

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий механічний інститут  
(повна назва навчально-наукового інституту)

Кафедра розробки та видобування корисних копалин  
(повна назва випускової кафедри)

## Кваліфікаційна робота

бакалавр  
(освітній ступінь)

на тему: Проект застосування віброгрохотів при класифікації базальту

Виконав: здобувач 3 курсу, групи ГРз-31 інт  
освітньої програми (спеціальності) 184  
«Гірництво»

(код і повна назва спеціальності)

Будь Олександр Миколайович  
(прізвище та ініціали)

Керівник

доц. Мощич С.З.

(прізвище та ініціали)

Рецензент проф. Корнієнко В.Я.

(прізвище та ініціали)

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий інститут механічний  
Кафедра розробки та видобування корисних копалин  
Освітній ступінь бакалавр  
Спеціальність 184 «Гірництво»

## **З А В Д А Н Н Я** ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

Будь Олександр Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проект застосування віброгрохотів при класифікації базальту.  
керівник роботи к.е.н., доц. Мощич С.З.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від «24» 04. 2026 року С№ 465

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи віброгрохоти при класифікації базальту.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДРІБНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ 2. МОДЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОГРОХОЧЕННЯ ВІД РЕГУЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ДРІБНІЙ КЛАСИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТОНКОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ. 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЛАСИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ МЕТОДОМ ВІДСАДЖЕННЯ. 5. ВИДОБУВНІ РОБОТИ Висновки. Література.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Мультимедійна презентація

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                                                                       | 5  |
| РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДРІБНОГО<br>ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ                                                              | 6  |
| РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ<br>ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОГРОХОЧЕННЯ ВІД РЕГУЛЬОВАНИХ<br>ПАРАМЕТРІВ ПРИ ДРІБНІЙ КЛАСИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОЇ<br>СИРОВИНИ | 10 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ І<br>КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ<br>ПОКАЗНИКИ ТОНКОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ<br>БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ   | 20 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЛАСИФІКАЦІЇ<br>БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ МЕТОДОМ ВІДСАДЖЕННЯ                                                                      | 25 |
| РОЗДІЛ 5. ВИДОБУВНІ РОБОТИ                                                                                                                                  | 35 |
| Висновки                                                                                                                                                    | 42 |
| Література                                                                                                                                                  | 43 |

## ВСТУП

Геологічні дослідження встановили мінералогічне багатство Волинських базальтів. Поглиблений аналіз їхнього складу, а також особливостей видобутку та переробки показав, що основні компоненти родовища (базальт, лавова брекчія та туф) мають високий вміст самородної міді, титаномagnetиту та інших мікроелементів. Тому дослідники виступають за комплексний видобуток та переробку базальтової сировини. Це вимагатиме окремого видобутку туфу, базальту та лавової брекчії під час розробки кар'єру з подальшою комплексною переробкою кожного компонента за безвідходною технологією для вилучення корисних компонентів. Співвідношення цих компонентів у трьох компонентах сировини становить промисловий інтерес. Оригінальність цього підходу полягає в тому, що наразі, незважаючи на багатий елементний склад, з родовища видобувається лише базальт для будівництва, тоді як туф та лавова брекчія зберігаються на сміттєзвалищі, яке займає величезну площу та завдає шкоди навколишньому середовищу. Крім того, оскільки ці відвали є штучними родовищами, розробка комплексної технології переробки базальтової сировини дозволяє вирішити економічні, соціальні та екологічні проблеми.

Метою роботи є проект застосування віброгрохотів при класифікації базальту

# **1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДРІБНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ**

Метою першого етапу дослідження було експериментально визначити вплив основних змінних параметрів на ефективність та продуктивність просіювання дрібних фракцій (6,0 мм, 3,0 мм та 2,0 мм): напрямок збурюючої сили ( $\beta$ , градуси), кут нахилу решіт ( $\alpha$ , градуси), частота коливань робочого елемента ( $\omega$ , об/хв), питоме навантаження ( $q$ , т/год·м<sup>2</sup>), динамічний розмір вічка сита ( $\Delta$ , мм), густина оброблюваної породи ( $\gamma$ , г/см<sup>3</sup>) та довжина решіт ( $L$ , м). Ці співвідношення є важливими для раціонального вибору обладнання та управління процесом, що є вирішальним етапом переробки сировини.

У всіх досліджених випадках співвідношення між вихідним продуктом, надсітовим ситом та підсітовим ситом становило 50/50. Незважаючи на встановлені раніше залежності між показниками вібраційного просіювання та змінними параметрами, заданими для середнього та грубого просіювання, ці залежності не можуть бути використані для тонкого просіювання в досліджуваному випадку. Дійсно, три компоненти базальтової сировини демонструють контрастні щільності, різний розподіл розмірів частинок після подібних стадій дрібного дроблення та різні форми частинок. Тому були необхідні подальші дослідження для моделювання процесу та оптимізації його управління.

Ці дослідження проводилися на експериментальних зразках вібраційних грохотів, оснащених гумовими стрічками (RGSS) та регуляторами частоти для вібробудника. Оскільки збільшення амплітуди коливань грохота значно збільшує напруження, амплітуда коливань підтримувалася в межах заздалегідь визначених оптимальних меж ( $A_c = 6,0$  мм;  $A_k = 2,0$  мм), щоб зменшити металоємність та енергоємність грохота.

Результати експериментальних досліджень щодо вищезазначених залежностей представлені в таблиці 1. Аналіз підтверджує значний вплив кожного змінного фактора на ефективність грохочення та можливість керування процесом шляхом зміни одного або кількох параметрів. Межі варіації були прийняті під час експериментів з конструктивних або технологічних причин. У

цьому випадку вплив одного параметра вивчався шляхом його варіації, тоді як інші залишалися фіксованими.

Окрім своєї класифікаційної функції, дробарка також виконує транспортування, що вимагає проектування раціональної транспортної системи.

Для визначення залежності продуктивності ( $Q$ ) суперпросіяного продукту від усіх вищезгаданих змінних параметрів було досліджено параметри, що не відповідають оптимальним для ефективного просіювання.

Аналіз результатів цих досліджень, а також їх графічне представлення, виявляє помітну нелінійність функції з чітко визначеним екстремумом для всіх варіацій параметрів. Отже, знаючи, що максимальна продуктивність досягається при куті сили збурення вібратора  $\beta = 45^\circ$ , всі наступні дослідження проводилися в цьому режимі збурення.

Таким чином, сукупність досліджень, проведених з тонкого просіювання трьох компонентів базальтової породи, дозволяє вибрати раціональний метод класифікації та, при виборі критеріїв, оптимальний для підготовки руд, призначених для переробки на магнітних та електричних сепараторах. Цей метод класифікації дозволяє відібрати магніточутливу фракцію (титаномагнетит) на першому етапі обробки, а також відокремити силікатну фракцію від мідьвмісної фракції. Всі три компоненти мають промисловий інтерес, забезпечуючи відсутність відходів у розробленій технології, де тонке просіювання відіграє підготовчу роль.

Дослідження, проведені з метою визначення оптимальних режимів роботи та конструктивних параметрів грохота під час тонкого просіювання (2,0–5,0 мм) трьох типів базальтових порід (туф, лавова брекчія та базальт), встановили, що кут нахилу збурюючої сили, спрямованої вібраційним збудженням, становить  $45^\circ$ , кут нахилу робочого елемента з урахуванням необхідної продуктивності становить від  $15^\circ$  до  $20^\circ$ , частота вібраційного збудження становить 1300 об/хв, максимальне питоме навантаження на грохот становить 5,0 т/год·м<sup>2</sup> та оптимальна довжина робочого елемента становить від 4,5 до 5,0 м. Ці параметри рекомендуються при проектуванні вібраційного грохота для реалізації технології

підготовки базальтової руди для її подальшої переробки з метою вилучення корисних компонентів: самородної міді, титаномagnetиту та силікатної фракції.

## **2. МОДЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОГРОХОЧЕННЯ ВІД РЕГУЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ДРІБНІЙ КЛАСИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ**

Тонке вібраційне просіювання є важливою операцією в підготовці гірських порід до обробки або використання. Постійне підвищення ефективності просіювання значною мірою залежить від типу гірської маси та робочих і конструктивних параметрів грохота. Під час обробки гірських порід необхідно оптимізувати параметри машини для вибору раціональних режимів роботи всієї системи. Враховуючи велику кількість регульованих параметрів, вибір раціональних або оптимальних параметрів, заснований лише на інтуїції чи досвіді, практично неможливий. Тому необхідно моделювати процеси з урахуванням параметрів машини, а потім аналізувати отримані моделі за допомогою комп'ютерів.

Наразі проводяться дослідження комплексної експлуатації Волинського базальтового родовища з використанням безвідходної технології. Ця експлуатація зумовлена мінеральним багатством базальтової сировини, яка містить, крім базальту, значну частку цеолітно-сметитових туфів та лавакlastичних брекчій. Ці три компоненти родовища мають високий вміст заліза, титану та самородної міді. Ці компоненти мають промисловий інтерес, але їх видобуток вимагає специфічної технології підготовки руди.

В Інституті геотехнічної механіки ім. Полякова Національної академії наук України та Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України проводяться дослідження з розробки комплексної технології переробки базальтової сировини. Одночасно вивчається вплив ключових факторів на технологічні показники кожного необхідного обладнання. На основі цього розробляються математичні моделі для оптимізації обладнання в рамках технологічної схеми та оцінки його ефективності.

Метою цих досліджень є визначення впливу ключових параметрів керування на ефективність тонкого вібраційного просіювання базальтових гірських мас. Враховуючи, що фізико-механічні характеристики гірської маси мають суттєвий вплив на класифікаційні показники, а також те, що раніше встановлені залежності для конкретних умов класифікації потребують уточнення та коригування, у цьому дослідженні експериментально визначено залежність ефективності тонкого просіювання базальтової сировини від кількох змінних параметрів, зокрема:  $\gamma$  – щільність гірської маси ( $\gamma_1 = 2,6$  – базальт,  $\gamma_2 = 2,2$  – лавова брекчія,  $\gamma_3 = 1,4$  – туф),  $\beta$  – кут нахилу сили збурення,  $\alpha$  – кут нахилу робочого органу грохота,  $\Delta$  – розмір комірок сита,  $q$  – питоме навантаження на грохот,  $\omega$  – частота збурень приводу грохота та його довжина  $L$ . Зміна цих параметрів має суттєвий вплив на ефективність просіювання. Для аналізу впливу цих факторів на систему необхідно встановити багатофакторну регресійну залежність. Лінійні регресійні залежності розраховувалися методом найменших квадратів. У цьому випадку нелінійні залежності від факторних характеристик були зведені до лінійних залежностей шляхом підстановки змінних. У досліджуваному випадку це стосується залежності ефективності від розміру комірки сита,  $E = f(\Delta)$ . Для інших залежностей, згаданих раніше, параболічна залежність виявилася більш доцільною. З коефіцієнтів кореляції  $R$  для кожної пари характеристик було побудовано матрицю кореляції та розраховано кратний коефіцієнт детермінації. Цей коефіцієнт вказує на частку варіації ефективної характеристики, що пояснюється варіацією факторних характеристик моделі. Потім ступінь відповідності моделі оцінювали за допомогою  $F$ -критерію Фішера порівняно з її критичним значенням  $F_{cr}$  для рівнів значущості  $\alpha = 0,05$  або  $\alpha = 0,01$ .

У цій роботі було встановлено залежність ефективності тонкого просіювання від найбільш впливових факторних характеристик у такому вигляді:

$$E = f(\beta, \alpha, \omega, q, \Delta, L, \gamma). \quad (1)$$

Ефективність просіювання поступово вивчалася як функція різних факторів, для фіксованих розмірів сітки  $\Delta$  та шляхом зміни типу гірської породи, що характеризується її щільністю  $\gamma$ . Узагальнена модель, що включає коефіцієнт щільності  $\gamma$ , була отримана з урахуванням впливу кута нахилу сили просіювання. Розрахунки проводилися для  $\Delta = 2$  мм, 3 мм та 5 мм. Результати представлені в таблиці 3.

Таблиця 3 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $\Delta$ | $a_0$   | $a_1$   | $a_2$  | $a_3$ | $a_4$  | $R^2$ | $F$    |
|----------|---------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 2        | -25,121 | -11,671 | 5,92   | 3,942 | -0,028 | 0,979 | 153,21 |
| 3        | -47,081 | 29,582  | -4,172 | 3,352 | -0,032 | 0,979 | 154,41 |
| 5        | -35,821 | 3,332   | 2,432  | 4,072 | -0,039 | 0,099 | 341,61 |

Регресійна модель у виді:

$$\hat{E}(\gamma, \beta) = a_0 + a_1\gamma + a_2\gamma + a_3\beta + a_4\beta^2. \quad (2)$$

Узагальнена модель при включенні розміру чарунки сита  $\Delta$  у число варійованих чинників, інші чинники ( $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $q$ ,  $L$ ) були

$$\hat{E}(\Delta, \gamma, \beta) = a_0 + a_1\Delta + a_2\gamma + a_3\gamma^2 + a_4\beta + a_5\beta^2. \quad (3)$$

Результати розрахунків параметрів цієї регресії (таблиця 4).

Таблиця 4 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $a_0$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$  | $R^2$ | $F$    |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| -45,45 | 2,832 | 7,072 | 1,392 | 3,782 | -0,036 | 0,972 | 331,32 |

Для кожного з розмірів осередку сита  $\Delta$  регресійна модель задавалася у вигляді варійованих параметрів  $\gamma$  і  $\alpha$

$$\hat{E}(\gamma, \beta) = a_0 + a_1\Delta + a_2\gamma + a_3\alpha + a_4\alpha^2. \quad (4)$$

Таблиця 5 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $\Delta$ | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$   | $R^2$  | $F$    |
|----------|--------|--------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 2        | 61,931 | -8,011 | 5,211 | -0,337 | -0,0361 | 0,9911 | 271,72 |
| 3        | 68,121 | -6,511 | 4,581 | -0,611 | -0,0311 | 0,9861 | 176,72 |
| 5        | 36,791 | 34,511 | -5,83 | 0,4391 | -0,0811 | 0,9631 | 64,91  |

Узагальнена модель при куті нахилу грохоту  $\alpha$  у число варійованих чинників задавалася у виді

$$\hat{E}(\Delta, \gamma, \alpha) = a_0 + a_1\Delta + a_2\gamma + a_3\gamma^2 + a_4\alpha + a_5\alpha^2. \quad (5)$$

Чинники зафіксовані на постійному рівні. Результати розрахунку приведені в таблицю. 6.

Таблиця 6 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$  | $a_5$  | $R^2$  | $F$    |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 39,41 | 4,711 | 6,671 | 1,321 | -0,166 | -0,049 | 0,9731 | 282,51 |

Залежність ефективності грохочення від частоти збурень вібратора  $\omega$ , питомого навантаження на грохот  $q$  й довжини сита на грохоті, як і у попередньому випадку - визначалася поетапно.

Модель із чинником впливу  $\omega$

$$E(\gamma, \omega) = a_0 + a_1\gamma + a_2\gamma^2 + a_3\omega + a_4\omega^2. \quad (6)$$

Результати розрахунку зведені у таблицю. 7.

Таблиця 7 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $\Delta$ | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$     | $R^2$  | $F$   |
|----------|--------|--------|-------|--------|-----------|--------|-------|
| 2        | -50,88 | 10,411 | 0,01  | 0,1561 | -0,000058 | 0,8661 | 93,21 |
| 3        | -62,65 | 38,331 | -6,42 | 0,1461 | -0,000057 | 0,9491 | 60,21 |

|   |        |        |       |        |           |        |       |
|---|--------|--------|-------|--------|-----------|--------|-------|
| 5 | -43,07 | 15,831 | -0,69 | 0,1591 | -0,000065 | 0,9341 | 46,11 |
|---|--------|--------|-------|--------|-----------|--------|-------|

Узагальнена модель отримана в виді:

$$E = -62,84 + 3,19\Delta + 21,53\gamma - 2,37\gamma^2 + 0,154\omega - 0,00006\omega^2. \quad (7)$$

Модель із врахуванням питомого навантаження на грохот  $q$ :

$$E = (\gamma, q) = a_0 + a_1\gamma + a_2\gamma^2 + a_3q + a_4q^2. \quad (8)$$

Результати розрахунку коефіцієнтів моделі зведені у таблицю. 8.

Таблиця 8 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $\Delta$ | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$   | $R^2$  | $F$    |
|----------|--------|--------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 2        | 66,091 | 2,862  | 2,532 | -6,063 | 0,3023  | 0,9863 | 279,43 |
| 3        | 86,252 | -15,02 | 6,842 | -3,342 | -0,0793 | 0,9853 | 269,43 |
| 5        | 71,642 | 7,52   | 1,192 | -3,462 | 0,0123  | 0,9773 | 170,93 |

Узагальнена регресійна модель:

$$E = 59,82 + 4,45\Delta - 1,55\gamma + 3,52\gamma^2 - 4,29q + 0,078q^2. \quad (9)$$

Модель із урахуванням довжини сита грохоту  $L$ :

$$E = a_0 + a_1x + a_2\gamma^2 + a_3L + a_4L^2. \quad (10)$$

Результати розрахунку приведені у таблицю. 9.

Таблиця 9 - Результати розрахунків параметрів регресії

| $\Delta$ | $a_0$  | $a_1$   | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$  | $R^2$  | $F$    |
|----------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 2        | 0,8961 | -3,2141 | 2,981 | 24,591 | -2,131 | 0,9912 | 458,02 |
| 3        | 13,921 | -11,431 | 5,361 | 24,491 | -2,171 | 0,9832 | 235,02 |

|   |       |      |       |        |        |        |        |
|---|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 5 | 3,541 | 5,01 | 1,341 | 23,491 | -1,971 | 0,9932 | 541,02 |
|---|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|

В результаті розрахунків модель має вигляд:

$$E = -5,23 + 3,4\Delta - 3,21\gamma + 3,22\gamma^2 + 24,19L - 2,09L^2. \quad (11)$$

Представлені моделі вирішують окремі завдання вибору параметрів грохоту й визначення ефективності. Кінцева мета - моделювання залежності ефективності грохочення від всієї сукупності факторних ознак в виді

$$E = f(\Delta, \gamma, \beta, \alpha, \omega, q, L). \quad (12)$$

Коефіцієнти моделі були розраховані за допомогою методу, описаного раніше, враховуючи лінійну залежність для параметра (на основі експериментальних даних) та параболічну залежність для інших факторів. Загальний розмір вибірки відповідав кількості перекриваючих зв'язків та кількості ступенів свободи.

Після цих розрахунків було отримано узагальнену модель залежності ефективності просіювання вібраційного грохота, враховуючи основні характеристики факторів:

$$E = -161,42 + 3,7\Delta + 5,54\gamma + 1,54\gamma^2 + 1,67\beta - 0,012\beta^2 + 2,12\alpha - 0,153\alpha^2 + 0,162\omega - 0,00065\omega^2 + 4,18q - 0,863q^2 + 17,28L - 1,25L^2. \quad (13)$$

Коефіцієнт детермінації та точна статистика Фішера вказують на чудову відповідність отриманій моделі.

Результати проведених досліджень дозволяють проаналізувати процес тонкого вібраційного просіювання базальтової сировини під час її комплексної сепараційної обробки, щоб передбачити оптимальні параметри просіювання для заданої ефективності просіювання. Цей етап підготовки руди є важливим, оскільки дрібні фракції містять значну кількість самородної міді, титаномagnetиту та їх зрощень. Отже, ефективне розділення дрібних фракцій дозволяє використовувати поетапну схему екстракції корисних компонентів.

### **3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТОНКОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ**

Дроблення, подрібнення, класифікація за розміром частинок, а також магнітне та електричне розділення мають свої специфічні характеристики, як під час підготовки руди, так і під час видобутку. У цьому контексті розглядаються характеристики магнітних сепараторів (для видобутку титаномagnetиту, магніточутливої фракції базальтової сировини) та електричних сепараторів (для видобутку самородної міді). Попередні лабораторні дослідження показали, що найефективніший процес розділення досягається за допомогою тонкої класифікації з розмірами частинок 0,5 мм та 0,1 мм. Враховуючи, що процеси тонкої класифікації з використанням вібрації не були повністю досліджені, а існуючі вібраційні грохоти потребують адаптації своїх характеристик для відповідності технологічним вимогам, дослідження проводилися на грохоті тонкої класифікації з динамічно активною робочою поверхнею, спеціально розробленому в Інституті збагачення корисних копалин та металургії Національної академії наук України. Його відмінна особливість полягає в тому, що на цьому грохоті процес просіювання здійснюється за допомогою вібраційно-ударного ефекту, завдяки впливам, що прикладаються динамічно активним резонансним гумовим стрічковим грохотом до верхнього класифікатора, який складається з жорсткої металевої або поліамідної сітки. Метою цього дослідження було визначити вплив робочих та конструктивних параметрів грохота на ефективність та продуктивність тонкого просіювання.

Як і в експериментах з тонкої класифікації, були прийняті такі регульовані параметри:  $\gamma$  – густина гірської маси ( $\text{г/см}^3$ ),  $\beta$  – кут нахилу збудюючої сили вібраційного збудника грохота (градуси),  $\alpha$  – кут нахилу робочого органу грохота (градуси),  $\Delta n$  – розмір комірки динамічного сита (мм),  $q$  – питоме навантаження на грохот ( $\text{тонни/год}\cdot\text{м}^2$ ),  $\omega$  – частота коливань приводу грохота (об/хв),  $L$  – довжина грохота (м). Паралельно були визначені характеристики ефективності

та продуктивності класифікації для трьох густин базальтової гірської маси, видобутої з кар'єру: для туфу –  $\gamma = 1,4 \text{ г/см}^3$ ; для лавової брекчії –  $\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$ ; для базальту  $\gamma = 2,6 \text{ г/см}^3$ . Ці компоненти гірської маси вибірково видобуваються та обробляються окремо.

Результати всіх досліджень впливу параметрів керування на ефективність представлені в таблиці 10. Таке багатфакторне експериментування необхідне для розробки концепцій, пов'язаних з процесом точної класифікації, визначення меж керування кожним параметром, визначення ступеня впливу та закону зміни технологічних параметрів під час регулювання, а також, під час оптимізації процесу, вибору критеріїв для модифікації цільової функції.

Таким чином, отримана інформація дозволяє проводити моделювання та швидко визначення раціонального або оптимального методу класифікації. Завдяки такому дослідженню роботи всіх основних компонентів технологічного контуру можна вирішити задачу синтезу параметрів.

Дослідження впливу продуктивності грохота на його параметри проводилися з урахуванням аналізу результатів попередніх досліджень. Також було модифіковано обмежену кількість параметрів. Параметри, що демонструють екстремальне значення функції, що впливає на ефективність грохочення (наприклад,  $\omega = 1500 \text{ об/хв}$ ) або встановлену функцію (наприклад,  $L = 4,5 \text{ м}$  або  $\alpha = 10$ ), залишалися постійними. Результати досліджень залежності продуктивності від різних факторів, представлені в таблиці 11, показують, що для тонкого просіювання кут нахилу  $\beta = 45^\circ$  є кращим для досягнення як високої ефективності, так і високої продуктивності.

Таблиця 10 - Результати досліджень залежності ефективності тонкого грохочення від варійованих параметрів

| Варьируемые<br>параметры    |      | Эффективность, E, %                         |                               |                               |                                             |                               |                               |
|-----------------------------|------|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                             |      | $\Delta = 5 \text{ мм}, a = 0,5 \text{ мм}$ |                               |                               | $\Delta = 5 \text{ мм}, a = 0,1 \text{ мм}$ |                               |                               |
|                             |      | $\gamma = 1,4 \text{ г/см}^3$               | $\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 2,6 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 1,4 \text{ г/см}^3$               | $\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 2,6 \text{ г/см}^3$ |
| $\beta$ ,<br>град           | 25   | 25                                          | 33                            | 40                            | 18                                          | 22                            | 30                            |
|                             | 30   | 37                                          | 46                            | 55                            | 24                                          | 29                            | 38                            |
|                             | 40   | 50                                          | 65                            | 73                            | 40                                          | 49                            | 59                            |
|                             | 45   | 58                                          | 68                            | 75                            | 45                                          | 56                            | 65                            |
|                             | 50   | 54                                          | 66                            | 74                            | 45                                          | 55                            | 64                            |
|                             | 60   | 45                                          | 64                            | 70                            | 44                                          | 48                            | 55                            |
| $\alpha$ ,<br>град          | 2,5  | 59                                          | 70                            | 78                            | 50                                          | 61                            | 69                            |
|                             | 5    | 55                                          | 65                            | 75                            | 46                                          | 58                            | 65                            |
|                             | 10   | 47                                          | 58                            | 65                            | 40                                          | 51                            | 58                            |
|                             | 15   | 40                                          | 47                            | 52                            | 34                                          | 43                            | 48                            |
|                             | 20   | 30                                          | 37                            | 45                            | 25                                          | 34                            | 40                            |
| $\omega$ ,<br>об/мин        | 700  | 40                                          | 45                            | 49                            | 33                                          | 38                            | 40                            |
|                             | 900  | 44                                          | 50                            | 54                            | 38                                          | 46                            | 49                            |
|                             | 1200 | 48                                          | 60                            | 66                            | 44                                          | 53                            | 60                            |
|                             | 1500 | 49                                          | 60                            | 70                            | 46                                          | 55                            | 60                            |
|                             | 1600 | 45                                          | 57                            | 65                            | 45                                          | 54                            | 57                            |
| $q$ ,<br>т/ч·м <sup>2</sup> | 1    | 66                                          | 76                            | 82                            | 50                                          | 62                            | 70                            |
|                             | 2    | 63                                          | 70                            | 75                            | 50                                          | 58                            | 67                            |
|                             | 3    | 56                                          | 67                            | 75                            | 42                                          | 55                            | 60                            |
|                             | 4    | 50                                          | 62                            | 66                            | 40                                          | 50                            | 60                            |
|                             | 5    | 50                                          | 57                            | 65                            | 36                                          | 44                            | 55                            |
|                             | 6    | 45                                          | 55                            | 60                            | 30                                          | 42                            | 47                            |
| $L$ , м                     | 1    | 27                                          | 32                            | 35                            | 23                                          | 27                            | 29                            |
|                             | 1,5  | 31                                          | 37                            | 40                            | 27                                          | 30                            | 32                            |
|                             | 2,5  | 43                                          | 47                            | 55                            | 32                                          | 40                            | 43                            |
|                             | 3,5  | 50                                          | 56                            | 60                            | 38                                          | 45                            | 47                            |
|                             | 5    | 55                                          | 64                            | 70                            | 42                                          | 50                            | 53                            |
|                             | 6    | 58                                          | 64                            | 70                            | 42                                          | 51                            | 54                            |

Таблица 11 - Результаты досліджень залежності продуктивності грохоту від варійованих параметрів

| Варійовани<br>й<br>параметр |    | Продуктивність, Q, тон/год                  |                                        |                                        |                                             |                                        |                                        |
|-----------------------------|----|---------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|                             |    | $\Delta = 5 \text{ мм}, a = 0,5 \text{ мм}$ |                                        |                                        | $\Delta = 5 \text{ мм}, a = 0,1 \text{ мм}$ |                                        |                                        |
|                             |    | $\gamma =$<br>1,4<br>г/см <sup>3</sup>      | $\gamma =$<br>2,2<br>г/см <sup>3</sup> | $\gamma =$<br>2,6<br>г/см <sup>3</sup> | $\gamma =$<br>1,4<br>г/см <sup>3</sup>      | $\gamma =$<br>2,2<br>г/см <sup>3</sup> | $\gamma =$<br>2,6<br>г/см <sup>3</sup> |
| $\beta$ , град              | 20 | 0,61                                        | 0,81                                   | 0,91                                   | 0,31                                        | 0,41                                   | 0,61                                   |
|                             | 30 | 1,41                                        | 1,71                                   | 2,01                                   | 0,71                                        | 0,91                                   | 1,11                                   |
|                             | 40 | 2,21                                        | 2,51                                   | 2,61                                   | 1,1                                         | 1,51                                   | 1,81                                   |
|                             | 45 | 2,21                                        | 2,81                                   | 3,01                                   | 1,31                                        | 1,61                                   | 1,81                                   |
|                             | 50 | 2,21                                        | 2,31                                   | 2,51                                   | 1,21                                        | 1,51                                   | 1,71                                   |
|                             | 60 | 1,51                                        | 1,61                                   | 1,71                                   | 0,51                                        | 0,81                                   | 1,01                                   |

Стабільні амплітуди коливань камери просіювання ( $AK = 2,0 \text{ мм}$ ) та резонансної пружної смуги, що підтримує сітку класифікації металу ( $AC = 6,0 \text{ мм}$ ), зумовлені підтримкою напруженого стану металевої конструкції височастотного грохота в допустимих межах.

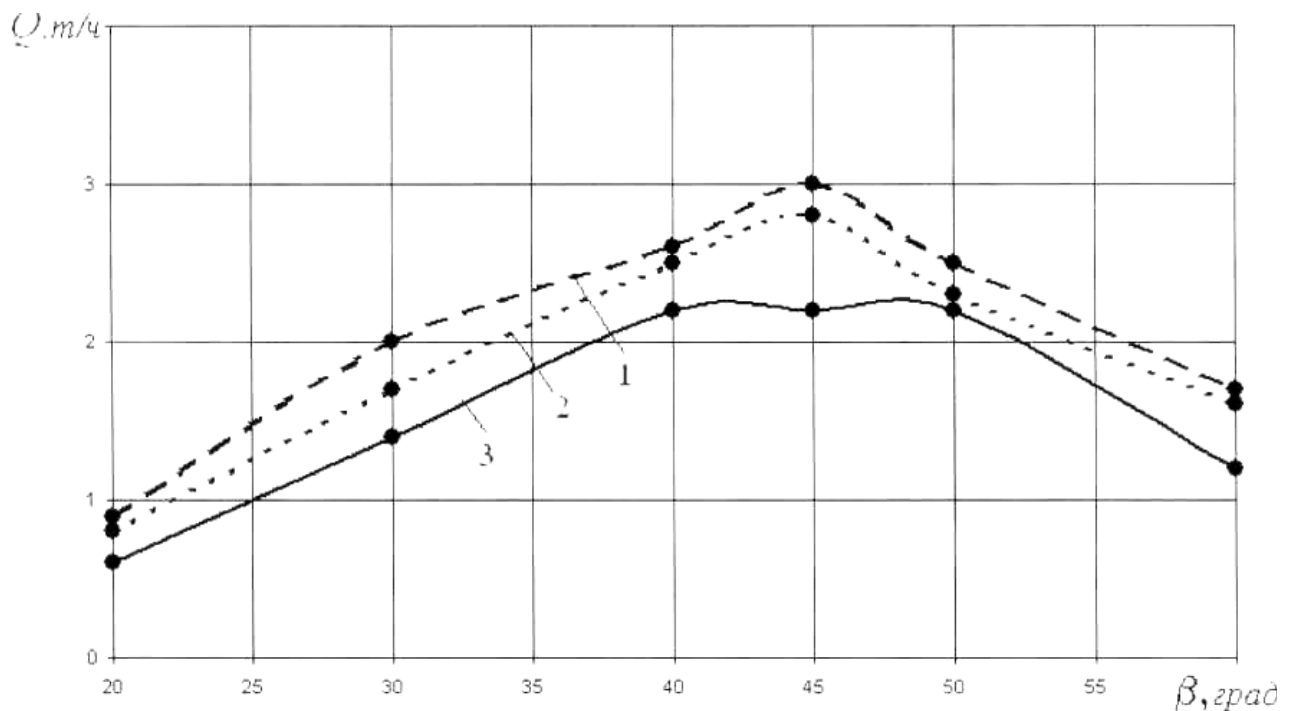
Графічний аналіз отриманих кривих ефективності та продуктивності просіювання виявив значний вплив напрямку збурювальної сили віброзбудника для двох досліджуваних класів розмірів частинок. На рисунках 1 та 2 представлені графіки продуктивності просіювання (вираженої як добуток на сітці) як функції кута збурювальної сили віброзбудника для розмірів частинок 0,5 мм та 0,1 мм відповідно. Цей аналіз показує, що оптимальний кут нахилу для досягнення високої ефективності просіювання та прийнятної продуктивності становить  $\beta = 45^\circ$  (екстремум кривої). З огляду на ці міркування, вплив інших параметрів грохота на технологічні показники було досліджено при цьому заданому кінематичному куті.

Залежність ефективності тонкого просіювання від частоти збурень приводу демонструє стабільний екстремум для  $\omega = 1450\text{--}1500 \text{ об/хв}$ . Для досліджуваних класів розміру сепарації ця залежність проілюстрована на рисунках 3 та 4. Наявність екстремуму вказує на можливість встановлення частоти в заданих межах при виборі параметрів процесу тонкого просіювання.

Оскільки для тонкої класифікації необхідно забезпечити високу ефективність та продуктивність, отримані результати можуть бути використані при проектуванні вібраційного грохота.

Таким чином, отримані результати дослідження дозволяють вибрати обладнання, необхідне для конкретних умов переробки базальтової породи, визначити його параметри для максимального задоволення вимог технології підготовки руди та вилучення корисних компонентів за безвідходною технологією з урахуванням складності переробки.

Представлені результати отримані для породи з відносною вологістю до 5%. При тонкій класифікації (до 50 мікронів) кожного з трьох компонентів базальтової гірської маси у формі пульпи при співвідношенні тверда/рідка речовина 1:3 ефективність базальтових дрібних частинок становила 60%, лавової брекчії - 62%, а туфу - 60%[15].

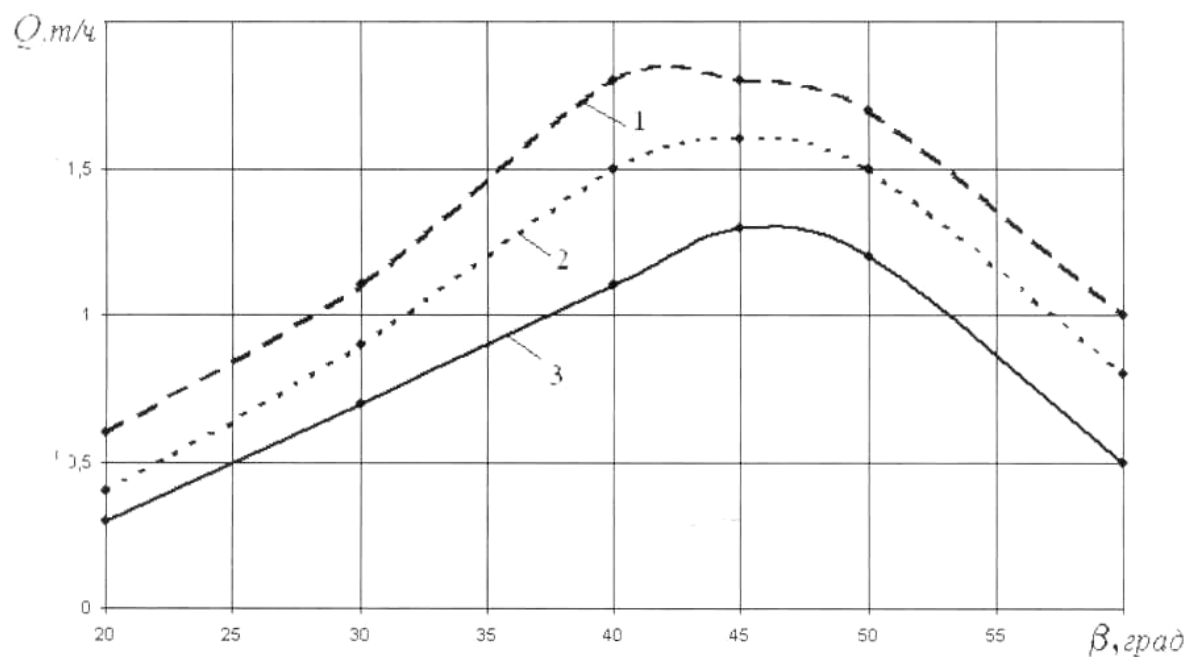


1 – щільність породи  $\gamma = 1,4 \text{ г/см}^3$  ; 2 - щільність породи  $\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$ ;

3 – щільність породи  $\gamma = 2,6 \text{ г/см}^3$

Рис. 1 - Залежність продуктивності грохоту

від кута нахилу збурюючої сили віброзбудника для класу крупності 0,5 мм.



1 – щільність породи  $\gamma = 1,4 \text{ г/см}^3$ ; 2 - щільність породи  $\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$ ;  
 3 – щільність породи  $\gamma = 2,6 \text{ г/см}^3$

Рис. 2 - Залежність продуктивності грохоту від кута нахилу збудуючої сили віброзбудника для класу крупності 0,1 мм

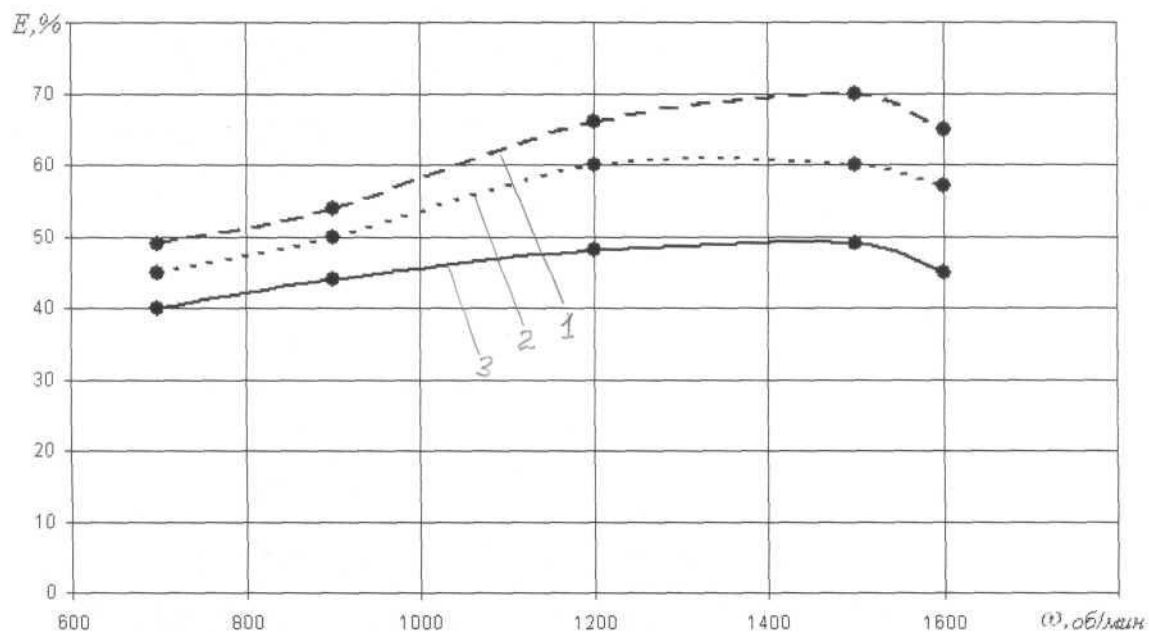


Рис. 3 - Залежність ефективності грохочення від частоти збурень грохоту  
для класу крупності 0,5 мм

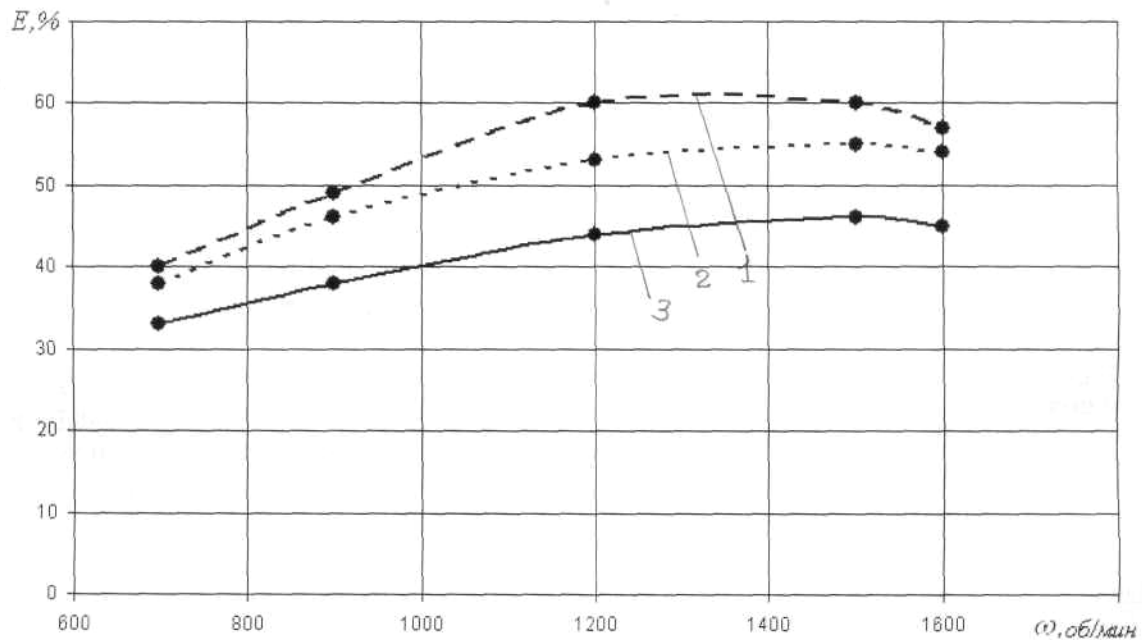


Рис. 4 - Залежність ефективності грохочення від частоти збурень грохоту  
для класу крупності 0,1 мм

Експериментальні залежності ефективності скринінгу від різних факторів були визначені за допомогою багатофакторних регресій. Результати експериментів (пунктирні лінії) та розрахунки (суцільні лінії) представлені графічно. У цьому випадку крива 1 відповідає туфу, крива 2 – лавовій брекчії, а крива 3 – базальту.

Модель зі зміною кута нахилу збурюючої сили вібратора поступово розглядалася у вигляді наступних регресійних моделей:

$$\hat{E} = f(\gamma, \beta) \text{ при } a = 0,5 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(\gamma, \beta) \text{ при } a = 0,1 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(a, \gamma, \beta).$$

Результати розрахунків приведені для моделей  $\hat{E} = f(\gamma, \beta)$ , і для моделі  $\hat{E} = a_0 + a_1a + a_2\gamma + a_3\gamma^2 + a_4\beta + a_5\beta^2$ .

Таблиця 12 - Розрахунок параметрів залежності  $\hat{E} = f(\gamma, \beta)$

| $a$ , мм | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$  | $R^2$ | $F$    |
|----------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 0,51     | -98,41 | 4,581  | 2,951 | 5,851 | -0,06  | 0,982 | 173,91 |
| 0,11     | -69,41 | -26,71 | 9,891 | 5,381 | -0,054 | 0,968 | 98,51  |

$$\hat{E} = a_0 + a_1a + a_2\gamma + a_3\gamma^2 + a_4\beta + a_5\beta^2 \quad (3.14)$$

Таблиця 13 - Розрахунок параметрів залежності

| $a_0$  | $a_1$  | $a_2$   | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$   | $R^2$  | $F$    |
|--------|--------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|
| -92,81 | 29,721 | -11,041 | 5,611 | 5,611 | -0,0571 | 0,9731 | 213,81 |

Отримані множинні коефіцієнти детермінації  $R^2$  та точна статистика Фішера  $F$  показали задовільну збіжність між експериментальними та розрахунковими характеристиками, як показано на рисунку 5.

Модель, що описує залежність ефективності тонкого просіювання від кута сита, розраховується у вигляді:

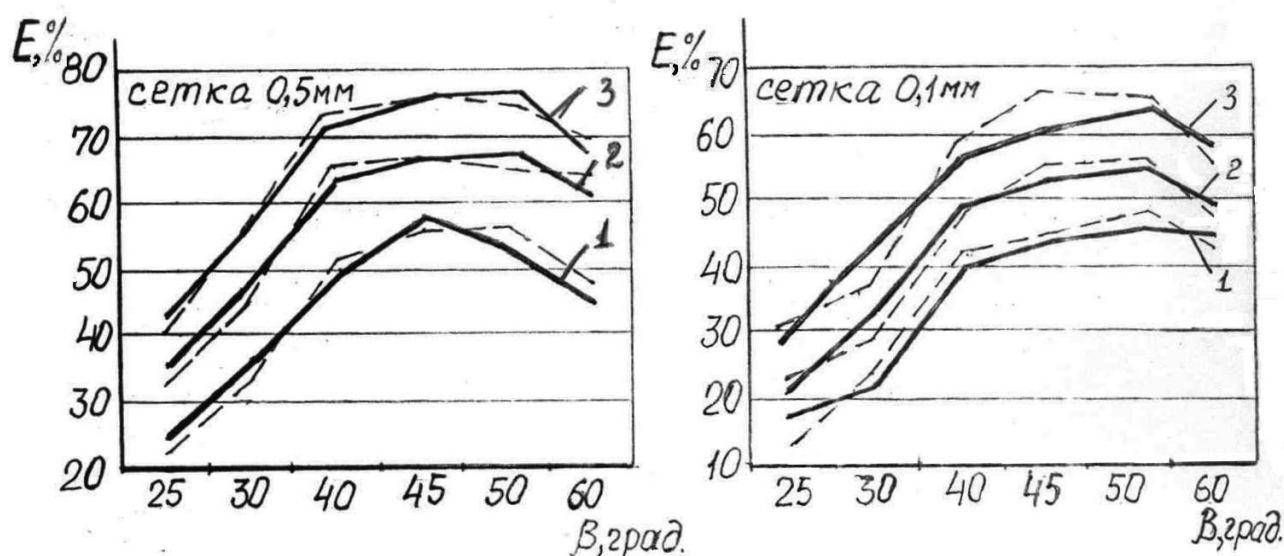


Рис 5 - Залежність ефективності грохочення

від кута нахилу збурюючої сили віброзбудника  $\hat{E} = f(\gamma, \beta, a)$

$$\hat{E} = f(\gamma, \alpha) \text{ при } a = 0,5 \text{ мм;}$$

$$\hat{E} = f(\gamma, \alpha) \text{ при } a = 0,1 \text{ мм;}$$

$$\hat{E} = f(a, \gamma, \alpha).$$

Результати розрахунків для залежності  $\hat{E} = f(\gamma, \alpha)$  зведені в таблицю 14

Таблиця 14 - Розрахунок параметрів залежності  $\hat{E} = f(\gamma, \alpha)$

| $a$ , мм | $a_0$  | $a_1$   | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$   | $R^2$  | $F$     |
|----------|--------|---------|-------|--------|---------|--------|---------|
| 0,51     | 67,671 | -11,011 | 6,251 | -1,591 | -0,0104 | 0,9911 | 264,111 |
| 0,111    | 44,541 | 2,51    | 2,921 | -1,181 | -0,0158 | 0,9951 | 460,811 |

Для залежності  $\hat{E} = a_0 + a_1 a + a_2 \gamma + a_3 \gamma^2 + a_4 \alpha + a_5 \alpha^2$  (15) результати розрахунку зведені в таблицю 15.

Таблиця 15 - Розрахунок параметрів залежності

$$\hat{E} = a_0 + a_1 a + a_2 \gamma + a_3 \gamma^2 + a_4 \alpha + a_5 \alpha^2$$

| $a_0$  | $a_1$ | $a_2$  | $a_3$ | $a_4$  | $a_5$   | $R^2$  | $F$    |
|--------|-------|--------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 51,061 | 16,81 | -4,251 | 4,581 | -1,391 | -0,0131 | 0,9871 | 373,71 |

Задовільна збіжність експериментальних й розрахункових даних по цій залежності показана на рисунку 6.

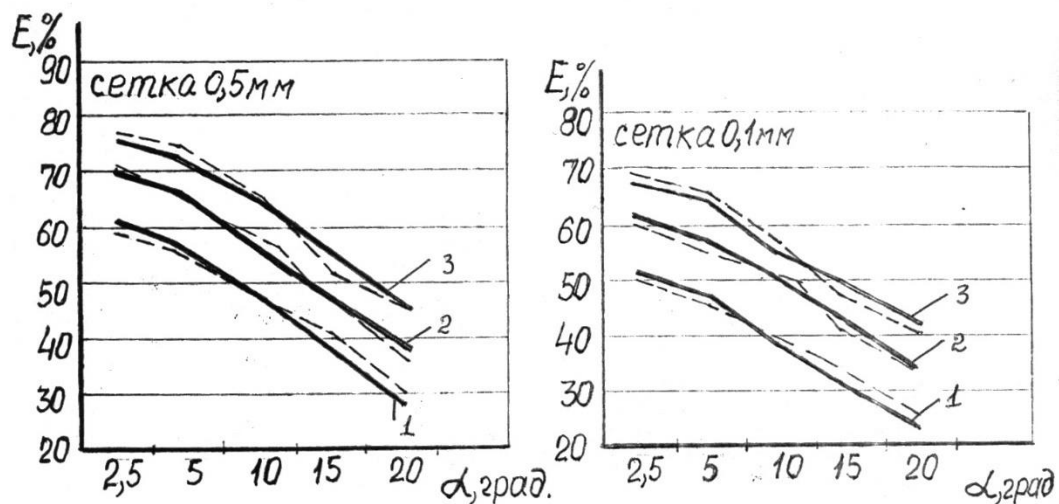


Рис 6 - Залежність ефективності грохочення

від кута нахилу просіюючої поверхні,  $\hat{E} = f(\gamma, \alpha, a)$

Вплив частоти збурень віброзбудника грохота визначався експериментально й розраховувався регресійними моделями у виді:

$$\hat{E} = f(\gamma, \omega) \text{ при } a = 0,5 \text{ мм;}$$

$$\hat{E} = f(\gamma, \omega) \text{ при } a = 0,1 \text{ мм;}$$

$$\hat{E} = f(a, \gamma, \omega).$$

Результати розрахунків зведені в таблицю 16 і 17 і ілюструються графіками на рис. 7.

Таблиця 16 - Розрахунок параметрів залежності  $\hat{E} = f(\gamma, \omega)$

| $a$ , мм | $a_0$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$     | $R^2$  | $F$   |
|----------|--------|-------|-------|--------|-----------|--------|-------|
| 0,51     | -14,62 | -2,01 | 3,751 | 0,0871 | -0,000031 | 0,9191 | 28,31 |
| 0,11     | -33,63 | 10,01 | 0,01  | 0,0941 | -0,000034 | 0,9731 | 91,11 |

Таблиця 17 - Розрахунок параметрів для залежності

$$\hat{E} = a_0 + a_1 a + a_2 \gamma + a_3 \gamma^2 + a_4 \omega + a_5 \omega^2 \quad (16)$$

| $a_0$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$  | $a_5$      | $R^2$ | $F$   |
|--------|-------|-------|-------|--------|------------|-------|-------|
| -28,31 | 14,01 | 4,011 | 1,881 | 0,0911 | -0,0000325 | 0,941 | 75,31 |

Збіжність експериментальних і розрахункових результатів показана на мал.

7.

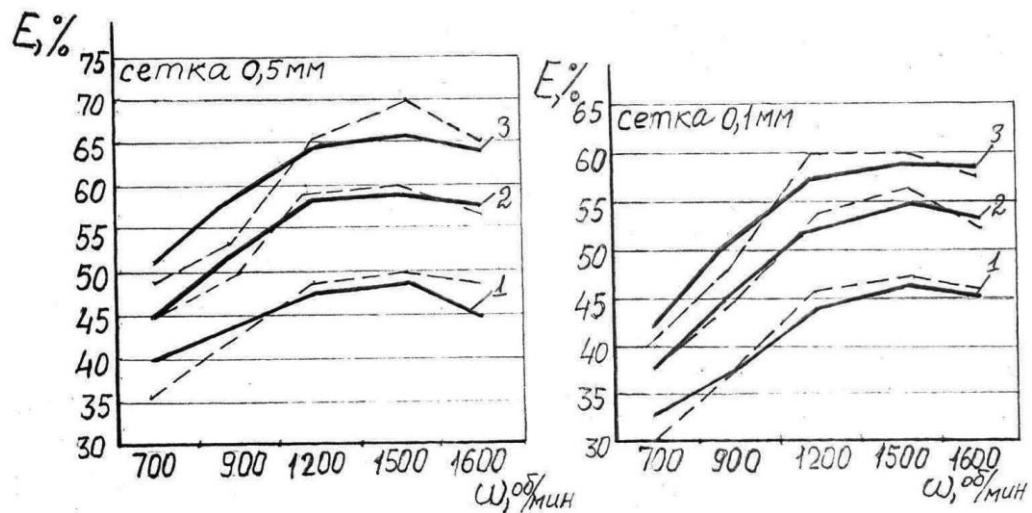


Рис. 3.7 - Залежність ефективності грохочення

від частоти коливань короба грохоту  $\hat{E} = f(\gamma, \omega, a)$

Коливання навантаження на грохот позначаються на його ефективності, характер такої залежності визначався експериментально й розраховувався регресійною моделлю в виді:

$$\hat{E} = f(\gamma, q) \text{ при } a = 0,5 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(\gamma, q) \text{ при } a = 0,1 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(a, \gamma, q).$$

Результати розрахунків зведені у таблицю 3.17-3.19 й ілюструються графіками на рис. 3.8.

Таблиця 3.18 - Розрахунок параметрів залежності  $\hat{E} = f(\gamma, q)$

| $a$ , мм | $a_0$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$   | $R^2$  | $F$    |
|----------|--------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 0,51     | 61,541 | 4,581 | 2,081 | -5,931 | 0,2441  | 0,9811 | 172,21 |
| 0,11     | 53,51  | -4,51 | 5,731 | -2,831 | -0,1961 | 0,9851 | 210,51 |

Таблиця 3.19 - Розрахунок параметрів для залежності

$$\hat{E} = a_0 + a_1 a + a_2 \gamma + a_3 \gamma^2 + a_4 q + a_5 q^2 \quad (3.17)$$

| $a_0$  | $a_1$  | $a_2$  | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$   | $R^2$  | $F$     |
|--------|--------|--------|-------|-------|---------|--------|---------|
| 48,231 | 30,971 | -1,461 | 3,911 | -4,38 | 0,02381 | 0,9951 | 1187,91 |

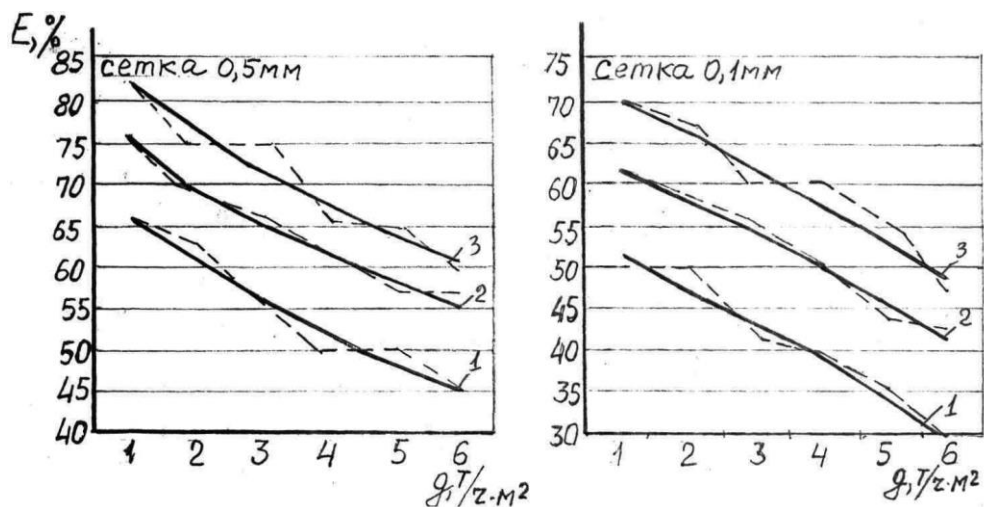


Рис. 3.8 - Залежність ефективності грохочення

від питомого навантаження на грохот  $\hat{E} = f(\gamma, q, a)$

Залежність тонкої класифікації від довжини поверхні грохоту, експериментально отримана методом багатократного повернення надрешетного продукту із розвантажувальної частини ув завантаження. Результати експериментів на рис. 3.9, а модельне представлення - розраховувалося регресійними моделями у виді:

$$\hat{E} = f(\gamma, L) \text{ при } a = 0,5 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(\gamma, L) \text{ при } a = 0,1 \text{ мм};$$

$$\hat{E} = f(a, \gamma, L).$$

Результати розрахунків зведені у таблицю 3.20 і 3.21.

Таблиця 3.20 - Розрахунок параметрів залежності  $\hat{E} = f(\gamma, L)$

| $a$ , мм | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$  | $a_3$  | $a_4$  | $R^2$ | $F$    |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 0,51     | 12,81  | -7,51  | 4,171  | 15,911 | -1,321 | 0,991 | 365,6  |
| 0,11     | -5,821 | 13,751 | -1,561 | 11,341 | -0,961 | 0,984 | 194,11 |

Таблиця 3.21 - Розрахунок параметрів для залежності

$$\hat{E} = a_0 + a_1 a + a_2 \gamma + a_3 \gamma^2 + a_4 L + a_5 L^2$$

| $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$ | $a_5$    | $R^2$ | $F$     |
|--------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|
| -4,381 | 26,251 | 3,125 | 1,3011 | 13,63 | -1,14111 | 0,966 | 171,911 |

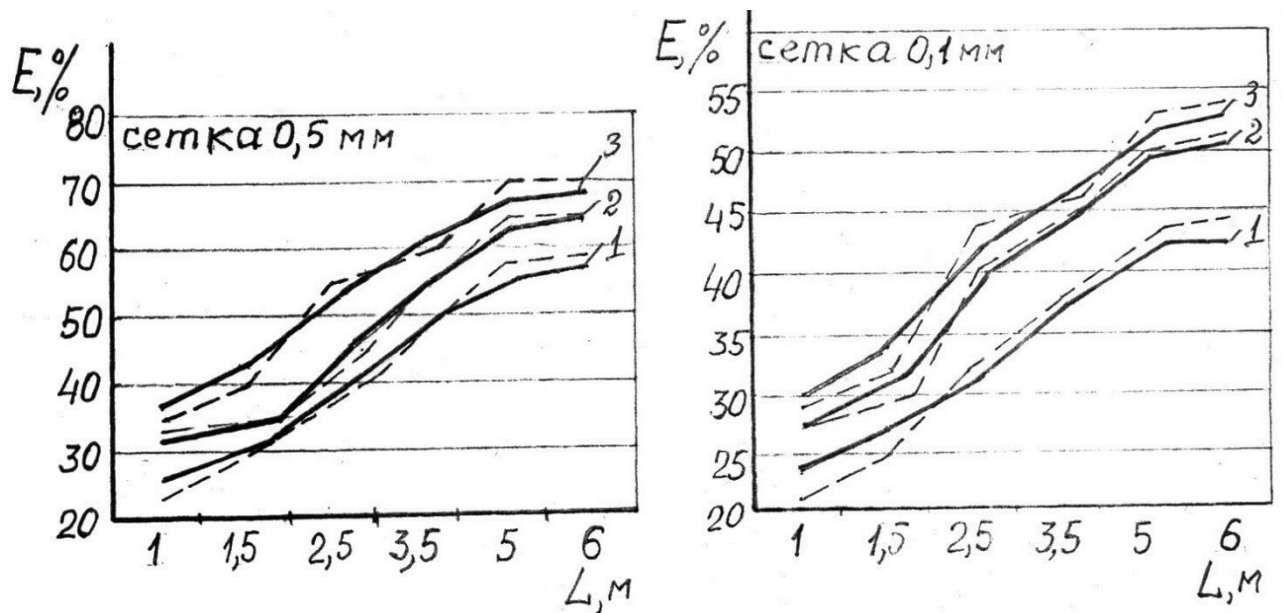


Рис. 9 - Залежність ефективності грохочення від довжини просіюючої поверхні  
 $\hat{E} = f(\gamma, L, a)$

Таким чином, експериментальні дослідження тонкого просіювання трьох компонентів базальтової гірської маси та їх ідентифікації встановили наступне:

1. Аналіз отриманих регресійних моделей та представлених результатів розрахунків показує, що коефіцієнт детермінації перевищує 0,9 у всіх розглянутих випадках та близький до одиниці в кількох випадках. Отже, коефіцієнт множинної кореляції перевищує 0,95 для всіх моделей, що вказує на сильну кореляцію між ефективністю просіювання та факторами, включеними до регресійних моделей.

2. F-статистика Фішера перевищує критичне значення у всіх випадках, що вказує на хорошу відповідність прийнятих моделей. Цей висновок також ілюструється кривими залежності, де експериментальні дані добре узгоджуються з розрахунковими. Отримані криві, таким чином, можуть бути використані для обґрунтування параметрів процесу тонкого вібраційного просіювання під час підготовки базальтової руди до комплексної переробки. 3. Величина та знак коефіцієнтів регресії для кожного фактора вказують на ступінь впливу на ефективність тонкого просіювання, що дозволяє прийняти правильне

рішення при виборі параметрів обладнання в технологічній схемі підготовки базальтової руди до комплексної переробки.

#### **4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЛАСИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ МЕТОДОМ ВІДСАДЖЕННЯ**

Вищеописані процеси включають суху підготовку руди для отримання концентрату важких металів (дроблення, подрібнення, просіювання), а потім екстракцію (магнітне та електричне розділення) трьох компонентів базальтової сировини: базальту, лавової брекчії та туфу.

Використання мокрого процесу класифікації, зокрема седиментації, не виключається, оскільки експлуатована частина кар'єру містить значні запаси води, що походять з прихованих розломів та дренажних тріщин. Ця вода використовується для зрошення навколишніх сільськогосподарських угідь. Однак, частина цієї води, в замкнутому циклі, може бути використана без шкоди для навколишнього середовища. Тому план дослідження включає використання седиментації для розділення силікатної та металоносної фракцій переробленої руди.

Метою цього дослідження було визначити доцільність класифікації порід базальтових родовищ методом седиментації. Особлива увага приділяється видобутку самородної міді, одного з найцінніших металів, що містяться в базальтовій сировині.

Класифікація мідних руд методом седиментації є поширеним методом, що використовується майже у всіх гірничодобувних операціях. Оскільки в цьому процесі розділення частинок у водному середовищі базується на щільності, цей метод є перспективним у цьому конкретному випадку, оскільки контраст щільності між породами-вміщачами та видобутими мінералами близький до 3,0. Три основні компоненти базальтового масиву (базальт, туф та лавова брекчія) були досліджені, оскільки вони містять титаномagnetитову мінералізацію та включення самородної міді. Наявність залізної мінералізації з щільністю, близькою до щільності міді, є основною проблемою при видобутку міді седиментацією. Дослідження проводилися в лабораторії з використанням відсаджувальної машини, оснащеної рухомим ситом для створення коливань у

підсїтчастому водному середовищі. Робоча камера лабораторної відсаджувальної машини мала розміри 350 × 1400 мм. Промита гірська маса з розміром частинок від 25,0 мм до 3,0 мм піддавалася відстоюванню; дрібніші частинки видалялися шляхом просїювання на вібраційному грохоті перед відстоюванням. Підготовлену до процесу гірську масу (окремо туф, базальт та лавова брекчія) розділяли просїюванням на дві фракції: грубу ( $25 \pm 10$  мм) та дрібну ( $10 \pm 3,0$  мм). Для розрідження верхнього шару сита під час відстоювання грубої та дрібної фракцій під сито додавали воду у співвідношенні Т:Ф 1:2 (за вагою). Збільшення кількості рідини у верхньому шарі, особливо під час відстоювання дрібних фракцій, призводить до порушення стратифікації частинок та вимивання зростань. Як штучне основання для великих зміщень використовували сталеві кульки, а для малих – гранули залізної руди, попередньо відкалібровані на ситі. Товщину верхнього шару визначали експериментально: від 50 до 70 мм для базальту, від 60 до 70 мм для лавової брекчії та до 100 мм для туфу. Технологічна складність процесу полягає в тому, що, окрім включень самородної міді, три досліджувані типи гірських порід мають високий вміст заліза (55% у базальті, 54% у туфі та 33% у лавовій брекчії), магніточутливого компонента. Його щільність близька до щільності міді. У лабораторії розділення за допомогою магнітного сепаратора можливе лише в меленому вигляді. Отже, після декантації отриманий промисловий продукт містить високу частку титаномagnetиту та мідно-орієнтованих мінералів. Однак ця операція рекомендується для відділення хвостів. Після подальшого подрібнення (для зменшення кількості зростань) промислового продукту необхідно розділити магнітну фракцію магнітним сепаратором, а немагнітну фракцію електросепарацією для отримання мідного концентрату. Результати випробувань, проведених на декантаційній машині, представлені в таблиці 22 (середньостатистичні результати). Маса матеріалу, що одночасно вводилася в машину, становила 15 кг. Вихід промислового продукту був зафіксований.

Промислова перевірка лабораторних досліджень, проведених на родовищі, буде здійснюватися безпосередньо на місці видобутку, в умовах Рафалівського базальтового кар'єру, де планується створення науково-виробничого комплексу для

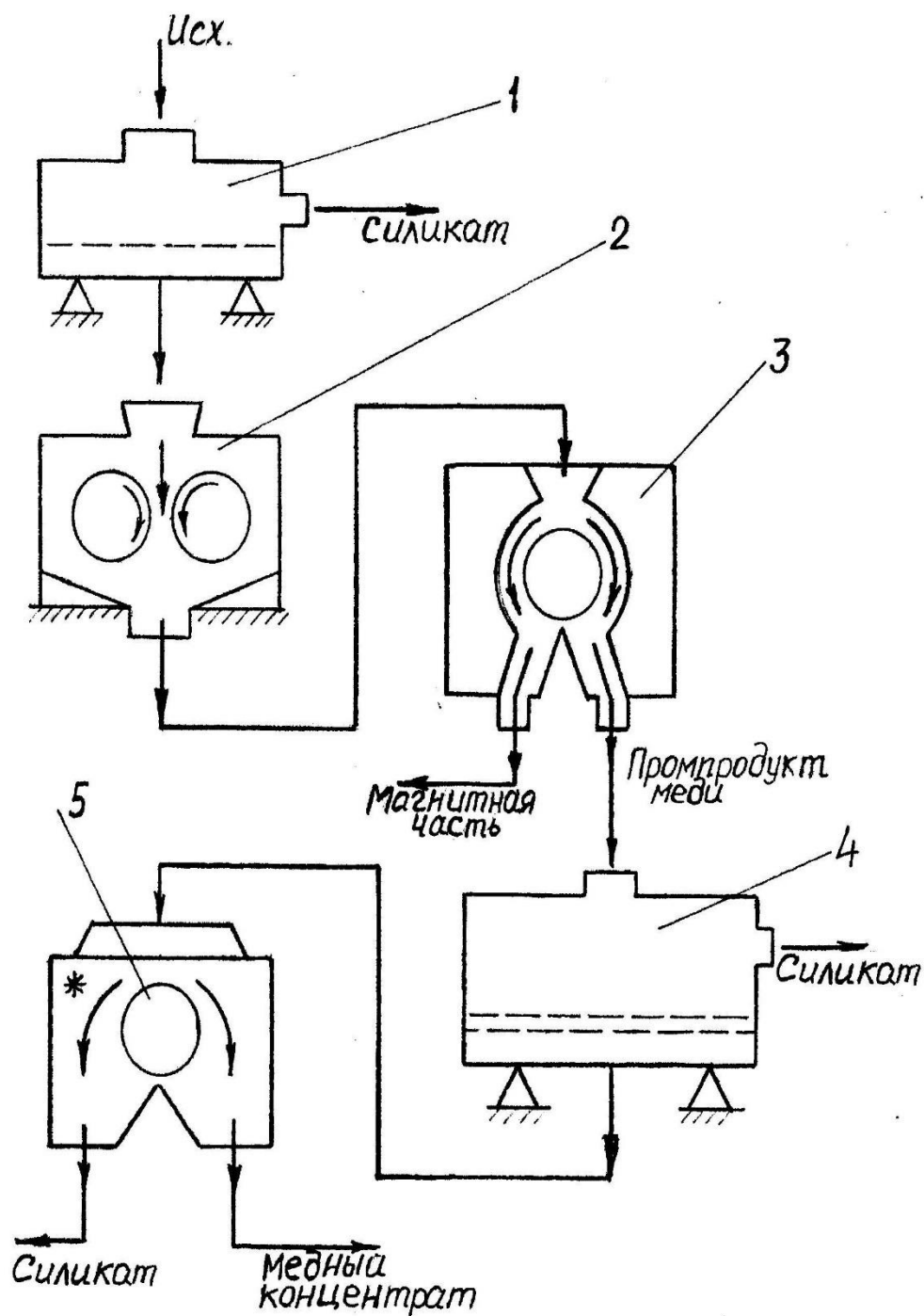
комплексної переробки базальту. Три основні типи вміщувальних порід у базальтовому масиві демонструють високу магнітну сприйнятливість через високий вміст титаномagnetиту. У зразках з Рафалівського кар'єру базальт містить до 55% магніточутливого матеріалу, лавова брекчія – до 33%, а туф – 54%. Самородна мідь присутня в базальті (0,4%), лавовій брекчії (до 4,0%) та туфі (0,7%). Оскільки кар'єр має значний запас дренажу підземних вод, що поповнюється його експлуатацією, може бути реалізована експлуатація родовища з використанням оборотної води.

Таблиця 4.1 - Дослідження по відсадженню порід базальтового родовища

| Тип гірської маси | Крупне відсадження                          |                            |                                      | Дрібне відсадження                        |                           |                                      |
|-------------------|---------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
|                   | Товщина надпостільного шару матеріалу<br>мм | Частота пульсацій, кіл./хв | Вихід важкої фракції(про мпродукт) % | Товщина надпостільного шару матеріалу, мм | Частота пульсацій кіл./хв | Вихід важкої фракції(про мпродукт) % |
| Базальт           | 120                                         | 45                         | 59,11                                | 100                                       | 40                        | 56,31                                |
| Туф               | 100                                         | 30                         | 55,21                                | 81                                        | 30                        | 52,11                                |
| Лавобрекчія       | 120                                         | 45                         | 37,21                                | 100                                       | 40                        | 32,21                                |

Після досліджень, проведених на передпроектній фазі, та створення комплексного майданчика переробки базальтової породи та техногенних відходів з Рафалівського базальтового кар'єру, пропонується використовувати операції грубого та дрібного осадження для відділення металевої фракції від породи. Це рішення пропонує альтернативу сухому процесу. Враховуючи умови ділянки та наявність значного резервуару дренажних вод з виснаженої ділянки кар'єру, можна розглянути методи мокрого збагачення в теплі місяці. Розробка обох методів планується на передпроектній фазі. Ключовим фактором у цьому виборі є наявність у подрібненій породі до магнітного та електричного розділення значної кількості дрібних силікатних частинок (пили), що ускладнює роботу сепараторів та знижує їх ефективність. Під час осадження ці частинки відокремлюються як легша фракція. Схематичне рішення

технологічної ділянки з використанням осадження показано на рисунку 10. Вихідна гірська маса, після дроблення та просіювання, направляється до грубого відстійника 1, де попередньо відокремлюється силікатна фракція. Промисловий продукт, що складається з усієї металевої фракції (залізо, мідь), отримують після подрібнення у вальцювому млині 2



1 -

3 – магнітний сепаратор; 4 - машина для дрібного відсадження;

5 – електричний сепаратор

Рис. 10 - Схема ділянки відсадження гірської маси

продукт потрапляє до магнітного сепаратора 3, де магніточутлива фракція (залізо) відділяється від немагнітної фракції (мідь, мідні включення та силікати). Остання потім очищується на відсаджувальній машині 4. Легка фракція, що утворюється в результаті відсадження, у вигляді силікатів зберігається, а важка фракція мідного концентрату подається до електросепаратора 5 для остаточного очищення.

Таким чином, метод декантації дозволяє витягувати металеву мінералізацію з базальту відкритого видобутку або його хвостових відвалів, а також самородні мідні включення та окремі мідні самородки. Мінімальний розмір частинок вихідного промислового продукту для декантації становить  $\pm 3,0$  мм. Вихід вилучення важкої фракції становив від 37 до 60% при великій кількості декантованої сировини та від 32 до 56% при малій кількості.

Проведені дослідження дозволять кількісно оцінити доцільність використання декантації в комплексній переробці базальтової сировини та рекомендувати її під час проектування процесу.

## 5. ВИДОБУВНІ РОБОТИ

### Методи видобутку корисних копалин

Залежно від цільового призначення сировини, що видобувається з кар'єру, для виробництва певного виду продукції, використовуються різні методи видобутку.

При безпосередньому використанні родовища корисних копалин для виробництва щебеню та щебеню, а також для використання як сировини в петрології, базальт видобувається після попереднього розбирання буровибуховими роботами. На вибоях кар'єрів, де розташовані запаси базальту, роторно-ударні бури СБУ-100Г бурять три, чотири або п'ять рядів стволів діаметром 105 мм на глибину понад 1 м над вибоєм кар'єру (серія з 40-50 стволів). Ці стволи завантажуються вибухівкою та підриваються за допомогою електрично керованої системи затримки спрацьовування, використовуючи піротехнічні сповільнювачі КСДШ, миттєві та затримки спрацьовування електричні детонатори, а також неелектричну систему ініціювання "Імпульс". Вибухові роботи виконує субпідрядник - Рівненський підрозділ BVR (British Village Regulator) державної компанії "Західдорвибухпром".

Видобуток базальту здійснюється циклічним методом за допомогою одноруких екскаваторів Е-2503 та Е-2505 (місткість ковша: 2,5 м<sup>3</sup>) та самоскидів БелАЗ-540 та БелАЗ-548.

Стовпчасті базальти видобуваються методом клинового буріння. Сучасна технологія видобутку блоків з Рафалівського родовища спирається на стовпчасту роздільність базальтів, які мають призматичну або квазіпризматичну конфігурацію в поперечному перерізі. Базальти розрізняються за кількістю граней:

- чотиригранні;
- п'ятикутні, іноді з парними паралельними гранями;
- семикутні з неправильними гранями.

Переважають шестигранні форми. Так, зі 100 колон 70 є шестигранними. Висота стовпів варіюється від 3 до 22 м. Розвиток похилих та горизонтальних

тріщин фрагментує стовпи на великі секції, довжиною від 0,5 до 1,5 м та шириною від 3 до 4 м. У поперечному перерізі максимальна ширина стовпів сягає 0,6 до 1,2 м, переважно від 0,8 до 1,0 м.

Спираючись на свій досвід, компанія використовує базальтові стовпи з прямими виходами (вертикальними, косими) для виробництва блоків, а не стовпи з радіально-радіальними або слабоорієнтованими виходами.

Метод відділення блоків від масиву шляхом з'єднання використовує перевагу легкості, з якою окремі стовпи можна розділити вздовж горизонтальних площин, і включає такі операції:

Буріння основи колони, призначеної для обвалення, за відсутності горизонтальної тріщини у фундаментному ложі. Буріння виконується ручним буром ПР-20. Отвори свердляться на половину ширини колони, розташовані на відстані 15-20 см один від одного. У просвердлені отвори вздовж передбачуваної лінії розколу вставляються лопаті, а потім рівномірно ударяються молотком до появи тріщини.

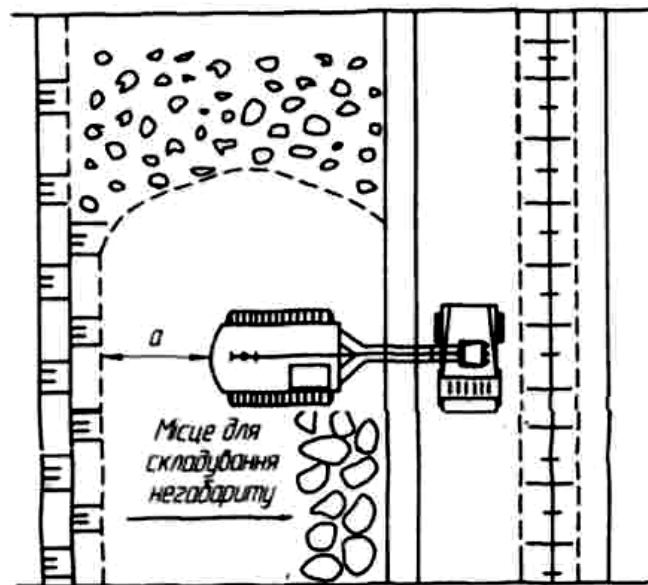
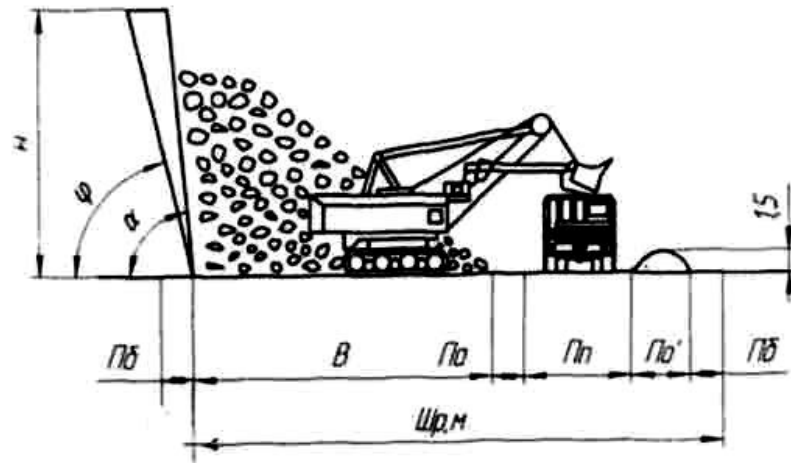
Свердлення отвору у вертикальній площині колони, позначеної для відділення від фундаменту. Цей отвір, глибиною 15-20 см, свердлиться за допомогою верстата СБУ-100.

Вставлення металевго стрижня в просвердлений отвір з подальшим кріпленням троса.

Витяг колони з фундаменту за допомогою бульдозера та троса з подальшим її обваленням на основу відокремленої колони. Колона руйнується на пухкий щебінь.

Після візуального огляду обвалена колона розділяється на цінні блоки на основі природного малюнка тріщин. Розколювання також проводиться методом Буроклінова з отворами довжиною 15-20 см.

## Паспорт видобувного вибою



Екскаватор – електричний Е-2503; автосамоскиди – БелАЗ-540; корисна копалина – базальт.

## Параметри вибою

| Параметри | Позначення | Розмір |
|-----------|------------|--------|
|-----------|------------|--------|

|                                                              |             |       |
|--------------------------------------------------------------|-------------|-------|
| Висота уступу                                                | Н           | 10    |
| Ширина робочого майданчика                                   | $\Pi_{p.m}$ | 34,11 |
| Повна ширина розвалу гірничої маси                           | В           | 18,21 |
| Ширина проїздної частини                                     | $\Pi_{п}$   | 11,01 |
| Ширина узбіччя з нагорної сторони                            | $\Pi_0$     | 1,51  |
| Ширина призми обвалення                                      | $\Pi_6$     | 1,91  |
| Кут робочого відкосу                                         | $\alpha$    | 80    |
| Кут стійкого відкосу                                         | $\varphi$   | 70    |
| Ширина узбіччя з низької сторони                             | $\Pi_0'$    | 1,51  |
| Відстань між нижньою бровкою уступу і контрвагою екскаватора | $a$         | 1,01  |

## ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено залежності ефективності та продуктивності під час тонкого сортування трьох компонентів базальтової сировини від робочих та конструктивних параметрів вібраційного грохота.

Шляхом регресійного аналізу отриманих результатів встановлено залежність ефективності тонкого сортування від найбільш впливових факторів, що впливають на параметри процесу: кута нахилу збурювальної сили збудника вібраційного грохота  $\beta$ , кута нахилу грохота  $\alpha$ , розміру комірки сита  $\Delta$ , питомого навантаження  $q$ , частоти збурень приводу грохота  $\omega$  та довжини робочого органу  $L$ . На основі цього отримано загальну модель залежності ефективності просіювання, що враховує задані фактори.

2. Експериментально визначено вплив робочих та конструктивних параметрів грохота на технологічні показники під час тонкого сортування базальтової сировини. Регресійний аналіз отриманих результатів встановив залежність продуктивності та ефективності просіювання базальтової сировини, для класів розміру частинок 0,5 мм та 0,1 мм, від їхньої щільності  $\gamma$ , кута нахилу збурюючої сили  $\beta$ , кута нахилу грохота  $\alpha$ , розміру вічка опорного сита  $\Delta$ , питомого навантаження  $q$ , частоти коливань просіювальної камери  $\omega$  та її довжини  $L$ .

3. На основі статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень було встановлено багатофакторну регресійну залежність між ефективністю тонкої та дрібної вібраційної класифікації подрібненої та меленої базальтової сировини, для класів розміру частинок від 3,0 до +0,1 мм. Ця залежність характеризується квадратичною залежністю від амплітуди та частоти коливань просіювальної поверхні, довжини та кута нахилу грохота, питомого навантаження, розміру вічка грохота та щільності компонентів базальтової сировини.

4. Експериментально визначено ефективність класифікації трьох видів базальтової сировини методом седиментації у випадку мокрої класифікації процесу відділення важкої фракції від силікатної фракції та встановлено ефективність використання цього процесу в технологічній схемі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Надутый В.П. Закономірність розміщення самородної міді в базальтовій лавобрекчії при різному її гранулометричному складі / В.П. Надутый, З.Р. Малан-чук, Т.Ю. Гринюк, С.Є. Стець // Вісник Національного університету водного госпо-дарства та природокористування : 36. наук, праць. – Рівне, 2005. – Вип. 4(32). – С. 215-220.

2. Надутый В.П. Результаты предварительных исследований медьсодержащих базальтов Волыни на технологичность переработки / В.П. Надутый, Т.Ю. Гринюк // Матер. VI Промышленной конф. "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях" : п. Славское-Киев, 2006. – С. 156-157.

3. Malanchuk E.Z. The results of studies of the distribution of native copper in rock mass Volhynia (Ukraine). Has participated successfully in the 1<sup>st</sup> International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Ocean Countries» Held in Tokyo, Japan, 25 october 2014.

4. Прокопюк О.М. Ресурсосберегающая технология добычи тяжелых металлов из базальта / Прокопюк О.М., Маланчук Є.З. // Тези доп. на міжнар. наук. конф. «Высокоэффективные и ресурсосберегающие методы переработки природного и искусственного сырья, новые химические технологии». – Росія, Томськ, 2013. – С. 41-42.

5. Прокопюк О.М. Перспективи розвитку гірництва в Рівненсько-Волинському регіоні України / Прокопюк О.М., Мланчук Е.З., Боблях С.Р., Рачковський В.П. // Тези доп. IX міжнар. промисл. конф. "Ефективність реалізації наукового, ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах", с. Славське, Карпати. – 2009. – С. 364-365.

6. Справочник по петрографии Украины (магматические и метаморфические породы) / [под ред. чл.-корр. АН УССР И.С. Усенко]. – К.: Наук думка, 1975. – 579 с.

7. Мельничук В.Г. Порівняльна характеристика Волинського та Мічманського міднорудних районів / В.Г. Мельничук // Матер. III наук.-виробн.

наради геологів-зйомщиків України "Сучасний стан і задачі розвитку районних геологічних досліджень". – Львів, 2005. – С. 183-187.

8. Пересадько М.П. Самородне зруденіння у трапах Волині / М.П. Пересадько, Я.О. Косовський // Матер. III наук.-виробн. наради геологів-зйомщиків України "Сучасний стан і задачі розвитку районних геологічних досліджень". – Львів, 2005. – С. 205-206.

9. Булат А.Ф. Перспективы комплексной переработки базальтового сырья Волыни / А.Ф. Булат, В.П. Надутый, З.Р. Маланчук // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 3-7.

10. Закономірності розміщення самородної міді в базальтовій лавобрекчії / В.П. Надутый, З.Р. Маланчук, Т.Ю. Гринюк, С.Є. Стець // Вісник НУВГП : Зб. наук. праць. – Рівне, 2005. – Вип. 4(30). – С. 210-220.

11. Типи самородномідної мінералізації в трапах Волині та оцінка їх перспективності / В.Г. Мельничук, Я.О. Косовський, В.Л. Приходько, В.В. Матеюк // В кн.: "Геологічна наука та освіта в Україні на межі тисячоліть: стан, проблеми, перспективи" // Матер, наук. конф. – Львів: ЛНУ, 2000. – С. 117-122.

12. Маланчук З.Р. Научные основы скважинной гидротехнологии / З.Р. Маланчук. – Ровно: РГТУ, 2002. – 367 с.

13. Маланчук З.Р. Метод скважинной гидродобычи железных ископаемых из трещиноватых подстилающих пород / З.Р. Маланчук. / Вестник УГУВХП. Сб. науч. тр. – Ровно: УГУВХП, 2003. – Вып. № 6(19). – С. 307-317.

14. Черней Э.И. Принципы Концепции комплексного промышленного освоения недр Ровенской области / Э.И. Черней, Р.М. Постоловский, З.Р. Маланчук // Вестник РГТУ: Сб. науч. тр. – Ровно: РГТУ, 2000. – Вып. № 2. – С. 107-113.

15. Матеюк В.В. Досвід вивчення базальтових потоків у трапах Волині при геологічній зйомці та пошуках родовищ самородної міді / В.В. Матеюк, В.Г. Мельничук / В кн.: Регіональні геологічні дослідження в Україні і питання створення "Держгеолкарти-2000". – Київ: Геоінформ, 2001. – С. 168-170.

16. Мельничук В.Г. Міденосні лавобрекції в трапах Волині та механізм їх утворення / В.Г. Мельничук, В.В. Матеюк, Я.О. Косовський, М.В. Федорчук // В кн.: Геологічна наука та освіта в Україні на межі тисячоліть: стан, проблеми, перспективи" // Матер, наук. конф. – Львів: ЛНУ, 2000. – С. 115-116.

17. Корецький М.К. Перспективи видобутку міді та супутніх матеріалів в Рівненсько-Волинському регіоні України / М.К. Корецький, Є.З. Маланчук // Вісник НУВГП : Зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Вип. 1(61). – С. 3-11.

18. Маланчук З.Р. Особливості складу та будови цеоліт-сметитових туфів у кар'єрах Рівненсько-Волинського регіону / З.Р. Маланчук, В.П. Рачковський, С.Є. Стець, С.Р. Боблях // УІЦ "Наука. Техніка. Технологія". – Київ, 2006. – С. 109-110.

19. Боблях С.Р. Область використання цеоліт-сметитових туфів у народному господарстві / С.Р. Боблях // УІЦ "Наука. Техніка. Технологія". – Київ, 2006. – С. 22-23.

20. Надутый В.П. Обоснование необходимости комплексной переработки цеолит-сметитовых туфов Волини / В.П. Надутый, З.Р. Маланчук, О.Н. Прокопюк // Матер. Міжнар. конф. "Форум гірників-2010" / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ: Геологія, 2010. – С. 50-55.

21. Надутый В.П. Исследование влияния влаги на прочностные характеристики туфа подземной добычи / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, О.Н. Прокопюк // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 90. – С.174-179.

22. Надутый В.П. Результаты исследований разупрочнения туфа в отвалах базальтовых карьеров / В.П. Надутый, О.Н. Прокопюк, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 89. – С.120-126.

23. Стець С.Є. Класифікація родовищ туфів за фізико-хімічними властивостями та мінералогічним складом / С.Є. Стець / Матер. V1 ежегодной

промышленность. конф.: Спасское. УИЦ "Наука. Техника. Технология". – Киев, 2006. – С. 191-196.

24. Маланчук З.Р. Основні фізико-хімічні та технологічні властивості туфів Рівненщини / З.Р. Маланчук, Т.Ю. Гринюк, Р.В. Жомирук, С.Є. Стець, В.П. Рачковський // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 59. – С.106-114.

25. Маланчук Е.З. Исследование обогатимости вмещающих пород базальтового месторождения методом отсадки / Е.З. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Конф. молодых ученых / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 192-195.

26. Надутый В.П. Результаты экспериментальных исследований закономерностей распределения грансостава по классам крупности при дроблении и измельчении туфа / В.П. Надутый, О.Н. Прокопюк, Т.Ю. Гринюк // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 91. – С.73-77.

27. Надутый В.П. Разработка математической модели разрушения туфа при дроблении и измельчении с учетом разупрочнения / В.П. Надутый, А.М. Эрперт, О.Н. Прокопюк // Metallургическая и горнорудная промышленность. – № 2. – Днепропетровск. – 2011. – С. 84-85.

28. Надутый В.П. Исследование магнитной восприимчивости цеолит-сметитовых туфов / В.П. Надутый, О.Н. Прокопюк, В.И. Дудник // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 44(85). – С. 103-108.

29. Четверик М.С. Формирование комплексов при технологии предобогащения руды в карьерах / М.С. Четверик, Е.В. Бокий, А.А. Икол // Metallургическая и горнорудная промышленность. – № 3. – 2007. – С. 21-23.

30. Четверик М.С. Технология предобогащения руды в карьерах как перспективное направление добычи бедных руд / М.С. Четверик, Е.В. Бокий // Матер. Міжнар. конф. "Форум гірників" / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 246-253.

31. Четверик М.С. Производственная мощность и технологические комплексы при доработке карьеров, использования их выработанных пространств / М.С. Четверик, О.А. Медведева, Е.А. Ворон / "Горный информационно-технологический бюллетень". XII. – М., 2006. – С. 209-214.

32. Квасниця І.В. Природні мідні кристали України / І.В. Квасниця // Геолог України. – № 1. – 2005. – С. 55-64.

33. Квасниця В.М. До знахідки самородної міді в туфогенних породах Волині / В.М. Квасниця, В.А. Нестеровський, В.І. Павлишин / Мінеральний журнал. – № 4. – 2000. – С. 20-24.

34. Маланчук Є.З. Результати дослідження розташування самородної міді в базальтовій гірській масі Рафалівського рудного вузла / Є.З. Маланчук // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. пр. / ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ, 2012. – Вып. 104. – С. 198-204.

35. Ходжаев Н.Т. Оценка месторождений и проявлений пород группы базальта РУ<sub>3</sub> для производства супертонкого базальтового волокна / Н.Т. Ходжаев. – Ташкент: фонды ИМР, 2008. – 97 с.

36. Сулейменко Л.И. Основы технологии тугоплавких неметаллических силикатных материалов / Л.И. Сулейменко. – М.: РХТУ им. Менделеева Д.И., 2000. – 248 с.

37. G.H. Beall, L.R. Pinckney. Nanophays Glass – Ceramics// J. Am. Ceram. Soc. – 2009. – V. 82. – Nol. –P. 63-73.

38. L.R. Pinckney, G.H. Beall. Nanocrystalline non – alkali glass – ceramics.// J. of Non – Crystalline Solids. 2007. – P. 219-227.

39. L.R. Pinckney. Transparent high strain point spinal glass – ceramics// J. of Non – Crystalline Solids. 2009. – V. 255. – P. 171-177.

40. Маланчук З.Р. Гідровидобуток корисних копалин : навчальний посібник / З.Р. Маланчук, С.Р. Боблях, Є.З. Маланчук. – Рівне : НУВГП, 2009. – 280 с.

41. Жомирук Р.В. Основи автоматизації гірничого виробництва : Навчальний посібник / Жомирук Р.В., Маланчук Є.З. // НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2009. – 373 с.

42. Маланчук Є.З. Автоматичне управління процесом гідровидобутку мідевісних порід / Тез. доповіді XIII Міжнар. промислової конф. "Матеріали, методи, технології". – Київ, 2013. – С. 157-158.

43. Рудик А.В. Проектування пристроїв автоматизації : Навчальний посібник / А.В. Рудик, Я.В. Данченков, Є.З. Маланчук // НУВГП – Рівне : НУВГП, 2014. – 194 с.

44. Дворкін Л.Й. Базальтові туфи – перспективна сировина для будівельних керамічних виробів / Дворкін Л.Й. // Вісник РДТУ : Зб. наук, праць. – Рівне: РДТУ, 2001. – Вип. 3(10). – С. 110-116.

45. Дворкин Л.И. Базальто-туфовая керамика / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, И.Г. Скрипник, Л.И. Нихаева // Вісник УДУВГП : Зб. наук, праць. – Рівне, 2002. – Вип. 4(7). – С. 159-165.

46. Надутый В.П. Модельное представление закономерностей разрушения туфа при дроблении и измельчении с учетом разупрочнения / В.П. Надутый, А.М. Эр-перт, О.Н. Прокопюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – . Вип. 2. – 2011. – С. 84-86.

47. О применении цеолитов в земледелии ряда зарубежных стран : Информационный материал / Всесоюзный НИИ информации и технико-экономических исследований АПК. – М., 1988. – 11 с.

48. Сорока М.П. Використання вулканічних туфів Рівненщини в годівлі сільськогосподарських тварин / М.П. Сорока, В.М. Польовий // Вісник аграрної науки. – 2004. – № 5. – С. 42-44.

49. Кисель А.И. Влияние цеолита на свойства дерново-подзолистой почвы и урожай кукурузы, выращиваемой бессменно / А.И. Кисель // Земледелие. – 1985. – Вип. 60. – С. 59-61.

50. К вопросу об использовании в земледелии цеолитов : Информационный материал / Всесоюзный НИИ информации и технико-экономических исследований АПК. – М., 1988. – 13 с.

51. Мороз О.С. Покращення стану ґрунтів поліської зони, забруднених радіо-нуклідами / О.С. Мороз // Вісник РДТУ :Зб. наук, праць. – Рівне : РДТУ, 1999. – Вип. 2, Ч. 1. – С. 73-76.

52. Мельничук В.Г. Туфи Волино-Поділля як новий вид мінеральних ресурсів / В.Г. Мельничук, В.В. Матеюк // "Проблеми раціонального використання, охорони і відтворення природно-ресурсного потенціалу України" : Тези II Всеукр. наук.-метод. конф. – Чернівці : Рута, 2000. – С. 133-134.

53. Мельничук В.Г. Мінеральні ресурси трапової формації Волині / В.Г. Мельничук // Матер. наук. конф. "Природні ресурси Волині. Результати фундаментальних досліджень (1999-2003 р. р.)" / Науковий вісник Волинського державного університету. – Луцьк, 2004. – Вип. 1. – С. 90-92.

54. Жомирук Р.В. Методи захисту навколишнього середовища від забруднення відходами гірничого виробництва / Р.В. Жомирук, С.К. Матус, Д.А. Рокочинський // Тези доп. Міжнар. пром. конф. "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях". – с. Славське, Карпати, 2007. – С.79-81.

55. Стець С.С. Методика вибору параметрів процесу гідророзмиву цеоліт-сметитового туфу / Стець С.С, Калько А.Д. // Тези доп. Міжнар. пром. конф. "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях", с. Славське, Карпати, 2008., С. 388-390.

56. Патент № 42102. Україна. Спосіб очистки води промислової каналізації атомних електростанцій. Маланчук З.Р., Рокочинський А.М., Окунєва І.Г., Жомирук Р.В. Заявка № u200900019. Заявл. 05.01.2009, Опубл. 25.06.2009, Бюл. №

57. Клименко М.О. Утилізація твердих побутових відходів : Навчальний посібник / М.О. Клименко, А.М. Рокочинський, О.О. Бедункова, Р.В. Жомирук, С.Ю. Громаченко. – Рівне, 2010. – 304 с.

58. Методические рекомендации по применению цеолитов в кормлении сельскохозяйственной птицы / Укрнииптицеводства ЮОВАСХНИЛ. – Харьков. –1985. – 15 с.

59. Стащук В.А. Защита от загрязнений ландшафтов отходами с использованием сорбентов : Монография / В.А. Стащук, А.Н. Рокочинский, Н.О. Клименко. – Херсон: Изд. Гринь Д.С., 2014. – 419 с.

60. Надутый В.П. Исследование магнитной восприимчивости цеолит-сметитовых туфов / В.П. Надутый, О.Н. Прокопюк, В.И. Будник // Збагачення корисних копалин : Зб. наук, праць / НГУ. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 44(85) – С. 103-108.

61. Маланчук Є.З. Математичне моделювання процесу розкладки мідевмісної гірської породи / Є.З. Маланчук, С.Є. Стець, О.М. Прокопюк // Вісник НУВГП : Зб. наук, праць. – Рівне, 2009. – Вип. 4(48). – С 216-223.

62. Надутый В.П. Определение элементного состава вскрышных и основных пород Рафаловского базальтового карьера / В.П. Надутый, Е.З. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук, праць. / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 68. – С. 28-32.

63. Гринюк Т.Ю. Характеристика покладів міді в Рівненсько-Волинському регіоні / Т.Ю. Гринюк, Р.П. Рачковський, С.Р. Боблях, Є.З. Маланчук // Вісник Наці-онального університету водного господарства та природокористування: Зб. наук, праць. – Рівне, 2006. – Вип. 3(35). – С 217-225.

64. Гринюк Т.Ю. Експериментальні дослідження фізичних властивостей міде-вмісних порід Волині / Т.Ю. Гринюк, В.О. Козяр, О.М. Прокопюк // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук, праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. По-лякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 85. – С. 270-274.

65. Маланчук Є.З. Технологія і керування гідровидобутком корисних копалин : Монографія / З.Р. Маланчук, А.Д. Калько, Р.В. Жомирук, С.Є. Стець // Рівне : НУВГП, 2009. – 480 с.

66. Козяр В.О. Моделювання процесу підземного вилуговування міді / Козяр В.О., Маланчук Є.З. // Зб. наук. пр. «Процеси і методи видобутку та переробки корисних копалин». – Мінськ, 2012. – С.166-171.