

О.О. Анісімов, д.т.н., проф.

П.Б. Саїк, к.т.н., доц.

О.В. Черняєв, к.т.н., с.н.с.

В.Г. Лозинський, к.т.н., доц.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Дослідження енергетичних показників у процесах переробки нерудної сировини

Гірничі підприємства з видобутку і переробки нерудної сировини є досить енергоємними. Використання енергетичного методу дозволяє кількісно врахувати багато факторів, зокрема, ведення гірничих робіт з наступним процесом переробки нерудних корисних копалин. Одним з можливих способів оцінки гірничо-транспортного комплексу та обладнання, що використовуються в процесі переробки будівельної нерудної сировини, може бути метод, що передбачає визначення показника технологічного енергопоглинання. У цьому зв'язку виникає актуальність встановлення енергетичних показників у процесах переробки нерудної сировини на гірничих підприємствах України, і визначення розподілу цієї енергії в технологічних схемах переробки для виробництва необхідних будівельних матеріалів. Як основні будівельні сировини розглянуто кварцити, граніти і діорити, мігматити, плагіограніти, а також осадові породи – вапняки, що є найбільш поширеними у центральній, південній та східній частині країни.

Під час досліджень застосовано аналітичні, статистичні методи обробки результатів, аналіз показників енергопоглинання в процесах переробки корисної копалини, а саме дроблення, транспортування і грохочення. Для досліджень обрано родовища в межах Дніпропетровської, Запорізької, Донецької, Одеської та Полтавської областей. Для встановлення технологічного енергопоглинання в процесах дроблення гірничої маси застосовано показники межі міцності середовища на стиск, які значною мірою впливають на комплекс обладнання і розподіл енергетичних показників. Порівняння показників енергопоглинання за процесами дозволило встановити, що процес грохочення на всіх підприємствах, порівняно з іншими процесами, майже не впливає на енергопоглинання, а найбільші значення відповідають процесу дроблення.

Ключові слова: нерудна сировина; енергопоглинання; переробка гірських порід; міцність середовища на стиск; родовища; корисна копалина.

Актуальність теми. Враховуючи воєнний стан і нестабільність економіки України, а також руйнування інфраструктури, необхідно зауважити, що країна має і продовжує програму підтримки і розвитку мінерально-сировинної бази [1]. Відбудова та подальший розвиток країни неможливий без розвитку будівельної галузі і забезпечення її відповідними природними ресурсами. Україна має значні запаси нерудної сировини, яка у більшості випадків видобувається відкритим способом [2]. Основні запаси представлені: гранітами та плагіогранітами, базальтами, андезітами, доломітами, вапняками, пісками різної якості, глинами та іншими корисними копалинами. Будівельна галузь у повному обсязі забезпечується сировиною, що видобувається в межах держави. Якість нерудної сировини відповідає усім вимогам, а кількість дозволяє розвивати будівельну галузь. Енергія є невід'ємною складовою будь-якого сучасного виробництва, де задіяна велика і потужна техніка. Розвиток і технічні революції призвели до збільшення використання людством основних природних запасів, зокрема й енергії. Гірничодобувні підприємства з відкритої розробки родовищ також розвивались і змінювались. Цей розвиток насамперед пов'язаний зі зміною комплексу обладнання, яке є енергоємним. Усі процеси під час видобутку та переробки корисної копалини можна оцінити енергетичними показниками: енергія, що витрачається на буріння; енергія вибуху; розподілення енергії виймально-навантажувальних машин (виймання порід з вибою, переміщення до транспорту, розвантаження, переміщення самої машини); енергія, що витрачена на доставку; енергія, що потрібна для переробки (подрібнення, транспортування, грохочення, зневоднення, опалення та інше залежно від технологічної схеми).

В Україні майже дві з половиною сотні родовищ, які призначені для видобутку та переробки будівельної сировини [3]. Основні мають магматичне, метаморфічне та осадове утворення і приурочені до Українського кристалічного щита. Більшість з них використовують для виготовлення щебню, піску, цементу, гіпсу та каменю. Родовища відрізняються за своїм генезисом, формою, якісними показниками корисної копалини. У процесі проектування гірничих підприємств формується комплекс з переробки, який залежить від типу порід (міцність, щільність, вологість гірської маси), способу переміщення породи від одного технологічного процесу до іншого з впливом навколишнього середовища, виникаючих сил інерції та опору середовища. У зв'язку з цим постає актуальність дослідження щодо застосування енергетичних показників у процесах переробки нерудної сировини. Енергетичні показники дозволяють

враховувати різні складові при видобуванні та переробці нерудної будівельної сировини. В роботі розглянуто основні процеси переробки скельних і напівскельних порід, а також розподіл енергетичних показників залежно від типу порід і процесів переробки

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Роботи, присвячені розвитку гірничих робіт при видобутку і наступній переробці корисної копалини, представлені в дослідженнях [4–6]. Енергетичні витрати та оцінка ефективності видобутку і переробки природної сировини з урахуванням економічних показників наведено в роботах [7, 8]. Вилучення порід і переміщення їх конвеєрним транспортом, а також можливість використання комбінованого способу для переміщення автомобільно-конвеєрним транспортом розглянуто в [9–11] для нерудних родовищ з видобутку будівельної сировини.

Дослідження енергетичних показників, що витрачається на навантаження порід і можливість відпрацювання твердих будівельних матеріалів, наведено у роботах [12, 13]. Можливості використання енергетичних показників у процесах видобутку, переміщення та подальшої переробки приділена увага в [14–16]. У цих роботах дано опис енергетичного методу для вибору комплексної механізації в процесах для різних систем розробки, а також для всіх процесів отримання готової продукції з нерудної і рудної сировини. В монографії [3] зазначено, що для визначення застосування поверхневого складського комплексу для нерудних родовищ бажано застосовувати як критерій оцінки питомо енергоємність, що має розмірність кВт·год/м³. Зазначений критерій знаходиться як сума витрат енергії на виконання усіх процесів та операцій, які пов'язані з перевантаженням готової продукції.

Використання енергетичного методу під час визначення засобів комплексної механізації, а також технологічних процесів набуває більшого сенсу. Енергетичний метод дає змогу кількісно врахувати багато факторів і умови ведення робіт (для гірничої справи можна враховувати географічне положення підприємства, кліматичні умови, фізико-механічні властивості гірських порід і умови розміщення масиву, вплив гідрогеологічних умов), схеми розвитку гірничих робіт, параметри гірничо-транспортного комплексу та обладнання, що використовується, особливості технологічних схем переробки та визначення ефективності процесів з видобутку та переробки нерудної сировини для конкретних родовищ. Загальна сутність енергетичного методу полягає в тому, що для виконання усіх процесів від видобутку до переробки сировини необхідно витратити певну кількість енергії. Ця енергія витрачається на дроблення масиву при бурових роботах і подрібненні при підричних, виймально-навантажувальних роботах з наступним транспортуванням, переробкою в кар'єрі або на поверхні для одержання необхідних розмірів будівельної сировини за крупністю, що містить процеси дроблення породи, її переміщення й грохочення з наступним укладанням у склади.

Під час проведення операцій на гірничому підприємстві енергія машин витрачається на здолаття опору робочих органів, що торкаються до сировини та здійснення роботи, пов'язаної з усіма процесами і витратою енергії для отримання готової товарної продукції. На витрати енергії впливають технологічні процеси, властивості гірської породи, її стан та якість до моменту впливу і в процесі впливу. На енергетичні показники впливає навколишнє середовище. Наприклад, в процесі переміщення при зниженні температури опір руху роликів та стрічки на конвеєрному стані збільшується, а відповідно збільшуються і енерговитрати. Те саме стосується процесів виймання і навантаження, дроблення та інших.

Готова продукція та сировина можуть набувати низку властивостей і якостей, які безпосередньо залежать від прийнятих на різних етапах технологічних рішень. Ці рішення, що стосуються попередніх процесів технологічної схеми переробки нерудної сировини, відіграють ключову роль у формуванні кінцевих характеристик продукту. Зокрема, такі аспекти як спосіб подрібнення сировини, умови зберігання та транспортування на різних стадіях впливають на якісні показники готової продукції. Кожен етап виробничого процесу тісно пов'язаний з попереднім, що створює своєрідний ланцюжок взаємозалежних дій, які визначають якісні характеристики товарного продукту. Наприклад, раціональний вибір способу видобутку сировини дозволяє не лише оптимізувати подальші процеси переробки, але й закласти основи для досягнення високих стандартів якості продукції.

Під час переробки нерудної сировини на енергопоглинання впливають різні чинники, зокрема, вид корисної копалини, її фізичний стан та кінцевий продукт, який потрібно отримати. Енергетичні витрати на такому етапі, як подрібнення, можуть змінюватися залежно від того, наскільки тверда або крихка сировина, та якого розміру і якості продукт необхідно отримати. Наприклад, у випадку переробки корисної копалини для отримання щелебно різних фракцій витрати енергії значною мірою залежать від твердості вихідної породи. Твердіші матеріали, такі як граніт чи базальт, потребують більше енергії на дроблення, ніж такі як вапняк. Процес подрібнення також варіюється залежно від бажаного розміру частинок, адже для отримання дрібних фракцій необхідно здійснити більше циклів дроблення та використовувати додаткове обладнання, що призводить до зростання енергоспоживання.

Крім того, стан корисної копалини, як-от наявність вологи чи домішок, може ускладнювати процес переробки, підвищуючи вимоги до енерговитрат. Волога порода потребує більшого споживання енергії для її висушування перед подрібненням або для запобігання забивання обладнання.

На кожному етапі, від початкової підготовки до кінцевої обробки продукту, можливі технологічні рішення, що можуть оптимізувати енергопоглинання. Наприклад, використання сучасних систем дроблення з високою ефективністю або комбінування процесів дроблення і сортування дозволяють знизити загальні витрати енергії. Таким чином, вид корисної копалини, її стан і необхідний результат у вигляді кінцевого продукту безпосередньо впливають на загальне енергопоглинання в процесі переробки нерудної сировини. Як приклад, можна розглянути переробку корисної копалини та отримання готового продукту у вигляді щебеню різних фракцій.

Під терміном «енергопоглинання» необхідно розуміти ту частину енергії, яка витрачається на виконання гірничих робіт і спрямовується на зміну фізичного стану гірської породи. Іншими словами, це та енергія, що поглинається самою породою під час технологічних процесів. Вона відрізняється від фактичної витрати енергії, яка вимірюється загальним споживанням обладнання з врахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) машин. Це поняття дозволяє виокремити енерговитрати, які йдуть безпосередньо на подолання опору породи під час її руйнування чи подрібнення, від загальних витрат енергії, що виникають через неефективність роботи механізмів. Отже, енергопоглинання є важливим показником у гірничодобувній галузі, оскільки дозволяє точно оцінити, скільки енергії йде на безпосередню обробку сировини, а скільки втрачається через технічні фактори. Такий аналіз допомагає оптимізувати технологічні процеси, знижуючи втрати енергії та підвищуючи ефективність виробництва.

У процесі отримання щебеню гірнична маса, що транспортується із вибою, розвантажується в приймальний бункер дробарно-сортувального комплексу, має крупність d_{cp} і проходить всі стадії дроблення від великого до дрібного, і в результаті просіювання отримується готовий продукт – щебінь різної фракції d . Крім дроблення, гірнична маса, що надходить, може піддаватись іншим процесам: промивання, переміщення – з використанням в більшості випадків конвеєрного транспорту.

У процесі дроблення породи в дробарках енергопоглинання визначається за формулою [14–16]:

$$E_{op} = \frac{\sigma_{cm}^2}{2E} \lg \frac{d_{cp}}{d}, \text{ Дж/кг}$$

де σ_{cm} – межа міцності середовища на стиск, Па; E – модуль пружності, Па; d_{cp} – середній діаметр шматка корисної копалини, що надходить на дроблення, мм (за розрахунками в кар'єрі він має дорівнювати $d_{cp} = B/6,5$; B – ширина ковша екскаваторної машини, мм); d – діаметр шматка після дроблення в дробарці, мм.

Енергопоглинання активного грохочення пов'язане з подоланням сил інерції спокою та опору переміщенню гірничої маси по грохоту:

$$E_{gp} = \frac{v_{gp}^2}{2g} + F_{gp} l, \text{ Дж/кг}$$

де v_{gp} – швидкість переміщення гірничої маси по грохоту, м/с; F_{gp} – опір переміщенню гірничої маси по грохоту; l – довжина грохоту, м.

Енергопоглинання в процесі переміщення між окремими операціями переробки залежить від опору конвеєра:

$$E_n = \frac{v^2}{2g} + \omega_o l_{\phi} + H, \text{ Дж/кг}$$

де v – швидкість руху конвеєра (0,8–3,15 м/с); ω_o – основний опір руху; l_{ϕ} – сумарна довжина переміщення конвеєрним транспортом на фабриці, м; H – сумарна висота підйому корисної копалини в процесі переміщення на фабриці, м.

Метою статті є аналіз показника енергопоглинання в процесах переробки нерудних корисних копалин та встановлення відсоткового впливу цих процесів під час отримання на підприємствах України готової нерудної будівельної сировини з урахуванням межі міцності середовища на стиск.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі **завдання**:

1. Виконати дослідження межі міцності середовища на стиск для родовищ з видобутку нерудної будівельної сировини в межах України;

2. На основі досліджень зробити аналіз показників енергопоглинання в процесах переробки та отримання готової продукції;

3. На основі отриманих даних енергопоглинання встановити відсоткові показники окремих процесів переробки нерудної будівельної сировини та їх вплив при отриманні готової продукції.

Викладення основного матеріалу. Основною характеристикою, що впливає на енергетичні витрати, є міцність корисної копалини, яка на різних ділянках одного родовища може змінюватися в досить широких діапазонах. Межа міцності середовища на стиск σ_{cm} (Па) має певний діапазон і відрізняється згідно з випробуваннями для сухих та вологих умов (при зволоженні матеріалу цей показник знижується). Треба зазначити, що під час дослідження міцнісних характеристик нерудної сировини встановлено, що межа міцності на стиск для кварцитів становить 593,4–1104 кг/см², гранітів та діоритів –

від 674 до 1801 кг/см², мігматитів від 798 до 1938 кг/см², плагіогранітів – від 1900 до 2272 кг/см². Як видно, всі ці будівельні матеріали мають значний проміжок. Розглядалися виключно сухі зразки. При зволоженні породи показники міцності на стиск знижуються на 10–20 %. Наприклад, мігматити Одарівського родовища, які розглядалися, мають серед вивчених порід показники межі міцності на стиск у сухому стані 798–1938 кг/см², у зволоженому стані становлять 607–1364 кг/см².

Встановлення енергетичних витрат для підприємств полягає у визначенні енергопоглинання в процесі переробки твердих нерудних копалин. Основні характеристики сировини, що підлягає переробці для різних родовищ, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості твердих нерудних корисних копалин

| Родовище (область) | Корисна копалина | Межа міцності середовища на стиск, σ_{cm} , кг/см ² | Модуль пружності, E , 10^{10} Па | Щільність породи, ρ , кг/м ³ |
|--|--------------------|---|--------------------------------------|--|
| Васильківське родовище (Дніпропетровська обл.) | Кварцити | 593–1104 | 6,7 | 2640 |
| Анадольське родовище (Донецька обл.) | Граніти та діорити | 1289–2080 | 6,6 | 2880 |
| Одарівське родовище (Запорізька обл.) | Мігматити | 798–1938 | 6,65 | 2720 |
| Вільшанське родовище (Одеська обл.) | Граніти та діорити | 1400–1600 | 6,5 | 2690 |
| Любимівське родовище (Дніпропетровська обл.) | Граніт | 674–1801 | 6,6 | 2700 |
| Рибальське родовище (Дніпропетровська обл.) | Мігматити | 1564–2850 | 6,7 | 2680 |

Мігматити Рибальського родовища у зв'язку з їх високою міцністю мають значний попит і можуть бути застосовані в різних напрямках будівництва. Наближеність цього родовища до Донецької і Луганської області дозволяє в подальшому використовувати цю сировину для будівництва та відновлення цивільних і промислових об'єктів у зазначених областях. Аналогічні показники мають Анадольське родовище гранітів та діоритів (Донецька обл.), Одарівське родовище мігматитів (Запорізька обл.). У процесі транспортування та грохочення показник межі міцності фактично відсутній, тож основний процес, де витрачається найбільша кількість енергії і енергопоглинання, пов'язаний з дробленням. Саме під час дроблення відбувається процес поглинання енергії, яка передається від робочого органу до сировини. Чим міцніша порода, тим більше треба прикласти зусиль для її подрібнення і використати більше енергії. Відповідно було визначено межі міцності і динаміку коливаний енергопоглинання в процесі подрібнення нерудної сировини. Основні характеристики отриманих даних наведено на рисунку 1.

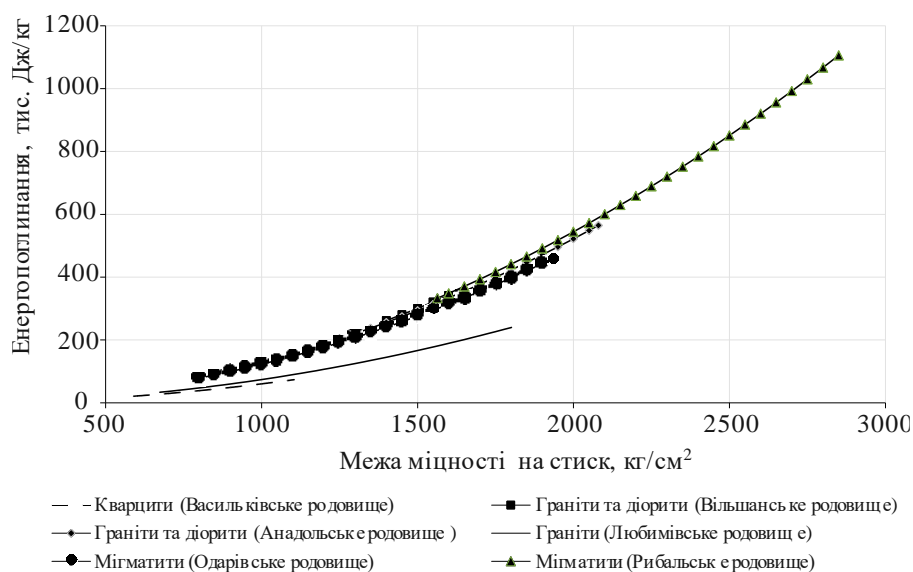


Рис. 1. Динаміка зміни показників енергопоглинання в процесі дроблення залежно від типу корисної копалини та межі міцності на стиск

Аналіз даних рисунка 1 вказує, що найбільші показники енергопоглинання спостерігаються у мігматитах Рибальського родовища, тоді як найнижчі – у кварцитах Васильківського родовища. Інтервал міцності порід на стиск при доопрацюванні коливається в межах від 593 до 2850 кг/см², а показники енергопоглинання варіюються від 21,01 до 1105,9 тис. Дж/кг. Ці значення свідчать про значну різницю в фізико-механічних властивостях гірських порід, що впливає на технологічні параметри їх обробки. Мігматити, що характеризуються вищою енергомісткістю, потребують більше енергії на дроблення та інші технологічні операції, тоді як кварцити, з нижчими показниками міцності, є менш енергоємними при доопрацюванні. Для підвищення ефективності обробки таких матеріалів важливо не лише вибирати відповідні технології для кожного типу порід, але й оптимізувати параметри роботи обладнання. Це може знизити загальні витрати енергії, що особливо актуально в умовах підвищених вимог до енергоефективності.

Відповідно до наведених даних на рисунку 1 в подальшому показники енергопоглинання при дробленні можна визначити за такими залежностями:

- для **кварцитів** Васильківського родовища з міцністю на стиск 593–1104 кг/см²:

$$E_{др} = 0,0603\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг}$$

де $\sigma_{ст}$ – межа міцності середовища на стиск, кг/см²;

- для **гранітів та діоритів** Анадольського родовища з міцністю на стиск 1289–2080 кг/см²:

$$E_{др} = 0,1336\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг};$$

- для **мігматитів** Одарівського родовища з міцністю на стиск 798–1938 кг/см²:

$$E_{др} = 0,1227\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг};$$

- для **гранітів та діоритів** Вільшанського родовища з міцністю на стиск 1289–2080 кг/см²:

$$E_{др} = 0,1305\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг};$$

- для **гранітів** Любимівського родовища з міцністю на стиск 1289–2080 кг/см²:

$$E_{др} = 0,074\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг};$$

- для **мігматитів** Рибальського родовища з міцністю на стиск 1400 – 1600 кг/см²:

$$E_{др} = 0,1362\sigma_{ст}^2, \text{ Дж/кг}.$$

Як видно з досліджень, зміна типу нерудної корисної копалини та її показників міцності на стиск веде до коливань енергопоглинання і відповідно до збільшення або зменшення енергетичних показників. Кварцити для переробки вимагають найменші значення енергетичних потреб $E_{др} = 21,01$ тис. Дж/кг, а мігматити найбільші – $E_{др} = 1105,91$ тис. Дж/кг. Якщо ж розглядати осадові породи, то вапняк, який може бути застосований як нерудна мінеральна сировина, має ще нижчі показники енергопоглинання і вимагає при переробці менших енергетичних витрат, а саме при дробленні $E_{др} = 2,409$ тис. Дж/кг.

Визначення даних щодо енергопоглинання на різних етапах технологічних процесів дозволяє провести детальний аналіз і визначити найбільш енергоємні технології. Зокрема, такий аналіз відкриває можливості для оптимізації виробництва та зниження енерговитрат. У таблиці 2 наведено дані щодо ключових процесів, що потребують значних обсягів енергії: дроблення, грохочення та транспортування.

Таблиця 2

Дані щодо показників енергопоглинання під час переробки корисних копалин

| Родовище (область) | Корисна копалина | Дроблення, Дж/кг | Грохочення, Дж/кг | Транспортування, Дж/кг |
|--|--------------------|------------------|-------------------|------------------------|
| Васильківське родовище (Дніпропетровська обл.) | Кварцити | 73545,94 | 16,34 | 3054,2 |
| Анадольське родовище (Донецька обл. під окупацією) | Граніти та діорити | 336696,19 | 27,11 | 1100,5 |
| Одарівське родовище (Запорізька обл.) | Мігматити | 204131,49 | 31,82 | 7984,2 |
| Вільшанське родовище (Одеська обл.) | Граніти та діорити | 342051,38 | 33,71 | 14922,9 |
| Любимівське родовище (Дніпропетровська обл.) | Граніти | 239916,20 | 26,53 | 10456,2 |
| Рибальське родовище (Дніпропетровська обл.) | Мігматити | 1040930,23 | 32,54 | 5035,2 |

Дослідження та порівняння енергопоглинання на різних етапах виробництва, зокрема на стадіях дроблення, дозволяє не лише виявити «вузькі місця», де енергоспоживання перевищує допустимі межі,

але й пропонує шляхи оптимізації, такі як впровадження енергоефективного обладнання або перегляд технологічних схем. На рисунку 2 представлено дані, які відображають відсотковий розподіл енергопоглинання за різними стадіями виробничого процесу: дроблення, грохочення і транспортування сировини. Ці дані дозволяють чітко візуалізувати, які етапи технологічного циклу є найбільш енергоємними та потребують оптимізації для зниження загальних витрат на енергію.

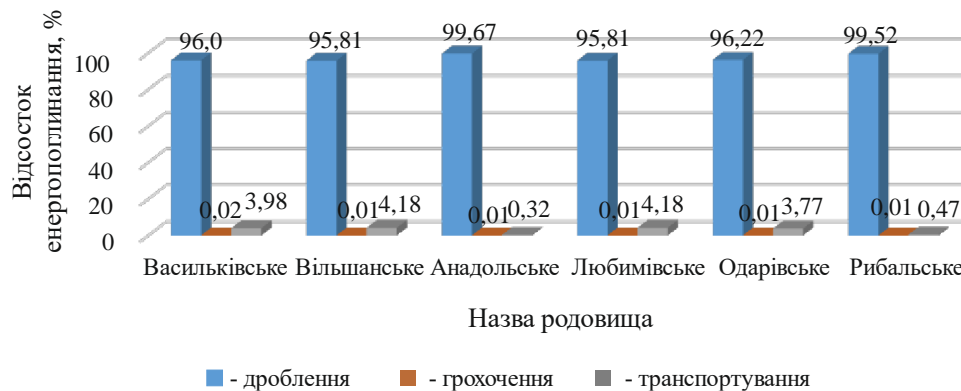


Рис. 2. Дані щодо відсоткового значення енергопоглинання за стадіями виробничого процесу: дроблення, грохочення та транспортування

Аналіз даних, наведених на рисунку 2, підтверджує, що процес дроблення є основним споживачем енергії на всіх етапах обробки сировини для зазначених родовищ. Відсоткове значення енергопоглинання на цьому етапі варіюється в межах від 95,81 до 99,52 % від загальних витрат, що свідчить про його значну енергоємність. Така висока енерговитратність спонукає підприємства постійно шукати нові рішення для підвищення ефективності процесу. Тому сучасні підприємства все частіше звертаються до впровадження інноваційних технологій, спрямованих на оптимізацію процесів дроблення.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Встановлена динаміка коливання енергетичних витрат для підприємств з видобутку нерудної сировини показує, що фізико-механічні характеристики породи, що видобувається, значно впливають на виробничі потужності гірничого підприємства. До найбільш енерговитратних порід належать мігматити та кварцити (магматичного і метаморфічного генезису), до менш енерговитратних – вапняки, гіпси, крейда (осадового генезису).

Дослідження процесів дроблення, грохочення та транспортування на більшості підприємствах, що видобувають і переробляють нерудну сировину, вказують, що енергопоглинання цих процесів напряму пов'язане з міцністю порід, що видобувають. Так під час видобутку і переробки нерудної мінеральної сировини на Рибальському кар'єрі, що має найбільші показники межі міцності середовища на стиск, основні витрати енергії йдуть на дроблення порід, це майже 100 %. У той же час на багатьох підприємствах, що видобувають граніти, діорити, плагіограніти від 2 до 4 % енергопоглинання припадає на транспортування в межах переробного комплексу. Необхідно зазначити, що процес грохочення на всіх підприємствах показав, що порівняно з іншими процесами він майже не впливає на енергопоглинання. В середньому на підприємствах з видобутку і переробки нерудної будівельної сировини показники енергопоглинання на транспортування становлять 4 %, а на дроблення порід – 96 %.

Вдячність. Дослідження виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2022.01/0107 «Розробка ресурсозберігаючих технологій видобутку та переробки нерудної мінеральної сировини у воєнний та післявоєнний періоди») в межах конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Список використаної літератури:

1. Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року / Верховна Рада України. – 2011. – № 44 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text>.
2. Розподіл підприємств нерудної сировини з урахуванням відновлення інфраструктури за регіонами України / О.О. Анісімов, П.Б. Сайк, О.В. Черняєв, В.Г. Лозинський // Технічна інженерія. – 2023. – № 2 (92). – С. 207–216. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-207-216.
3. Технологія екологічнобезпечної відкритої розробки нерудних родовищ твердих корисних копалин : монографія / В.І. Симоненко, А.В. Павличенко, О.О. Анісімов та ін. – Дніпро : Журфонд, 2022. – 365 с.
4. Sobko B. Investigation of the influence of flooded bench hydraulic mining parameters on sludge pond formation in the pit residual space / B.Sobko, O.Lożhnikov, C.Drebenshtedt // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 168. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800037.

5. Substantiating rational schedule to load trucks using draglines while mining a pit of Motronivskiy MPP / B.Sobko, O.Lozhnikov, M.Chebanov, V.Kardash // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 4. – P. 23–28. DOI: 10.33271/nvngu/2021-4/023.
6. Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. This link is disabled / P.Saik, O.Cherniaiev, O.Anisimov and other // *Mining of Mineral Deposits*. – 2023. – № 17 (4). – P. 91–102. DOI: 10.33271/mining17.04.
7. Improvement of open cleaning-up schemes of border mineral reserves / S.Moldabayev, A.Adamchuk, N.Sarybayev, A.Shustov // *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Science and Technologies in Geology, Exploration And Mining*. – 2019. – Vol. 19. – P. 331–338. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3/S03.042.
8. Prokopenko V. Justification of methodical approach to mining and processing efficiency evaluation / V.Prokopenko, A.Cherep, D.Pilova // *Gornyi Zhurnal*. – 2021. – № 8. DOI: 10.17580/gzh.2021.08.07.
9. Cherep A. Justification for mining overburden without the use of conveyor transport at the Pivnichnyi open pit of the Pokrovskiy mining and processing enterprise / A.Cherep, D.Pilova // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2024. – Vol. 1319 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/1319/1/012002.
10. Substantiation of the technological parameters of bucket-wheel excavator forward trench when mining titanium deposits / M.Chebanov, H.Pcholkin, A.Makurin, O.Lozhnikov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2023. – № 5. – P. 5–11. DOI: 10.33271/nvngu/2023-6/005.
11. Establishing the influence of the quarry depth on the indicators of cyclic flow technology during the development of non-ore deposits / B.Sobko, O.Lozhnikov, M.Chebanov, V.Kriachek // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2024. – № 1. – P. 5–12. DOI: 10.33271/nvngu/2024-1/005.
12. Adamchuk A. Control of dump stability lading rock on its edge / A.Adamchuk, O.Shustov // *Inżynieria Mineralna*. – 2023. – № 1 (1). – P. 91–96. DOI: 10.29227/IM-2023-01-11.
13. Theoretical substantiation of water inflow into the mined-out space of quarries mining hard-rock building materials / O.Cherniaiev, O.Anisimov, P.Saik, O.Akimov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2024. – Vol. 1319 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/1319/1/012004.
14. Steinbach V. Consumption and use of non-renewable mineral and energy raw materials from an economic geology point of view / V.Steinbach, F.Wellmer // *Sustainability*. – 2010. – № 2 (5). – P. 1408–1430.
15. Hu H. Energy consumption and carbon dioxide emissions of China's non-metallic mineral products industry: Present state, prospects and policy analysis / H.Hu, P.Kavan // *Sustainability*. – 2014. – № 6 (11). – P. 8012–8028.
16. Korczak K. Mitigation options for decarbonization of the non-metallic minerals industry and their impacts on costs, energy consumption and GHG emissions in the EU-Systematic literature review / K.Korczak, M.Kochański, T.Skoczkowski // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – № 358. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132006.

References:

1. Verkhovna Rada Ukrainy (2011), *Zahalnoderzhavna prohrama rozvytku mineralno-syrovynnoi bazy Ukrainy na period do 2030 roku*, No. 44, [Online], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text>
2. Anisimov, O.O., Saik, P.B., Cherniaiev, O.V. and Lozynskiy, V.H. (2023), «Rozpodil pidpriemstv nerudnoi syrovyny z urakhuvanniam vidnovlennia infrastruktury za rehionamy Ukrainy», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 207–216, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-207-216.
3. Symonenko, V.I., Pavlychenko, A.V., Anisimov, O.O. et al. (2022), *Tekhnolohiia ekolohobezpechnoi vidkrytoi rozrobky nerudnykh rodovyshch tverdykh korysnykh kopalyn*, monohrafiia, Zhurfond, Dnipro, 365 p.
4. Sobko, B., Lozhnikov, O. and Drebenshtedt, C. (2020), «Investigation of the influence of flooded bench hydraulic mining parameters on sludge pond formation in the pit residual space», *E3S Web of Conferences*, Vol. 168, doi: 10.1051/e3sconf/202016800037.
5. Sobko, B., Lozhnikov, O., Chebanov, M. and Kardash, V. (2021), «Substantiating rational schedule to load trucks using draglines while mining a pit of Motronivskiy MPP», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 4, pp. 23–28, doi: 10.33271/nvngu/2021-4/023.
6. Saik, P., Cherniaiev, O., Anisimov, O. et al. (2023), «Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. This link is disabled», *Mining of Mineral Deposits*, No. 17 (4), pp. 91–102, doi: 10.33271/mining17.04.
7. Moldabayev, S., Adamchuk, A., Sarybayev, N. and Shustov, A. (2019), «Improvement of open cleaning-up schemes of border mineral reserves», *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Science and Technologies in Geology, Exploration And Mining*, Vol. 19, pp. 331–338, doi: 10.5593/sgem2019/1.3/S03.042.
8. Prokopenko, V., Cherep, A. and Pilova, D. (2021), «Justification of methodical approach to mining and processing efficiency evaluation», *Gornyi Zhurnal*, No. 8, doi: 10.17580/gzh.2021.08.07.
9. Cherep, A. and Pilova, D. (2024), «Justification for mining overburden without the use of conveyor transport at the Pivnichnyi open pit of the Pokrovskiy mining and processing enterprise», *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, Vol. 1319 (1), doi: 10.1088/1755-1315/1319/1/012002.
10. Chebanov, M., Pcholkin, H., Makurin, A. and Lozhnikov, O. (2023), «Substantiation of the technological parameters of bucket-wheel excavator forward trench when mining titanium deposits», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 5, pp. 5–11, doi: 10.33271/nvngu/2023-6/005.
11. Sobko, B., Lozhnikov, O., Chebanov, M. and Kriachek, V. (2024), «Establishing the influence of the quarry depth on the indicators of cyclic flow technology during the development of non-ore deposits», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 1, pp. 5–12, doi: 10.33271/nvngu/2024-1/005.
12. Adamchuk, A. and Shustov, O. (2023), «Control of dump stability lading rock on its edge», *Inżynieria Mineralna*, No. 1 (1), pp. 91–96, doi: 10.29227/IM-2023-01-11.

13. Cherniaiev, O., Anisimov, O., Saik, P. and Akimov, O. (2024), «Theoretical substantiation of water inflow into the mined-out space of quarries mining hard-rock building materials», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1319 (1), doi: 10.1088/1755-1315/1319/1/012004.
14. Steinbach, V. and Wellmer, F. (2010), «Consumption and use of non-renewable mineral and energy raw materials from an economic geology point of view», *Sustainability*, No. 2 (5), pp. 1408–1430.
15. Hu, N. and Kavan, R. (2014), «Energy consumption and carbon dioxide emissions of China's non-metallic mineral products industry: Present state, prospects and policy analysis», *Sustainability*, No. 6 (11), pp. 8012–8028.
16. Korczak, K., Kochański, M. and Skoczkowski, T. (2022), «Mitigation options for decarbonization of the non-metallic minerals industry and their impacts on costs, energy consumption and GHG emissions in the EU-Systematic literature review», *Journal of Cleaner Production*, No. 358, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132006.

Анісімов Олег Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри відкритих гірничих робіт Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-8286-7625>.

Наукові інтереси:

– видобуток рудних та нерудних корисних копалин.

E-mail: anisimov.o.o@nmu.one.

Саїк Павло Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7758-1083>.

Наукові інтереси:

– видобуток та переробка корисних копалин.

E-mail: saik.nmu@gmail.com.

Черняєв Олексій Валерійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Наукові інтереси:

– видобуток рудних та нерудних корисних копалин.

E-mail: chernyaev.aleksey82@ukr.net.

Лозинський Василь Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-9657-0635>.

Наукові інтереси:

– видобуток та переробка корисних копалин.

E-mail: .lvg.nmu@gmail.com.

Anisimov O.O., Saik P.B., Cherniaiev O.V., Lozynskyi V.H.

Research on energy performance in the processing of non-metallic raw materials

Non-metallic material extraction and processing enterprises are highly energy-intensive. Applying the energy method allows for a quantitative consideration of numerous factors, including the mining operations followed by the processing of non-metallic minerals. One of the possible approaches to assessing the mining and transportation complex, as well as the equipment used in processing construction raw materials, is the method that involves determining the indicator of technological energy absorption.

In this context, it becomes crucial to establish energy indicators in the processes of non-metallic material processing at mining enterprises in Ukraine and to determine the distribution of this energy within technological processing schemes for the production of essential construction materials. The main types of raw materials considered are quartzites, granites, diorites, migmatites, and plagiogranites, as well as sedimentary rocks such as limestones, which are most common in the central, southern, and eastern parts of the country.

The research applied analytical and statistical methods to process the results and analyze the energy absorption indicators in mineral processing operations, particularly crushing, transportation, and screening. Deposits within Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia, Donetsk, Odesa, and Poltava regions were selected for the studies.

To determine technological energy absorption during rock mass crushing, the compressive strength of the medium was used as a key indicator, significantly affecting the equipment complex and the distribution of energy indicators. A comparison of energy absorption across processes revealed that the screening process at all enterprises had minimal impact on energy absorption. At the same time, the highest values were associated with the chipping process.

Keywords: non-metallic raw materials; energy absorption; rock processing; compressive strength of the medium; deposits; mineral resources.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2024.