

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ДРЕШПАК ОЛЕКСАНДР СТАНІСЛАВОВИЧ**

**УДК 622.741.2 (043.3)**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ СИРОВИНИ  
НЕОДНОРІДНИХ ВАПНЯКОВИХ РОДОВИЩ**

**05.15.08 – Збагачення корисних копалин**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Дніпро – 2019**

**Дисертацією є рукопис.**

Роботу виконано на кафедрі технологічного інжинірингу переробки матеріалів Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
**Пілов Петро Іванович,**  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри технологічного інжинірингу  
переробки матеріалів.

**Офіційні опоненти:**

– доктор технічних наук, професор  
**Надуть Володимир Петрович,**  
Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова  
НАН України (м. Дніпро), завідувач відділу механіки  
машин і процесів переробки мінеральної сировини;

– кандидат технічних наук, доцент  
**Скляр Людмила Василівна,**  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри збагачення корисних копалин і хімії.

Захист відбудеться «\_\_\_» грудня 2019 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600 м. Дніпро, пр. Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600 м. Дніпро, пр. Яворницького, 19.

Автореферат розіслано «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.02,  
кандидат технічних наук, доцент

О.О. Борисовська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Широке використання вапняків в промисловості і сільському господарстві вимагає залучення в переробку сировини неоднорідних карбонатних родовищ, яка раніше вважалась некондиційною. Підвищення вологості вапняку, що підлягає грохоченню, призводить до комкування глини в процесі переробки, її налипання на поверхні сит, що знижує ефективність класифікації, а в деяких випадках процес реалізувати не можливо. Мокра переробка неоднорідних вапняків в умовах кар'єру практично не можлива, оскільки у більшості випадків відсутня спроможність забезпечення процесу водою в необхідних обсягах, не можлива утилізація шламів виробництва. Сухі методи переробки сировини, що супроводжуються відокремленням її глинистих часток, недостатньо ефективні і потребують удосконалення. Показники ефективності роботи існуючих пристроїв просівання значною мірою залежать від вологості вихідної сировини. При значній вологості сировини просівання стає неефективним і технологічний процес переривають. Тому необхідно розширення зони ефективної роботи грохотів в умовах підвищеної вологості при сухій переробці сировини.

Автор бачить можливості такого розширення шляхом створення нової конструкції валкового грохота, що забезпечує підвищення стабільності характеристик процесу класифікації і одночасне вирішення завдання відділення глинистих включень від шматків гірської породи.

Таким чином, **наукова задача** проведеного дослідження полягає у встановленні закономірностей, що пов'язують показники ефективності збагачення і класифікації сировини неоднорідних карбонатних родовищ з їх вихідними характеристиками, технологічними і конструктивними параметрами існуючого і новоствореного обладнання, що здійснює його переробку, визначенні на цій основі раціональних параметрів, що забезпечують необхідні показники товарного щебеню.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Базовою для підготовки дисертаційного дослідження є науково-дослідна робота, виконана у відповідності до планів НТУ «Дніпровська політехніка»: «Технологічні основи використання у будівництві механоактивованих та наноструктурних супутніх корисних копалин і відходів гірничометалургійного виробництва» ГП-494 (ДР № 0117U001132, 2017-2019 рр.), в якій автор брав участь як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дослідження полягає в підвищенні показників ефективності збагачення сировини неоднорідних карбонатних родовищ, що здійснюється шляхом її класифікації. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. З урахуванням вимог до товарного вапнякового щебеню, особливостей неоднорідних родовищ вапняків, аналізу структури діючих технологічних ліній збагачення та теоретичних аспектів переробки сировини, визначити недоліки існуючої технології та на їх основі сформулювати задачі дослідження.

2. Визначити зв'язок показника ефективності збагачення вапнякової сировини з результатами її гранулометричного і хімічного аналізів та ефективністю класифікації. Розробити на цій основі математичну модель для прогнозування цього показника, обґрунтувати раціональні режими грохочення, створити методичку розрахунку показників процесу збагачення.

3. Обґрунтувати конструктивне виконання грохота і параметри, що забезпечать його працездатність та підвищення ефективності збагачення сировини.

4. Розробити та здійснити аналіз регресійних математичних моделей для розрахунку ефективності збагачення та класифікації матеріалу при використанні грохота нової конструкції в умовах зміни вологості вихідної сировини.

5. Розробити експериментальний зразок грохота нової конструкції, визначити структуру технологічної лінії збагачення, провести експериментальні дослідження показників ефективності збагачення та грохочення, що підтверджують достовірність наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

**Ідея роботи** полягає в розкритті зв'язків, існуючих між характеристиками вихідної сировини і показниками ефективності процесу збагачення, визначенні на цій основі раціональних режимів класифікації, реалізованих в новій конструкції грохота.

**Об'єкт дослідження** дисертаційної роботи – механічні процеси збагачення при підготовці сировини неоднорідних вапнякових родовищ.

**Предмет дослідження** – режими роботи пристроїв класифікації в технологічних лініях підготовки сировини неоднорідних вапнякових родовищ.

**Методи дослідження.** Для вирішення сформульованих наукових завдань використані: методи однофакторного і багатфакторного регресійного аналізу – для створення стохастичних моделей зв'язку виходу вапняку з його вмістом залежно від розміру розділення; критерій Фішера – для підтвердження адекватності регресійних моделей; критерій Кохрена – для підтвердження однорідності дисперсій; критерій Стюдента – для оцінки значущості коефіцієнтів регресійних рівнянь; метод інтерполяції – для визначення аналітичної залежності; матричний метод – для розрахунку коефіцієнтів регресійних моделей; гранулометричний і хімічний аналізи – для визначення вмісту вапняку в пробах з різним гранулометричним складом та вологістю при проведенні експериментальних досліджень показників ефективності збагачення та грохочення.

### **Наукові положення:**

1. Підвищення ефективності збагачення вапнякової багатокомпонентної сировини шляхом її класифікації досягається вибором раціональної крупності розділення частинок і підвищенням стабільності показника ефективності просівання при зміні вологості сировини.

2. Рациональне значення крупності розділення вапнякової сировини та безперервне очищення поверхні просіювання грохота від налипання частинок матеріалу мілкої фракції реалізується шляхом визначення необхідних конструктивних параметрів (необхідної висоти) пальців валково-пальцевого грохота.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному:

- отримали подальший розвиток регресійні залежності, що зв'язують результати гранулометричного та хімічного аналізів вапнякової сировини з розміром її частинок, що дозволило визначити зв'язки показників ефективності збагачення з характеристиками сировини, отриманими експериментальним шляхом;

- вперше доведено, що ефективність збагачення вапнякової багатокомпонентної сировини шляхом її класифікації при наявності вираженої залежності вмісту вапняку від крупності частинок, залежить від крупності розділення сировини в процесі класифікації та показника ефективності цього процесу, що враховано при виборі підходу до збагачення;

- вперше встановлено, що залежність показника ефективності збагачення вапнякової сировини від крупності її поділу в процесі класифікації має екстремум, причому значення крупності, що відповідає максимальному значенню показника ефективності, не залежить від ефективності класифікації сировини та його доцільно використовувати в діючих технологічних лініях;

- отримали подальший розвиток багатofакторні регресійні залежності для визначення ступеня впливу некерованих в технологічному процесі підготовки вапнякової сировини факторів (вологості сировини, вмісту вапняку) на показники ефективності збагачення і класифікації при використанні валково-пальцевого грохота, що дозволило оцінити ефективність його застосування;

- вперше визначено, що ступені впливу факторів на функції відгуків багатofакторних регресійних моделей відрізняються, причому найбільш впливовим (відносно до вмісту вапняку) є значення вологості сировини, що важливо для визначення пріоритету заходів щодо підвищення ефективності збагачення вапнякової сировини.

**Практичні результати дослідження.** Виконані теоретичні дослідження склали основу для отримання наступних практичних результатів:

1. Розроблена методика розрахунку показників процесу збагачення вапнякової сировини, яка базується на створеній математичній моделі для прогнозування показника ефективності збагачення і дозволяє визначити раціональні режими грохочення. Методика впроваджена у ПАТ «Таврійська будівельна компанія» Тягинський кар'єр, Херсонська область (акт впровадження №88 від 23.05.2018 р.) та у ТОВ «Кар'єр Новосілка», Тернопільська область (акт впровадження № 104 від 10.04.2018 р.).

2. Розроблено спосіб збагачення неоднорідних карбонатних матеріалів, де обґрунтована структура технологічної лінії з валково-пальцевим грохотом (патент на корисну модель №114078).

3. Розроблено конструкцію валково-пальцевого грохота, де визначено положення пальця грохота відносно футерувального валу, що забезпечує безперервне очищення поверхні просіювання від налипання частинок матеріалу мілкої фракції (патент на корисну модель №113996).

4. Розроблено конструкцію валу валково-пальцевого грохота. Розкриті особливості виконання дисків та кріплення пальців, що дозволяє підвищити надійність роботи грохота, скоротити терміни проведення ремонтних робіт (патент на корисну модель №114030).

5. Розроблено експериментальний зразок валково-пальцевого грохота, де реалізовано результати теоретичних досліджень автора в частині конструктивного виконання, режимів роботи грохотів такого типу. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити показники ефективності збагачення і грохочення, побудувати на цій основі регресійні моделі, оцінити ефективність розробленої технології збагачення неоднорідних вапняків.

**Достовірність наукових результатів** визначена відповідністю припущень, прийнятих в багатофакторних математичних моделях процесу збагачення вапняку, сформульованим завданням дослідження, доказом адекватності цих моделей, зіставленням результатів теоретичних і експериментальних досліджень збагачення на вібраційному та валково-пальцевому грохотах, де помилка розрахунків параметрів не перевищила 7%.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Наукові результати роботи повідомлені і схвалені на наступних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених і спеціалістів «Форум гірників – 2015» (м. Дніпропетровськ, 30 вересня-3 жовтня 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловому і сільському господарстві» (м. Кіровоград, 21-22 жовтня 2015 р.); V-та Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р.); International scientific and practical conference «Energy efficiency and energy saving» (Dnipro, 16-17 november, 2017); Forum of students and young scientists «Widening our horizons» (Dnipro, 19-20 april, 2018); Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених і фахівців «Форум гірників – 2018» (м. Дніпро, 10-13 жовтня 2018 р.).

**Публікації.** Основні положення і результати дисертації опубліковані в 12 друкованих роботах. Із них: 5 – статей у фахових виданнях, 4 – матеріали наукових конференцій, 3 – патенти на корисну модель.

**Структура і обсяг роботи:** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 124 найменувань на 11 сторінках, містить 137 сторінок тексту, в тому числі 29 малюнків, 24 таблиць, а також 5 додатків на 9 сторінках. Додатки включають: методики на базі програм розрахунків технологічних параметрів процесу збагачення; акти впровадження результатів досліджень, перелік праць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано завдання дослідження та визначено основні наукові результати, що винесені на захист.

У розділі 1 відповідно до першої задачі дослідження виконано аналіз галузей застосування та вимог до товарного щебеню карбонатних порід. Розкриті особливості неоднорідних вапнякових родовищ. Розглянута структура технологічних ліній переробки вапняку. Визначені теоретичні аспекти збагачення та класифікації вапняків. Сформульовані задачі дослідження.

Металургійна та будівельна промисловості є основними споживачами вапняку. Вимоги до товарних вапняків викладені в нормативних документах і є достатньо змістовними та складними для виконання. Вміст глинистих часток у товарному продукті нормується. В різних класах карбонатних порід максимально допустимі значення глинистих додатків різні, але не повинні перевищувати 20%. Верхні рівні вмісту кальциту у визначених стандартом класах крупності не обмежуються. В процесі збагачення сировини вапняного родовища важливо не досягти нижньої межі вмісту кальциту. Наявність глинистих часток у вигляді плівок, примазок значно погіршує умови отримання товарного продукту високої якості. Для переробки сировини використовують операції подрібнення та класифікації. Низька ефективність процесу класифікації є причиною безперервного зростання хвостосховищ. Виникає необхідність удосконалення існуючих технологічних ліній збагачення сировини з метою підвищення якості товарного продукту, розширення його фракційного складу. В умовах підвищеної вологості сировини глинисті додатки створюють проблеми з класифікацією вапняків. Підвищення вологості сировини, що підлягає грохоченню, призводить до комкування глини в процесі переробки, її налипання на поверхні сит, що знижує ефективність класифікації, а в деяких випадках процес реалізувати не можливо. При цьому підприємство несе значні збитки, що пов'язані зі скороченням випуску продукції.

Науковими проблемами сухої класифікації сировини займалися видатні вітчизняні та зарубіжні вчені: Андреев С.Е., Бардовский А.Д., Бердус В.В., Блехман І.І., Вайсберг Л.А., Картавий Н.Г., Левенделл Е.Е., Левенсон Л.Б., Ліандов К.К., Надутый В.П., Непомнящий Е.А., Олевський В.А., Олюнин В.В., Пілов П.І., Потураєв В.Н., Рундквіст К.А., Учитель А.Д., Франчук В.П., Червоненко А.Г., Шлаїн Б.І. та інші.

Мокра переробка неоднорідних карбонатних порід в умовах кар'єру практично не можлива, оскільки у більшості випадків відсутня спроможність забезпечення процесу водою в необхідних об'ємах, не можлива утилізація шламів виробництва. Сухі методи переробки сировини, що супроводжуються відокремленням її глинистих часток, недостатньо ефективні і потребують удосконалення. В умовах сухої переробки сировини необхідно зосередити увагу на розширенні експлуатаційних режимів, що характеризуються високими показниками ефективності грохочення, в напрямку збільшення прийнятних для

цього процесу значень вологості матеріалу. Це дозволить знизити залежність режимів роботи обладнання від погодних та сезонних умов, скоротити перерви в роботі технологічних ліній.

Показано, що теоретичні дослідження в області збагачення та класифікації матеріалів зосереджені в основному на встановленні зв'язків, що існують між відомими показниками ефективності збагачення, класифікації сировини і технологічними, конструктивними параметрами обладнання, яке здійснює ці процеси. Широко використовують методи теорії ймовірностей та математичної статистики.

У розділі 2 відповідно до другої задачі дослідження визначена регресійна залежність вмісту вапняку від розміру часток вапнякової сировини. Створена математична модель для прогнозування показника ефективності збагачення сировини та розроблена на її основі методика визначення оптимальної крупності розділення матеріалу при грохоченні. Сформульовано прийняту концепцію збагачення вапняків неоднорідних родовищ.

Показано, що із збільшенням крупності вміст кальциту збільшується, а глинистих додатків – зменшується. В той же час результати проведених аналізів свідчать про те, що навіть крупні класи не містять достатньої кількості вапняку, щоб віднести їх до товарного продукту. Нерівномірність розподілу вмісту кальциту в різних класах крупності є передумовою для вирішення задачі збагачення вапняку шляхом класифікації сировини родовища. Але отримання товарного продукту тільки шляхом класифікації сировини не завжди можливе (наприклад, при відсутності достатньої кількості кальциту в крупних фракціях).

Відомо, що підвищення вологості сировини супроводжується зниженням показника ефективності грохочення і навіть можливою зупинкою технологічної лінії. Тому в технологічну лінію переробки сировини необхідно ввести додатковий елемент, що ліквідує негативні наслідки. Неоднорідність сировини карбонатних родовищ вносить невизначеність в результати її збагачення існуючими технологічними лініями. Тому актуальним є прогнозування ефективності збагачення, якості отриманого товарного продукту, виходячи із хімічного та гранулометричного аналізів сировини конкретного родовища, режимів роботи технологічного обладнання.

Слід звернути увагу на те, що існуючі технології збагачення сировини і запропонована автором концепція збагачення передбачають виконання кінцевої операції класифікації, яка і визначає досягнутий рівень збагачення. Тому в роботі зосереджена увага на створенні математичної моделі для прогнозування показників ефективності збагачення шляхом класифікації сировини.

Підтверджена прийнятність використання ступеневих функцій в регресійних залежностях, що відображають результати хімічного та гранулометричного аналізів сировини неоднорідних карбонатних родовищ

$$m_{2d} / m = a_1 d^{n_1} + b_1, \quad (1)$$



$$m_{u2d} / m = a_2 d^{n_2} + b_2,$$

де  $m_{2d}$  – маса часток нижнього класу крупності в продукті, що підлягає класифікації;  $m_{u2d}$  – маса вапняку в нижніх класах крупності цього продукту;  $m$  – маса продукту;  $a_1, a_2, b_1, b_2, n_1, n_2$  – коефіцієнти ступеневої регресійної залежності (для сировини Західно-Тягинського родовища  $a_1 = 22,403$ ;  $a_2 = 7,962$ ;  $b_1 = -0,675$ ;  $b_2 = -0,271$ ;  $n_1 = 0,347$ ;  $n_2 = 0,448$ );  $d$  – крупність розділення часток сировини в процесі грохочення.

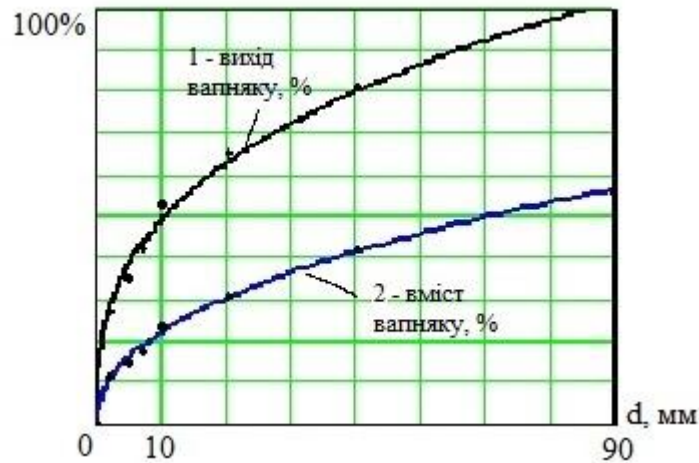


Рис. 1. Залежності виходу  $m_{2d}/m(d)=\gamma$  та  $m_{u2d}/m(d)=\alpha$  вмісту вапняку в загальній пробі ( $m_{2d}/m(d)$  – крива 1 та  $m_{u2d}/m(d)$  – крива 2)

Розрахункові значення кореляційних відношень  $r$  для розглянутих моделей склали: для кривої 1 –  $r = 0,997$ , кривої 2 –  $r = 0,998$ . Експериментальні точки, що показані на рис.1, практично співпадають з кривими 1, 2. Високі рівні кореляційних відношень дозволяють з відповідними допущеннями розглядати залежності (1) такими, що відображають функціональні зв'язки між параметрами і використати їх в моделі, що розробляється, для розрахунку детермінованих значень показників ефективності збагачення.

Із урахуванням залежності  $m_{2d}(d)$  отримаємо

$$\frac{m_{1d}}{m}(d) = 1 - \frac{m_{2d}}{m}(d), \quad (2)$$

де  $m_{1d}$  – маса частинок верхнього класу крупності в продукті, що підлягає класифікації.

Маса надрешітного продукту  $m_1$ :

$$m_1 = m_{1d} + m_{2d}(1 - E_g), \quad (3)$$

де  $E_g = m_2 / m_{2d}$  ( $E_g$  – ефективність грохочення);  $m_2$  – маса підрешітного продукту.

Вихід надрешітного ( $\gamma_1$ ) та підрешітного ( $\gamma_2$ ) продуктів

$$\gamma_1 = \frac{m_{1d}}{m} + \frac{m_{2d}}{m} (1 - E_r); \quad \gamma_2 = 1 - \gamma_1 \quad (4)$$

Використання в рівняннях (3), (4) змінної  $E_2$ , яка може змінюватися в межах  $0 \leq E_2 \leq 1$  в залежності від досягнутого рівня ефективності грохочення, дозволяє в наступному аналізі розглядати залежність параметрів, що характеризують процес збагачення, не тільки від змінної  $d$ , але і від значення  $E_2$ .

Вміст вапняку в надрешітному ( $\beta_1$ ) і підрешітному ( $\beta_2$ ) продуктах розраховують за формулами:

$$\beta_1 = \frac{m_{u1}}{m_1} = \frac{m_{u1d} + m_{u2d}(1 - E_r)}{m_{1d} + m_{2d}(1 - E_r)} = \frac{\frac{m_{u1d}}{m} + \left(\alpha - \frac{m_{u1d}}{m}\right)(1 - E_r)}{\gamma_1}, \quad (5)$$

$$\beta_2 = \frac{m_{u2}}{m_2} = \frac{\alpha - \left[\frac{m_{u1d}}{m} + \left(\alpha - \frac{m_{u1d}}{m}\right)(1 - E_r)\right]}{1 - \gamma_1}.$$

де  $m_{u1}$ ,  $m_{u2}$ , – маса вапняку в надрешітному та підрешітному продуктах;  $\alpha$  – вміст вапняку в продукті, що підлягає грохоченню;  $m_{u1d}$  – маса вапняку у верхніх класах крупності продукту, що підлягає грохоченню.

Рівняння (4), (5) дозволяють визначити показники вилучення вапняку в надрешітний ( $\varepsilon_1$ ) та підрешітний ( $\varepsilon_2$ ) продукти.

Крім показника збагачення  $E$  модель дозволяє розрахувати значення параметрів  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , які також є важливими характеристиками процесу.

Використаємо математичну модель для прогнозу ефективності збагачення вапняків Західно-Тягинського родовища і розглянемо отриману шляхом розрахунку залежність  $E(E_2, d)$ , де використані моделі (1). Сімейство характеристик  $E(d)$  при різних значеннях  $E_2$  ілюструє рис.2. Аналіз свідчить про те, що збільшення  $E_2$  супроводжується зростанням  $E$ . Наведені криві мають екстремуми. Максимальні значення  $E$  для різних кривих (1,2,3) відповідають однаковим значенням крупності  $d$  (біля 7 мм). Вважаючи значення  $d = 7$  мм раціональним значенням крупності розділення сировини ( $d_{onm}$ ) приходимо до висновку, що  $d_{onm}$  не залежить від  $E_2$ , тобто для довільних значень  $E_2$  при  $d = d_{onm}$  забезпечується максимальний рівень збагачення. Використання цього режиму важливе для практичної реалізації пристрою грохочення, оскільки розмір щілин сита доцільно встановити рівним  $d_{onm}$ .

Розрахунки свідчать про те, що наведений на рис.2 характер залежностей  $E(d)$  зберігається при різних значеннях вмісту вапняку в сировині  $\alpha$ . Варіація  $\alpha$  призводить лише до зміни значення  $d_{onm}$ , при якому забезпечуються екстремуми сімейства функцій. Другий важливий висновок, який витікає із рис.2, полягає у

тому, що навіть ефективні режими грохочення ( $E_2 = 0,9-1,0$ ) не в змозі забезпечити високі показники ефективності збагачення (максимальне значення  $E_2 = 0,2$ ). Тому сировина Західно-Тягинського родовища потребує додаткової переробки, наприклад, в рамках запропонованої автором концепції збагачення.

Практичне використання розробленої моделі для прогнозування ефективності збагачення передбачає виконання визначеної послідовності дій. Ця послідовність представлена у вигляді методики розрахунку раціонального значення  $d_{opt}$ . Визначена наступна послідовність дій:

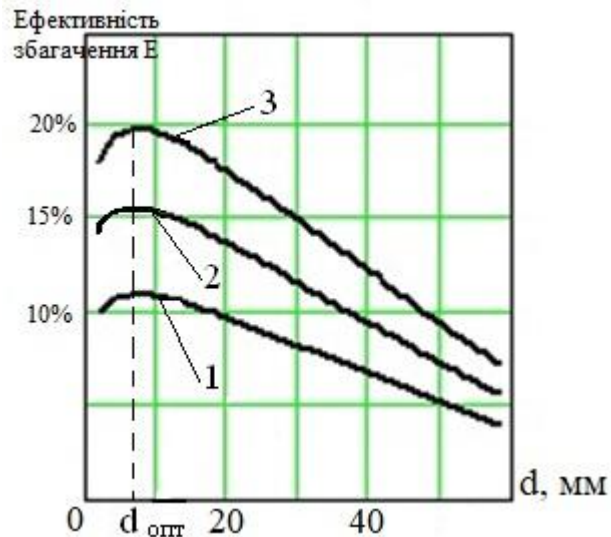


Рис. 2. Залежність ефективності збагачення  $E$  від крупності розділення  $d$  при різних значеннях ефективності грохочення  $E_2$  (крива 1 – 0,7; крива 2 – 0,8; крива 3 – 0,9)

1. Виконати гранулометричний та хімічний аналізи сировини, що підлягає класифікації.

2. Отримати регресійні залежності  $m_{2d}/m(d)$ ,  $m_{u2d}/m(d)$ .

3. Побудувати залежність  $E(d)$  та знайти значення  $d_{opt}$ , що відповідає максимальному рівню  $E$ .

4. Для режиму роботи грохота  $d = d_{opt}$  визначити відповідні показники  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ .

Для спрощення процедури використання запропонованої методики розроблено алгоритм розрахунку показників, наведених в пунктах 2, 3, 4. Алгоритм реалізований в системі MathCAD і дозволяє отримати розширену інформацію про характер зміни розрахункових параметрів при варіаціях  $d$  і  $E_2$ .

Для визначення параметрів ступеневих залежностей (1) можливе застосування методу інтерполяції функції, що дозволить в умовах виконання експрес-аналізу відмовитись від проведення серії експериментів (для побудови регресійної залежності) і обмежитися їх кількістю, що дорівнює двом. Це важливо для скорочення обсягу робіт, а також часу, необхідного для виконання

розрахунків. Точність прогнозу при використанні запропонованої моделі залежить від значень кореляційних відношень  $r$  в рівняннях (1). Це дозволяє підприємству самостійно оцінити точність результатів розрахунку і прийняти рішення про її прийнятність. Для оцінки достовірності результатів розрахунку виконано співставлення розрахункових і експериментальних даних, отриманих в лабораторних умовах. Розбіжність цих даних не перевищила 7%.

Універсальність розробленої методики полягає у тому, що вона використовує розроблену математичну модель і може бути застосована для аналізу сировини будь-якого неоднорідного карбонатного родовища. Практичне значення запропонованої методики полягає у тому, що вона дозволяє визначити оптимальні режими грохочення, оцінити рівні ефективності збагачення, які можуть бути досягнуті шляхом класифікації сировини.

**У розділі 3** відповідно до третьої задачі дослідження обґрунтована доцільність використання валково-пальцевого грохоту для класифікації сировини карбонатного родовища. Досліджена динаміка частинок матеріалу, визначені умови забезпечення необхідної крупності розділення сировини.

Використання для класифікації сировини традиційних грохотів з поверхнями просіювання не забезпечує стабільності результатів збагачення в результаті налипання мілких частинок сировини при підвищеній вологості. Виходячи з цього в практиці грохочення процес переводять в режим роботи грохота, де налипання частинок проявляється незначною мірою. Практичний досвід переробки сировини свідчить про те, що цей режим характерний для крупності розділення частинок  $d \geq 20$  мм. В практиці класифікації сировини для збільшення ефективності збагачення  $E$  зазвичай реалізують нижню межу ( $d = 20$  мм). Аналіз свідчить, що значні обсяги переробленої сировини з високим вмістом вапняку опиняються у відвалі. Накопичення матеріалу в хвостосховищі призводить до виникнення екологічних проблем.

У ситуації, що склалася, доцільно змінити режим роботи грохота таким чином, щоб досягти максимального значення вилучення вапняку (рис.2). При цьому необхідно забезпечити в режимі  $d = d_{onm}$  високу ефективність грохочення  $E_2$ . В умовах підвищеної вологості сировини таку ефективність забезпечують валкові грохоти, де отвори безперервно очищуються від налипання. Підвищення вологості сприяє зниженню міцності глиняних покриттів. Виникають сприятливі умови для їх сепарації шляхом прикладання до поверхонь твердих частин сировини незначних зусиль, що досягається застосуванням валково-пальцевих грохотів.

Для виключення можливостей виникнення режимів затиснення вапняку необхідно дослідити динаміку частинок матеріалу. Визначені сили, що діють на частинку кулястої форми (рис.3) і отримана аналітична залежність, що визначає умову виключення режиму її затискання:

$$\frac{\cos \beta \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \gamma \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - \cos \left[ \beta - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{\cos \beta \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \cos \gamma \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} > f, \quad (6)$$

Показано, що такий режим не залежить від значень сил, що діють на частинку, а визначається значеннями кута захвату  $\alpha$  та кута  $\beta$ , що характеризує положення точки дотику частинки матеріалу до пальця. Аналіз функціональної залежності свідчить про те, що при збільшенні кута  $\beta$  область прийнятних (з точки зору виключення затискання частинок) значень  $\alpha$  зміщується в зону зменшення чисельних значень кута  $\alpha$ . Зміна коефіцієнта тертя в незначних межах не призводить до суттєвої зміни областей, що відповідають режиму виштовхування частинок із небезпечної зони. Визначення функціональної залежності дозволяє проектувальникам грохотів здійснювати перевірку конструкції на виключення режиму затискання частинок.

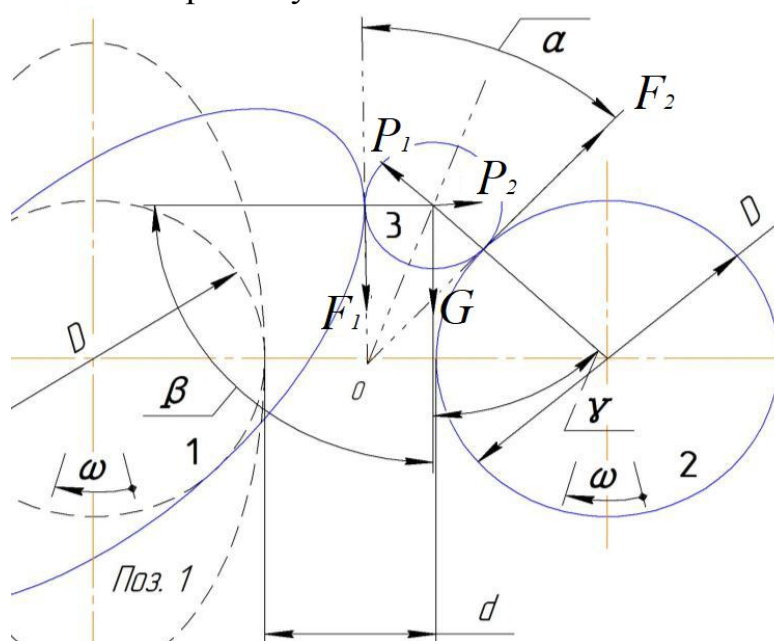


Рис.3. Сили, що діють на частинку матеріалу

У визначенні конструктивних параметрів грохота існує доцільність реалізації поділу на рівні  $d = d_{onm}$ . Показано, що в конструктивному виконанні диску з двома пальцями раціонально забезпечити висоту пальця  $h = d_{onm}$ . У чотирепальцевій конструкції, розглянутій в дисертації, розмір отвору, що забезпечує задану крупність розділення частинок  $d$ , перевищує аналогічний розмір у двопальцевому виконанні. Значення цього перевищення залежить від конструктивних параметрів диску і повинно урахуватися при проектуванні грохотів.

У розділі 4 відповідно до четвертої задачі дослідження обґрунтована доцільність використання регресійного аналізу в задачі підвищення ефективності

збагачення сировини, розроблено низку регресійних моделей, доведена їх адекватність, виконано аналіз результатів моделювання процесів.

Складність визначення функціональних залежностей між змінними, що відображають ефективність процесів класифікації і збагачення, а також параметрами, що їх зумовлюють, полягає у багатофакторності задачі, складності математичного опису залежностей. Тому доцільно досліджувати стохастичні зв'язки між змінними, зокрема використовувати для цього регресійний аналіз.

Підтверджена гіпотеза про адекватність нелінійних однофакторних моделей (1), отриманих в розділі 2. Для цього визначена дисперсія адекватності  $S_{ост}^2$ , дисперсія відтворюваності експерименту в паралельних дослідах  $S_{вос}^2$ . Підтверджена однорідність дисперсій в проведених дослідах шляхом застосування критерію Кохрена. Співставлені розрахункові  $F_p$  та табличні  $F_t$  значення критерію Фішера.

Для підтвердження доцільності використання валково-пальцевого грохоту в технологічній лінії збагачення сировини виникла необхідність створення математичних моделей для розрахунку показників ефективності збагачення  $E$  та грохочення  $E_2$  за умови наявності та відсутності такого грохоту в технологічній лінії. При формуванні моделей ураховані фактори, які в умовах виробництва змінюються в значній мірі, до таких віднесені: вміст вапняку  $\alpha$  (фактор  $X_1$ ) та вологість  $W$  сировини (фактор  $X_2$ ). Визначені межі зміни факторів  $X_1$  та  $X_2$ . Інші фактори, що впливають на значення  $E$ ,  $E_2$ , в умовах проведення дослідів залишені незмінними. Таким чином, розроблено чотири регресійні моделі:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{EC} &= b_{01} + b_{11}X_1 + b_{21}X_2 & \hat{Y}_{EGC} &= b_{03} + b_{13}X_1 + b_{23}X_2 \\ \hat{Y}_{EH} &= b_{02} + b_{12}X_1 + b_{22}X_2, & \hat{Y}_{EGH} &= b_{04} + b_{14}X_1 + b_{24}X_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Де  $\hat{Y}_{EC}$ ,  $\hat{Y}_{EH}$ ,  $\hat{Y}_{EGC}$ ,  $\hat{Y}_{EGH}$  – оцінки математичних очікувань параметрів:

$\hat{Y}_{EC}$  – параметра  $E$  без використання валково-пальцевого грохоту;  $\hat{Y}_{EH}$  – параметра  $E$  в умовах його використання;  $\hat{Y}_{EGC}$  – параметра  $E_2$  при відсутності грохота;  $\hat{Y}_{EGH}$  – параметра  $E_2$  при його наявності;  $b_{ij}$  – коефіцієнти регресійних залежностей.

Використано матричний метод розрахунку коефіцієнтів регресійних залежностей. Для оцінки адекватності багатофакторних моделей (7) визначені значення дисперсій адекватності  $S_{ост}^2$ , дисперсій відтворюваності  $S_{вос}^2$ , підтверджена однорідність дисперсій в проведених дослідах. Здійснена оцінка значимості коефіцієнтів  $b_{ij}$  в регресійних рівняннях (7). Застосування критерію Фішера підтвердило адекватність розроблених моделей.

Виконано повний факторний експеримент типу « $2^2$ ». Використовуючи ортогональне планування, складено план експерименту.

Таблиця 1

План експерименту

№ дослід	$X_0^*$	$X_1^*$	$X_2^*$	$Y_{EC}$	$Y_{EH}$	$Y_{EGC}$	$Y_{EGH}$
1	+	-	-	$Y_{EC1}$	$Y_{EH1}$	$Y_{EGC1}$	$Y_{EGH1}$
2	+	+	-	$Y_{EC2}$	$Y_{EH2}$	$Y_{EGC2}$	$Y_{EGH2}$
3	+	-	+	$Y_{EC3}$	$Y_{EH3}$	$Y_{EGC3}$	$Y_{EGH3}$
4	+	+	+	$Y_{EC4}$	$Y_{EH4}$	$Y_{EGC4}$	$Y_{EGH4}$

Моделювання процесу збагачення сировини з використанням залежностей (7) свідчить про те, що 1%-ва зміна вологості сировини  $W$  призводить до більшої зміни показників  $E$ ,  $E_2$ , ніж 1%-ва зміна вмісту вапняку у сировині, тобто ступінь впливу факторів моделі на функцію відгуку різна. Ефективність грохочення параметра  $E_2$  малою мірою залежить від вмісту вапняку  $\alpha$ . Спостерігається суттєва залежність параметра  $E_2$  від вологості сировини. При збільшенні вологості сировини до 12% ефективність параметра  $E_2$  із використанням валково-пальцевого грохоту перевищує існуючий показник в 2 рази, що сприяє стабілізації значення цього показника в процесі зміни вологості сировини (рис. 4). Підвищення параметра  $E_2$  супроводжується підвищенням ефективності збагачення параметра  $E$  на 10-20% (у порівнянні варіантом без грохоту).

Викладене підтверджує доцільність використання валково-пальцевих грохотів у технологічних лініях збагачення сировини неоднорідних карбонатних родовищ.

У розділі 5 відповідно до п'ятої задачі дослідження розкрито особливості конструктивного виконання експериментального зразка валково-пальцевого грохоту, проведені експериментальні дослідження, викладено запропонований варіант використання валково-пальцевого грохоту в технологічній лінії збагачення сировини, розглянуто конструктивні елементи грохоту.

Розроблений в лабораторних умовах експериментальний зразок валково-пальцевого грохоту реалізує результати теоретичних досліджень, виконаних автором в частині конструктивного виконання, режимів роботи грохотів такого типу. Розкрито процедуру відбору проб для проведення гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини. Результати гранулометричного аналізу свідчать про те, що вагові показники крупних класів у вихідній сировині є переважаючими. Хімічний аналіз підтверджує збільшення маси супутніх елементів в дрібних класах крупності. Проведено низку експериментальних

досліджень відповідно до методики планування експерименту, викладеної в розд.4.

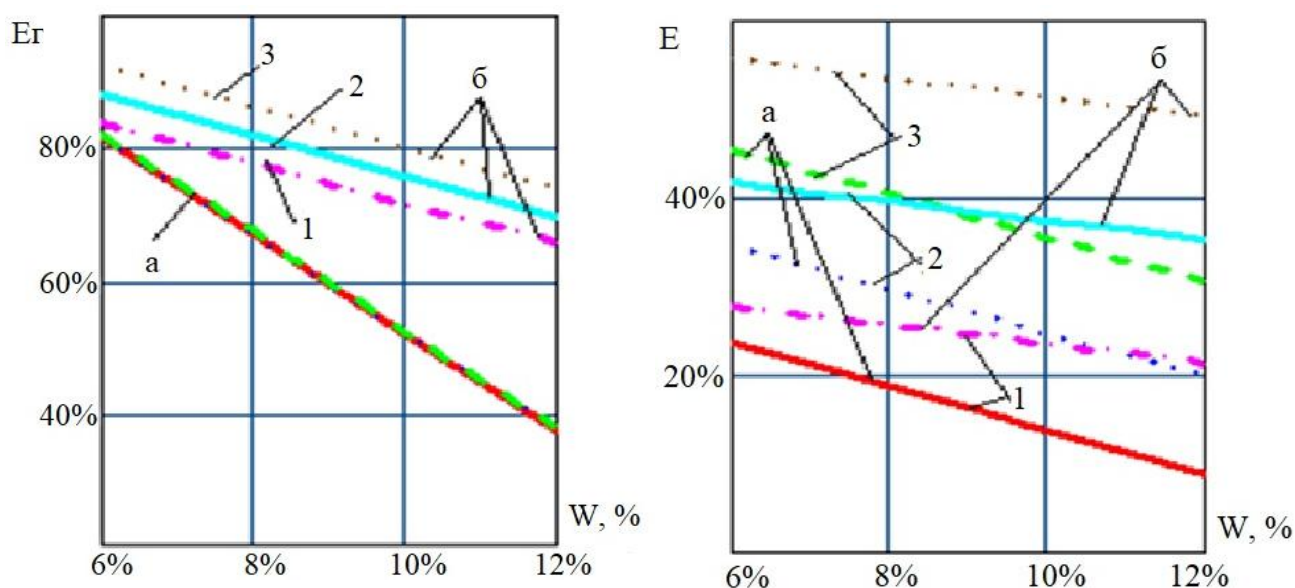


Рис.4. Залежність ефективності грохочення  $E_g$  та збагачення  $E$  від вмісту вапняку  $\alpha$  і вологості  $W$  (а – без валково-пальцевого грохоту; б – з грохотом; 1 –  $\alpha = 51\%$ ; 2 –  $\alpha = 65\%$ ; 3 –  $\alpha = 79\%$ )

При їх проведенні варіювалися значення вмісту вапняку у вихідному продукті, вологості матеріалу проб. Були досліджені режими класифікації матеріалів як з використанням валково-пальцевого грохоту, так і без його застосування. Виконання гранулометричних і хімічних аналізів надрешітного і підрешітного продуктів дозволило розрахунковим шляхом визначити досягнуті показники ефективності грохочення і збагачення, побудувати на цій основі багатофакторні регресійні моделі, виконати порівняльний аналіз розглянутих підходів до збагачення сировини.

Результати проведених експериментів свідчать про те, що при використанні валково-пальцевого грохоту відбувається збільшення маси підрешітного продукту. Збільшується маса глинистих добавок і дрібних частинок вапняку, причому у варіанті підвищеної вологості (12%) вихідного продукту таке збільшення більш відчутно (в 1,5-2 рази), що свідчить про доцільність використання валково-пальцевих грохотів у технологічних лініях збагачення. Запропоновано на ранній стадії процесу переробки вапнякової сировини здійснювати класифікацію матеріалу валково-пальцевим грохотом, забезпечивши відділення глиномістких дрібних частинок від крупніших з підвищеним вмістом вапняку. Це дозволить на ранній стадії процесу переробки збільшити ступінь очищення сировини, поліпшити умови роботи товарних грохотів завдяки відсутності дрібних глиномістких частинок, підвищити якість отриманого щебеню. Запропоновані і захищені патентами конструктивні рішення валків і дисків валково-пальцевого грохоту. Рішення полягають в особливому



розташуванні пальців диска відносно сусіднього валу грохоту, у використанні оригінального кріплення пальців на диску. Вони забезпечують працездатність грохоту, скорочують терміни проведення ремонтних робіт.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що полягає у визначенні закономірностей збагачення і класифікації сировини неоднорідних вапнякових родовищ, зв'язку цих процесів із вихідними характеристиками сировини, технологічними і конструктивними параметрами валково-пальцевого грохоту, які дозволяють проектувати валково-пальцевий грохот з попередньо визначеними параметрами, що має суттєве значення для науки і практики.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Технологічні лінії сухої переробки вапнякової сировини, які застосовують на кар'єрах, забезпечують отримання товарних продуктів прийнятної якості тільки для крупних класів щебеню в умовах низької вологості. Дрібні класи щебеню при цьому не використовуються і спрямовуються у відвал. Виникає необхідність удосконалення існуючого процесу класифікації і збагачення сировини з метою підвищення якості кінцевого продукту і розширення на цій основі фракційного складу товарного щебеню, що відповідає вимогам державних стандартів.

2. Визначено концепцію збагачення сировини неоднорідних карбонатних родовищ, яка полягає у відокремленні глинистих покриттів від кусків гірської породи з подальшим високоефективним грохоченням продукту в кар'єрних умовах. Реалізація концепції передбачає використання валково-пальцевого грохоту, що забезпечує високі показники ефективності роботи при підвищеній вологості матеріалу.

3. Отримано нові аналітичні залежності, що зв'язують показники ефективності збагачення вапняку з результатами гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини, ефективністю її грохочення. На їх основі створено математичну модель, що дозволяє при обмеженій кількості експериментальних даних прогнозувати досягнуті показники ефективності збагачення з урахуванням характеристик застосованих пристроїв класифікації.

4. Показано, що залежність показника ефективності збагачення сировини від крупності розділення частинок пристроями грохочення має екстремум, причому значення крупності, що відповідає максимуму показника, не залежить від ефективності грохочення. Це дозволяє використовувати режим грохочення з оптимальною крупністю розділення частинок, забезпечити при цьому високу ефективність збагачення, зменшити відходи процесу переробки, поліпшити екологічну ситуацію регіону.

5. Розроблено методику розрахунку оптимального значення крупності розділення матеріалу, що підлягає класифікації. На її основі створено алгоритм

розрахунку показників ефективності збагачення, що дозволяє отримати розширену інформацію про характер зміни визначених параметрів при варіації крупності розділення частинок і ефективності грохочення.

6. Використання валково-пальцевого грохоту у вигляді комбінованого пристрою, що здійснює як відділення глинистих покриттів від кусків гірської породи, так і розділення частинок за крупністю (включаючи умови підвищеної вологості вихідної сировини), покращує показник ефективності грохочення. На основі дослідження динаміки частинки матеріалу, визначення сил, що діють на частинку, отримана аналітична залежність, яка визначає умову виключення режиму її затиснення. Доведено, що такий режим не залежить від рівнів сил, що діють на частинку, а визначається виключно значеннями кутів, які характеризують положення точок дотику частинки до пальця і футерувального валу.

7. Для дослідження процесів збагачення і класифікації вихідної сировини створені лінійні регресійні багатофакторні моделі, де в якості факторів використані значення вмісту вапняку у вихідній сировині і вологості матеріалу, а функцій відгуку – значення показників ефективності збагачення і грохочення сировини. Моделі дозволяють зіставляти ефективності процесів грохочення і збагачення у варіантах класифікації з валково-пальцевим грохотом і без його використання.

8. Застосування критерію Фішера підтвердило гіпотези про адекватність нелінійних однофакторних і лінійних багатофакторних регресійних моделей, розроблених в дисертаційній роботі. Це зумовлює високу достовірність результатів моделювання процесів збагачення та грохочення вапняку.

9. При збільшенні вологості сировини до 12% ефективність грохочення валково-пальцевого грохоту перевищує аналогічний показник без його використання на 30-35%. Наявність валково-пальцевого грохоту проявляється в його стабілізуючій дії на процес класифікації, що супроводжується підвищенням ефективності збагачення на 10-20%. Таким чином, доведено доцільність використання валково-пальцевих грохотів у технологічних лініях збагачення сировини карбонатних родовищ.

### **Основні положення та результати дисертації опубліковані в роботах:**

#### *Публікації у фахових виданнях:*

1. Pilov P.I., Dreshpak A.S. Mathematical model for predicting limestone enrichment indicators : Int. journal of energy for a clean environment, vol. 18, no. 4, Begell house, Connecticut. 2017. p. 319-333 (Scopus).

2. Дрешпак А.С. Определение степени разубоживания известняков Западно-Тягинского месторождения. Науково-технічний збірник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2015. вип. 61(102). С. 56-58.

3. Дрешпак А.С. Обоснование исходных параметров обогащения известняков из неоднородных карбонатных месторождений. Научно-технический сборник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2016. вип. 64(105). С. 59-68.

4. Дрешпак А.С. Особенности конструктивного исполнения фигурных дисков валково-пальцевого грохота. Научно-технический сборник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2018. вип. 70(111). С. 6-17.

5. Дрешпак А.С. Эффективность обогащения и классификации сырья неоднородного карбонатного месторождения. Научно-технический сборник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2018. вип.56. С. 175-183.

*Інші видання:*

6. Валково-пальцевый грохот: пат. на кор. модель 113996 Україна: МКП В07В 1/16. № u201608648. Заявл. 08.08.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 4 с.

7. Вал грохота: пат. на кор. модель 114030 Україна: МКП В07В 1/16. № u201608910. Заявл. 18.08.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 4 с.

8. Спосіб збагачення неоднорідних карбонатних матеріалів: пат. на кор. модель 114078 Україна, МКП В03В 7/00. № u201609540. Заявл. 15.09.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 4 с.

*Матеріали конференцій:*

9. Дрешпак О.С. Аналіз технології збагачення вапняку з неоднорідних карбонатних родовищ. Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві : Зб. тез доп. міжн. наук.-практ. конф. (м. Кіровоград, 21-22 жовтня 2015 р.). Кіровоград, 2015. Т.1. С. 109.

10. Дрешпак О.С. Визначення залежностей вапнякової сировини Західно-Тягиньського неоднорідного карбонатного родовища. Актуальні задачі сучасних технологій : Зб. тез доп. V-ої міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів: (м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р.). Тернопіль, 2016. Т.2. С. 29.

11. Dreshpak O. S. The features of methodology for predicting limestone dressing efficiency. Energy efficiency and energy saving 2017 : Materials int. scient.&pract. Conf. (Dnipro, 16-17 november, 2017). Dnipro, 2017. V.1. p. 15-16.

12. Dreshpak O. S. Mathematical model for calculating enrichment efficiency. Widening our horizons: Summary of abstracts of the Forum of students and young scientists (Dnipro, 19-20 april, 2018). Dnipro, 2018. V.2. p. 17-18.

**Особистий внесок автора в роботи, опубліковані в співавторстві,** полягає в: в [1] – у розробці математичної моделі для прогнозування показників збагачення і класифікації, створенні методики і алгоритму розрахунку раціонального значення крупності розділення матеріалу. В роботі [6] – у конструктивному виконанні дисків та особливості кріплення пальців валково-пальцевого грохота; в роботі [7] – у конструктивному виконанні пальця грохота та його розмірах; в роботі [8] – у визначенні технологічної схеми збагачення вапняку.

## АНОТАЦІЯ

**Дрешпак О.С. «Удосконалення технології збагачення сировини неоднорідних вапнякових родовищ».– На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.08 – Збагачення корисних копалин. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі встановлення закономірностей, що зв'язують показники ефективності збагачення і класифікації сировини неоднорідних карбонатних родовищ з її вихідними характеристиками, технологічними і конструктивними параметрами обладнання класифікації, обґрунтуванні на цій основі раціональних режимів грохочення.

Визначено загальний підхід до збагачення сировини, який полягає у відокремленні глинистих покриттів від кусків гірської породи з подальшим високоефективним грохоченням продукту в кар'єрних умовах шляхом застосування валково-пальцевого грохоту (включаючи умови підвищеної вологості сировини).

Отримано нові аналітичні залежності, що зв'язують показники ефективності збагачення з результатами гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини, ефективністю її грохочення.

Розроблено методику розрахунку раціонального значення крупності розділення матеріалу, що підлягає класифікації. На її основі створено алгоритм розрахунку показників ефективності збагачення.

Зіставлені показники ефективності процесів грохочення і збагачення у варіантах класифікації з валково-пальцевим грохотом і без його використання. Доведено, що використання валково-пальцевого грохоту сприяє стабілізації процесу класифікації, що супроводжується підвищенням ефективності збагачення на 10-20%.

**Ключові слова:** ефективність збагачення, класифікація сировини, валково-пальцевий грохот, вапняк, вологість сировини.

## АННОТАЦИЯ

**Дрешпак А.С. «Усовершенствование технологии обогащения сырья неоднородных известняковых месторождений».** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.08 – Обогащение полезных ископаемых. – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Министерство образования и науки Украины, Днепр, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи установления закономерностей, связывающих показатели эффективности обогащения и классификации сырья неоднородных известняковых месторождений с ее

исходными характеристиками, технологическими и конструктивными параметрами оборудования классификации, обосновании на этой основе рациональных режимов грохочения.

Технологические линии сухой переработки известняковой сырь, которые применяют на карьерах, обеспечивают получение товарных продуктов приемлемого качества только для крупных классов щебня в условиях низкой влажности. Мелкие классы щебня при этом не используются и направляются в отвал. Концепция обогащения сырья неоднородных карбонатных месторождений заключается в принудительном отделении глинистых покрытий от кусков горной породы с последующим высокоэффективным грохочением известняка в карьерных условиях. Реализация концепции предусматривает использование валково-пальцевого грохота, который обеспечивает высокие показатели эффективности работы при повышенной влажности материала. Получены новые аналитические зависимости, связывающие показатели эффективности обогащения известняка с результатами гранулометрического и химического анализов исходного сырья, эффективностью ее грохочения. На их основе создана математическая модель, позволяющая при ограниченном количестве экспериментальных данных прогнозировать достигнутые показатели эффективности обогащения с учетом характеристик применяемых устройств классификации.

Показано, что зависимость показателя эффективности обогащения сырья от крупности разделения частиц устройствами грохочения имеет экстремум, причем значение крупности, соответствующее максимуму показателя, не зависит от эффективности грохочения. Это позволяет использовать режим грохочения с оптимальной крупностью разделения частиц, обеспечить при этом высокую эффективность обогащения, уменьшить отходы процесса переработки, улучшить экологическую ситуацию региона.

Разработана методика расчета оптимального значения крупности разделения материала, подлежащего классификации. На ее основе создан алгоритм расчета показателей эффективности обогащения, который позволяет получить расширенную информацию о характере изменения определенных параметров при вариации крупности разделения частиц и эффективности грохочения.

Использование валково-пальцевого грохота в качестве комбинированного устройства, осуществляющего как отделение глинистых покрытий от кусков известняка, так и разделение частиц по крупности (включая условия повышенной влажности исходного сырья), улучшает показатель эффективности грохочения. На основе исследования динамики частицы материала, определения сил, действующих на частицу, полученная аналитическая зависимость, которая определяет условие исключения режима ее ущемления. Доказано, что такой режим не зависит от уровней сил, действующих на частицу, а определяется исключительно значениями углов, характеризующих положение точек соприкосновения частицы с частями соседних валков.

Для исследования процессов обогащения и классификации исходного сырья созданы линейные регрессионные многофакторные модели, где в качестве факторов использованы значения содержания известняка в исходном сырье и влажности материала, а в качестве функций отклика – значения показателей эффективности обогащения и грохочения известняка. Модели позволяют сопоставлять эффективности процессов грохочения и обогащения в вариантах классификации с валково-пальцевым грохотом и без его использования.

Наличие валково-пальцевого грохота проявляется в его стабилизирующем воздействии на процесс классификации, что сопровождается повышением эффективности обогащения на 10-20%.

**Ключевые слова:** эффективность обогащения, классификация сырья, валочно-пальцевый грохот, известняк, влажность сырья.

## ABSTRACT

**Dreshpak O.S. «Improvement of technology of enrichment of raw materials of nonheterogeneous limestone deposits». – Manuscript.**

The dissertation for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.15.08 – Enrichment of minerals. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem of establishing the regularities linking the efficiency of the enrichment and classification of raw materials of inhomogeneous carbonate deposits with its initial characteristics, technological and constructive parameters of classification equipment, justification on this basis of rational modes of sifting.

The general approach to the enrichment of raw materials, which consists in the separation of clay coverings from the rocks of a rock with the subsequent high-effective shaving of a product in career conditions by means of roll-and-pinion rumbling (including conditions of high moisture content of raw materials) is determined.

New analytical dependencies were obtained, linking the parameters of the enrichment efficiency with the results of granulometric and chemical analysis of the raw material, as well as the efficiency of its sieve.

The method of calculating the rational value of the size of the separation of material subject to classification is developed. On its basis, an algorithm for calculating the efficiency of enrichment is created.

The indexes of efficiency of scoring and enrichment processes in the variants of classification with a roll-and-thumb drive and without its use are compared. It is proved that the use of a roller-thumb drive stabilizes the classification process, and increases enrichment efficiency by 10-20%.

**Key words:** efficiency of enrichment, classification of raw materials, roll-fingers screen, limestone, moisture content of raw materials.