30 мм, спостерігається значна втрата матеріалу. З початкових об'ємів 181,11 та 202,99 м^3 відповідно частка відходів у вигляді кам'яного шламу та технологічних втрат досягла 51,41 та 51,95 %, що свідчить про перетворення понад половини цінного каменю на неліквідні продукти.

Натомість при збільшенні товщини слябів до 30 мм було зафіксовано суттєве підвищення коефіцієнта використання матеріалу. При обробці сировинної партії об'ємом 264,76 м^3 практичний відсоток відходів знизився майже вдвічі, склавши 27,71 %. Такий результат вказує на значно вищу раціональність виробничого процесу під час виготовлення товщої продукції, оскільки на одиницю корисного об'єму припадає менша сумарна площа пропилю, що безпосередньо зменшує обсяг каменю, який перетворюється на шлам.

Таким чином, дослідженням підтверджено існування зворотної залежності між товщиною різання та відсотком відходів, що є важливим фактором для оптимізації технологічних процесів у каменюобробній галузі. Водночас встановлено, що існує і зворотна залежність між товщиною різання та продуктивністю, що ставить перед виробництвом задачу знаходження оптимального балансу між економією сировини та швидкістю виконання операцій.

Таблиця 2

Фактичні результати кількості утворених відходів після розпилювання блоків природного каменю

Товщина слябів	$Q_{\text{вх}}, \text{м}^3$	$A, \text{м}^2$	$P, \text{м}^2/\text{м}^3$		$Q_{\text{вих}}, \text{м}^3$	$W, \text{м}^3$	$\%W$	
			ідеальна	практична			ідеальна	практична
2 см	181,11	4400,06	33,00	24,29	88,00	93,11	34,00	51,41
2 і 3 см	202,99	3901,32	29,00	19,22	97,53	105,46	29,50	51,95
3 см	264,76	6379,75	25,00	24,10	191,39	73,37	25,00	27,71
Разом	748,86	14681,13	-	-	376,92	271,94	-	-

У зв'язку з тим, що блоки природного каменю можуть мати неправильну геометричну форму, крім кам'яного шламу, виникають втрати у формі крупних частин природного каменю, що своєю чергою впливає на загальний показник утворених відходів після розпилювання блоків природного каменю. Ці крупноформатні відходи, відомі у виробництві як «обапол», потребують окремого методологічного підходу до їх кількісної оцінки. На відміну від дрібнодисперсного шламу, об'єм якого прямо корелює з

площею пропилю та товщиною різального інструменту, об'єм обабла є функцією вихідної геометрії блоку. Тому для отримання достовірної загальної картини втрат необхідно розробити комплексну методику, що враховує обидві ці складові, дозволяючи диференціювати технологічні та геометричні відходи.

Саме тому було досліджено різні випадки розкрою блоків природного каменю. Зокрема, було проаналізовано відсоток відходів (%W) при змішаному розкрої 29 блоків на сляби товщиною 20 та 30 мм (рис. 1). Як демонструє представлений графік, практичний показник утворення відходів є вкрай нестабільною величиною, що для дослідженої партії коливається в широких межах — від 34 до 54 %. Встановлено, що фактичні втрати сировини для більшості блоків суттєво перевищують ідеальний розрахунковий рівень у 29,5 %. Ця мінливість підкреслює вирішальний вплив індивідуальних характеристик кожного блоку, таких як його геометрія, наявність тріщин та дефектів, на кінцевий показник ефективності розкрою.

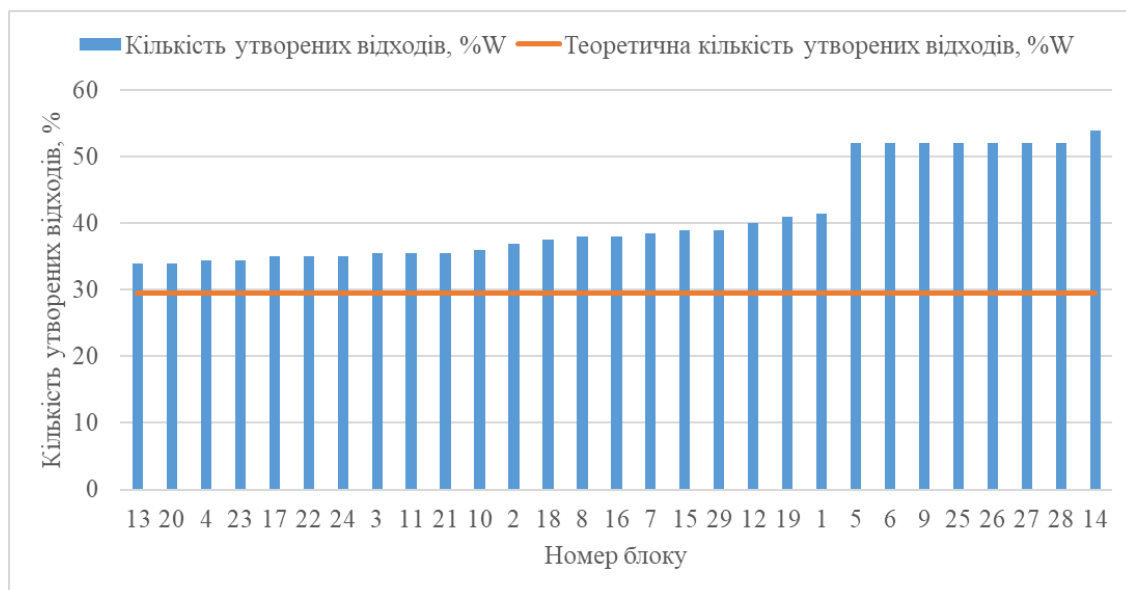


Рис. 1. Діаграма кількості утворених відходів природного каменю

На основі проведеного аналізу теоретичних та емпіричних даних розроблено комплексну методику кількісної оцінки відходів, що утворюються при розпилюванні природного каменю дисковими пилами. Така методика дозволяє перейти від узагальнених розрахунків до диференційованого підходу, що враховує як технологічні, так і геометричні фактори втрат сировини, тим самим підвищуючи точність прогнозування та ефективність виробничого контролю [12].

Першим етапом методики є вхідний контроль сировини, що передбачає визначення двох ключових об'ємних показників для кожного блоку: бруutto-об'єму ($Q_{\text{вх бруutto}}$), розрахованого за максимальними габаритними розмірами, та нетто-об'єму ($Q_{\text{вх нетто}}$), що відповідає об'єму найбільшого вписаного прямокутного паралелепіпеда. Встановлення різниці між цими двома показниками дозволяє заздалегідь кількісно оцінити прогнозовані геометричні відходи ($W_{\text{геом прогноз}}$) у вигляді обабла. Розрахунок проводиться за формулою:

$$W_{\text{геом прогноз}} = Q_{\text{вх бруutto}} - Q_{\text{вх нетто}} \quad (1)$$

Такий підхід забезпечує первинне розмежування втрат ще до початку механічної обробки та створює основу для об'єктивної оцінки якості вихідного матеріалу.

На другому етапі здійснюється теоретичне моделювання технологічних відходів. Базуючись на нетто-об'ємі блоку та заданих технологічних параметрах, зокрема товщині слябів (TS) та товщині алмазного різального інструменту (TD), виконується розрахунок ідеального (теоретичного) об'єму шламу ($W_{\text{теор}}$). Цей розрахунок, що ґрунтується на математичних залежностях, наведених у дослідженні, встановлює еталонне значення втрат, які є неминучим наслідком самого процесу різання. Теоретичний об'єм шламу визначається як різниця між нетто-об'ємом сировини та теоретичним об'ємом готової продукції ($Q_{\text{вих теор}}$):

$$W_{\text{теор}} = Q_{\text{вх нетто}} - Q_{\text{вих теор}} \quad (2)$$

Цей теоретичний показник слугує базою для подальшого порівняльного аналізу та оцінки ефективності виробничого процесу.

Третій етап полягає в емпіричному аналізі за результатами операції розпилювання та складанні фактичного матеріального балансу. Після завершення обробки фіксується фактичний об'єм отриманих слябів ($Q_{\text{вих факт}}$) та вимірюється фактичний об'єм геометричних відходів («обапола») ($W_{\text{геом факт}}$). Сумарний об'єм усіх фактичних відходів ($W_{\text{сумар факт}}$) визначається за формулою матеріального балансу: $W_{\text{сумар факт}} = Q_{\text{вх бруто}} - Q_{\text{вих факт}}$ шляхом віднімання об'єму обапола від сумарних відходів точно встановлюється фактичний об'єм утвореного технологічного шламу ($W_{\text{шлам факт}}$), що дозволяє чітко диференціювати втрати, пов'язані з геометрією сировини, від втрат, зумовлених безпосередньо процесом різання:

$$W_{\text{шлам факт}} = W_{\text{сумар факт}} - W_{\text{геом факт}}. \quad (3)$$

Завершальний, четвертий етап методики передбачає розрахунок емпіричного коефіцієнта коригування та побудову вдосконаленої прогностичної моделі. Шляхом порівняння фактичного об'єму шламу з теоретично розрахованим виводиться коефіцієнт коригування (К), який інтегрує в собі вплив неідеальних факторів реального виробництва (вібрації, знос інструменту тощо), що підтверджено розбіжностями у дослідженні. Коефіцієнт розраховується як: $K = W_{\text{шлам факт}} / W_{\text{теор}}$. Накопичення статистичних даних по коефіцієнту К дозволяє створити вдосконалену модель для прогнозування загальних відходів ($W_{\text{прогноз}}$) для майбутніх партій. Прогноз розраховується як сума попередньо оцінених геометричних відходів та теоретичного об'єму шламу, помноженого на емпірично встановлений коефіцієнт коригування:

$$W_{\text{прогноз}} = W_{\text{геом прогноз}} + (W_{\text{теор}} \times K). \quad (4)$$

Таким чином, дана методика перетворюється на дієвий інструмент для економічно обґрунтованого планування та оптимізації виробничого процесу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження кількісно оцінює утворення відходів під час розпилювання природного каменю, встановлюючи значну розбіжність між теоретичними моделями та практичними результатами. Підтверджено зворотну залежність між товщиною слябів та відсотком відходів: теоретично, при переході з 20 на 30 мм товщини втрати знижуються з 34 до 25 %. Однак емпіричні дані показують, що практичні втрати є значно вищими і становлять 51,41 та 27,71 % відповідно. Причиною такої різниці є існування двох типів відходів: технологічного шламу від процесу різання та геометричних відходів («обапола»), що виникають через неправильну форму блоків. Висока варіативність фактичних втрат для окремих блоків (від 34 до 54 %) доводить, що саме індивідуальна геометрія сировини є вирішальним фактором ефективності виробництва.

Головним підсумком роботи є розроблена комплексна методика для точної кількісної оцінки відходів. Вона переходить від спрощених розрахунків до диференційованого підходу, що розмежовує геометричні та технологічні втрати. Методика передбачає визначення нетто- та бруто-об'ємів сировини, емпіричний аналіз фактичних виходів та розрахунок коефіцієнта коригування (К). Цей коефіцієнт інтегрує вплив реальних виробничих факторів, перетворюючи статичну оцінку на динамічний інструмент для економічно обґрунтованого планування та оптимізації технологічних процесів.

Список використаної літератури:

1. *Strzalkowski P.* Characteristics of Waste Generated in Dimension Stone Processing / *P.Strzalkowski* // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 21. DOI: 10.3390/en14217232.
2. *Managing Marble Quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy Implementation* / *A.Tazzini and other* // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, № 7. DOI: 10.3390/su16073056.
3. *Experimental investigation of cutting performance for circular saw blade body modification by resin layers toward green manufacturing* / *J.Kang and other* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-11979-w.
4. *Ihnatiuk R.* Comparative analysis of energy and resource efficiency in primary cutting of natural stone for waste minimization // *R.Ihnatiuk, Y.Podchashynskyi, R.Merynov* // *Collection of Research Papers of the National Mining University*. – 2025. – № 80. – P. 64–73. DOI: 10.33271/crpnmu/80.064.
5. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі України / *В.І. Шамрай та ін.* // *Технічна інженерія*. – 2022. – № 2 (90). – С. 193–199. DOI: 10.26642/ten-2022-2(90)-193-199.
6. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону / *В.І. Шамрай та ін.* // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 1 (91). – С. 385–397. DOI: 10.26642/ten-2023-1(91)-385-397.
7. *Assessment of the impact of the mining industry on the environment: the waste management system* / *V.Melnyk-Shamrai and other* // *Ecological Sciences*. – 2024. – № 4 (55). – P. 164–168. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.26.
8. *Іськов С.С.* Дослідження зміни кількості відходів каменю при алмазно-дисковому розпилюванні блоків // *С.С. Іськов, Р.В. Соболевський* // *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. – 2018. – № 1 (81). – С. 251–256. DOI: 10.26642/tn-2018-1(81)-251-256.
9. Дослідження рівня шумового навантаження під час різання природного каменю дисковим алмазним інструментом / *С.С. Іськов та ін.* // *Технічна інженерія*. – 2024. – № 1 (93). – С. 339–347. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-339-347.

10. Technological processes of stone sawing: analysis of energy efficiency and production costs / I.Leonets and other // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2025. DOI: 10.1088/1755-1315/1491/1/012033.
11. Akpınar S. Valorization of natural stone sawing waste as a functional additive in ceramic tile production // S.Akpınar, S.T. Anlı // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2023. DOI: 10.1007/s10163-023-01813-6.
12. Wear characteristics of diamond segments on multi-blade combination saw with different diameters in granite sawing / J.Zhou and other // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 97. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105517.

References:

1. Strzałkowski, P. (2021), «Characteristics of Waste Generated in Dimension Stone Processing», *Energies*, Vol. 14, No. 21, doi: 10.3390/en14217232.
2. Tazzini, A. et al. (2024), «Managing Marble Quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy Implementation», *Sustainability*, Vol. 16, No. 7, doi: 10.3390/su16073056.
3. Kang, J. et al. (2023), «Experimental investigation of cutting performance for circular saw blade body modification by resin layers toward green manufacturing», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-023-11979-w.
4. Ihnatiuk, R., Podchashynskyi, Y. and Merynov, R. (2025), «Comparative analysis of energy and resource efficiency in primary cutting of natural stone for waste minimization», *Collection of Research Papers of the National Mining University*, No. 80, pp. 64–73, doi: 10.33271/crpnmu/80.064.
5. Shamrai, V.I. et al. (2022), «Analiz suchasnoho stanu kamenedobuvnoi ta kameneobrobnoi haluzi Ukrainy», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (90), pp. 193–199, doi: 10.26642/ten-2022-2(90)-193-199.
6. Shamrai, V.I. et al. (2023), «Doslidzhennia yakisnykh vlastyvostei vidkhodiv kamenevydobuvannia ta kameneobrobky z metoiu yikh vykorystannia yak syrovyny dlia vyhotovlennia heopolimernoho betonu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 385–397, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-385-397.
7. Melnyk-Shamrai, V. et al. (2024), «Assessment of the impact of the mining industry on the environment: the waste management system», *Ecological Sciences*, No. 4 (55), pp. 164–168, doi: 10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.26.
8. Iskov, S.S. and Sobolevskyi, R.V. (2018), «Doslidzhennia zminy kilkosti vidkhodiv kameniu pry almazno-dyskovomu rozpyliuvanni blokiv», *Visnyk ZhDTU. Ser. «Tekhnichni nauky»*, No. 1 (81), pp. 251–256, doi: 10.26642/tn-2018-1(81)-251-256.
9. Iskov, S.S. et al. (2024), «Doslidzhennia rivnia shumovoho navantazhennia pid chas rizannia pryrodnoho kameniu dyskovym almaznym instrumentom», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 339–347, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-339-347.
10. Leonets, I. et al. (2025), «Technological processes of stone sawing: analysis of energy efficiency and production costs», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, doi: 10.1088/1755-1315/1491/1/012033.
11. Akpınar, S. and Anlı, S.T. (2023), «Valorization of natural stone sawing waste as a functional additive in ceramic tile production», *Journal of Material Cycles and Waste Management*, doi: 10.1007/s10163-023-01813-6.
12. Zhou, J. et al. (2021), «Wear characteristics of diamond segments on multi-blade combination saw with different diameters in granite sawing», *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 97, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105517.

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;
- раціональне природокористування.

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.

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;

- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
 - метрологія, засоби вимірювання;
 - системний аналіз складних технічних систем.
- E-mail: jup@ztu.edu.ua.

Наумов Ярослав Олегович – асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0004-3777-7814>.

Наукові інтереси:

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

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

Меринів Роман Романович – асистент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0006-1869-6650>.

Наукові інтереси:

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

E-mail: phd184232_mrr@student.ztu.edu.ua.

Shamrai V.I., Melnyk-Shamrai V.V., Podchashynskyi Yu.O., Naumov Ya.O., Merynov R.R.

Quantitative assessment of waste during the sawing of natural stone with circular saws

The article presents a comprehensive quantitative assessment of waste generation during the sawing of natural stone blocks with circular saws, which is a critical issue for the stone processing industry. The research addresses the scientific and practical problem of the significant discrepancy between theoretical calculations and the actual volumes of raw material losses in production. This discrepancy not only leads to direct economic losses due to the loss of valuable material but also complicates production planning and product cost calculation.

The study confirms the inverse relationship between slab thickness and the percentage of waste. The practical loss indicators, obtained during the experiment, significantly exceed the ideal calculated values. For example, when sawing 20 mm thick slabs, the actual losses reach 51,41 %, whereas the theoretical calculation predicts only 34 %. It was established that the key reason for this difference is the dual nature of the waste: in addition to technological sludge, which is an inevitable consequence of the cutting tool's operation, geometric waste («offcuts») is generated due to the irregular shape of the raw blocks. An analysis of 29 individual blocks showed that the high variability of actual losses (from 34 to 54 %) is predominantly caused by the individual geometry of each block, which makes generalized calculations insufficiently accurate for practical application.

The main result of the work is a developed four-stage methodology for the quantitative assessment of waste, which overcomes the limitations of existing approaches. It includes input control with the determination of net and gross volumes for the preliminary assessment of geometric losses; theoretical modeling to calculate the ideal sludge volume; empirical analysis to compile an actual material balance after sawing; and the introduction of an empirical correction coefficient (K). This coefficient accounts for the non-idealities of the real production process (vibrations, tool wear, etc.) and allows for the creation of an improved predictive model. Thus, the proposed methodology transforms the assessment of waste from a static statement of losses into an effective tool for economically sound planning, accurate forecasting, and optimization of technological processes in the stone processing industry.

Keywords: quantitative assessment of waste; natural stone sawing; stone sludge; circular saws; geometric waste; stone processing; correction coefficient.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2025.