

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДРЕШПАК ОЛЕКСАНДР СТАНІСЛАВОВИЧ**

**УДК 622.741.2 (043.3)**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ СИРОВИНИ  
НЕОДНОРІДНИХ ВАПНЯКОВИХ РОДОВИЩ**

05.15.08 – «Збагачення корисних копалин»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Пілов Петро Іванович, д.т.н., професор

Дніпро – 2019 р.

## АНОТАЦІЯ

Дрешпак О.С. Удосконалення ефективності збагачення сировини неоднорідних вапнякових родовищ. – На правах рукопису.

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

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

Сировина неоднорідних вапняків є багатоконпонентною і характеризується значним вмістом глинистих добавок. Вимоги стандартів до зменшення вмісту сторонніх компонентів в товарному щебені достатньо жорсткі і забезпечуються застосуванням технологічних ліній збагачення сировини. При сухому грохоченні сировини ефективність процесу значною мірою залежить від вологості матеріалу. Збільшення вологості призводить до суттєвого зменшення ефективності переробки. Існуюче технологічне обладнання не забезпечує високих показників ефективності збагачення. Це зумовлено низькою ефективністю роботи існуючих грохотів умовах, характерних для переробки неоднорідних вапняків. У цій ситуації виникає задача обґрунтування раціональних конструктивних рішень та режимів грохочення сировини, які забезпечують підвищення ефективності її збагачення. Необхідно виконати ряд теоретичних досліджень для визначення зв'язків, що існують між вхідними характеристиками сировини, конструктивними параметрами грохота нової конструкції та показниками ефективності збагачення і грохочення. Аналіз зв'язків створить наукову основу для реалізації рішень, важливих для практичного використання.

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

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

Вимоги до товарних вапняків викладені в нормативних документах і є достатньо змістовними та складними для виконання. Вміст глинистих часток у товарному продукті нормується. 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. 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. Мокра переробка неоднорідних вапнякових порід в умовах кар'єру практично не можлива, так як 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. Необхідно продовжити пошук прийнятних способів переробки сировини, які дозволяють здійснювати ефективне відокремлення глинистих додатків у різних класах крупності матеріалу простими і надійними в роботі технічними засобами.

Показано, що теоретичні дослідження в області збагачення та класифікації матеріалів зосереджені в основному на встановлення 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 сформульовані задачі дослідження, що передбачають математичне моделювання процесів, розробку технологічного обладнання для відокремлення частинок глини від кусків вапняку, реалізацію ефективного грохочення в умовах підвищеної вологості сировини.

**У розділі 2.** Сформульовано прийняту в роботі концепцію збагачення вапняків неоднорідних родовищ. Розглянуто результати хімічного та гранулометричного аналізів сировини неоднорідного родовища вапняку. 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 раціональної крупності розділення матеріалу при грохоченні.

У роботі виконано гранулометричний та хімічний аналізи сировини Західно-Тягинського вапнякового родовища. Автор бачить можливість підвищення ефективності процесу збагачення вапняку шляхом відокремлення глинистих додатків від кусків гірської породи та активізації процесу переведення мілкої фракції в підрешітну область грохоту. Важливо також, щоб процес класифікації відрізнявся стабільністю показника його ефективності. Відомо, що підвищення вологості сировини супроводжується зниженням показника ефективності грохочення і навіть можливою зупинкою технологічної лінії. Тому в технологічну лінію переробки сировини необхідно увести додатковий елемент, що ліквідує негативні наслідки.

Неоднорідність сировини вапнякових 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. Таке прогнозування очікуваних результатів доцільно здійснювати до введення в дію технологічної

лінії, що дозволить аналізувати результати, які можуть бути досягнуті, робити висновки щодо доцільної структурної побудови технологічної лінії, раціональних режимів грохочення. Важливо, щоб прогнозні оцінки базувалися на мінімальній кількості експериментальних досліджень, дозволяли отримати достатню точність прогнозованих результатів. Результати прогнозування можуть служити підставою для відмови від розробки родовища у випадку, якщо показники збагачення низькі і не можуть бути покращені існуючими рішеннями.

Для побудови математичної моделі визначено характер залежності вмісту вапняку від крупності часток сировини. Підтверджена прийнятність використання ступеневих функцій в регресійних залежностях, що відображають результати хімічного та гранулометричного аналізів сировини неоднорідних вапняків. На основі регресійного аналізу отримано аналітичні залежності, що зв'язують показники ефективності збагачення сировини з результатами її гранулометричного та хімічного аналізів, ефективністю грохочення. Встановлено, що залежність показника ефективності збагачення сировини від крупності розділення частинок пристроєм грохочення має екстремум, причому значення крупності, що відповідає максимальному показнику, не залежить від ефективності грохочення. Використання раціонального режиму грохочення в валково-пальцевому грохоті забезпечує підвищення ефективності збагачення, включаючи умови підвищеної вологості сировини. При цьому зменшуються відходи процесу переробки, що сприяє поліпшенню екологічної ситуації в регіоні. Розроблено методику визначення раціонального режиму грохочення (крупності розділення частинок) а також алгоритм його розрахунку. Універсальність розробленої методики полягає у тому, що вона використовує розроблену математичну модель і може бути застосована для аналізу сировини будь-якого неоднорідного родовища вапняку.

**У розділі 3** обґрунтована доцільність використання валково-пальцевого грохоту для класифікації сировини вапнякового родовища. Досліджена динаміка частинок матеріалу, визначені умови забезпечення раціональної 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. 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). У ситуації, що склалася, доцільно змінити режим роботи грохота таким чином, щоб досягти максимального значення  $E$ . При цьому необхідно забезпечити в раціональному режимі  $d = d_{opt} = 7$  мм високу ефективність грохочення  $E_2$ . В умовах підвищеної вологості сировини таку ефективність  $E_2$  забезпечують валкові грохоти, де отвори безперервно очищуються від налипання. Виникають сприятливі умови для їх сепарації шляхом прикладання до поверхонь твердих частин сировини незначних зусиль, що досягається застосуванням валково-пальцевих грохотів.

Розглянуті варіанти конструктивного виконання валково-пальцевих грохотів. Виходячи із особливостей конструктивного виконання дисків валково-пальцевого грохота можливий варіант затискання частинки матеріалу між футерувальним валом і пальцем грохота, що приводить до переривання процесу грохочення. Для виключення можливостей виникнення таких режимів необхідно дослідити динаміку частинок матеріалу. Визначені сили, що діють на частинку круглої форми і отримана аналітична залежність, що визначає умову виключення режиму її затискання. 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.

Важливим моментом у визначенні конструктивних параметрів грохота є забезпечення заданої крупності розділення частинок сировини. Це зумовлено тим, що існує доцільність реалізації розділення на рівні  $d = d_{opt}$ . Показано, що розмір отвору, який забезпечує раціональну крупність розділення частинок  $d_{opt}$ , пов'язаний з висотою пальця грохота. Отримана залежність для її розрахунку.

У розділі 4 розроблено ряд регресійних моделей для вирішення задачі підвищення ефективності збагачення сировини, доведена їх адекватність, виконано аналіз результатів моделювання процесів.

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  $E_2$  при умові наявності та відсутності такого грохоту в технологічній лінії. Показано, що для вирішення сформульованої задачі прийнятне використання лінійних багатofакторних регресійних моделей. До таких віднесені: вміст вапна  $\alpha$  в сировині, що підлягає переробці (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. Використовуючи ортогональне планування, складено план експерименту. Виконано повний факторний експеримент типу « $2^2$ ». Використано матричний метод розрахунку коефіцієнтів регресійних залежностей. Для оцінки адекватності багатofакторних моделей 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. Застосування критерію Фішера підтвердило адекватність розроблених моделей.

Ефективність грохочення  $E_2$  малою мірою залежить від вмісту вапна  $\alpha$ . Спостерігається суттєва залежність  $E_2$  від вологості сировини. При збільшенні вологості сировини до 12% ефективність  $E_2$  із використанням валково-пальцевого грохоту перевищує існуючий показник в 2 рази, що сприяє стабілізації значення цього показника в процесі зміни вологості сировини. Підвищення  $E_2$  супроводжується підвищенням ефективності збагачення  $E$  на 10 - 20% (у порівнянні варіантом без грохоту).

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

У розділі 5 розкрито особливості конструктивного виконання експериментального зразка валково-пальцевого грохоту, проведення експериментальних досліджень, викладено запропонований варіант використання валково-пальцевого грохоту в технологічній лінії збагачення сировини.

Розроблений в лабораторних умовах експериментальний зразок валково-пальцевого грохоту реалізує результати теоретичних досліджень, виконаних автором в частині конструктивного виконання, режимів роботи грохотів такого типу. Проведено ряд експериментальних досліджень у відповідності з методикою планування експерименту, викладеною в розд.4. 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. Запропоновані і захищені патентами



конструктивні рішення валків і дисків валково-пальцевого грохоту. Рішення полягають в особливому розташуванні пальців диска відносно сусіднього валу грохота, у використанні оригінального кріплення пальців на диску. Вони забезпечують працездатність грохота, скорочують терміни проведення ремонтних робіт.

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

## ABSTRACT

Dreshpak O.S. «Improvement of technology of enrichment of raw materials of heterogeneous carbonate deposits». – Manuscript.

The dissertation for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) on specialty 05.15.08 – Enrichment of Minerals. – Dnipro University of Technology, 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 of rational modes of screening.

Raw materials of heterogeneous limestones are multicomponent and characterized by significant content of clay additives. Standard requirements to reduce the content of third-party components in commodity rubble are sufficiently rigid and ensured by application of technological lines for the raw materials enrichment. It is known that the content of limestone in the raw material depends on the size of the material to be processed. Therefore, the enrichment of raw materials is carried out by its classification. When dry crumbling of raw materials, the efficiency of the process largely depends on the moisture content of the material. Increased humidity leads to a significant reduction in recycling efficiency. Existing

technological equipment does not provide high levels of enrichment efficiency. This is due to the low efficiency of the existing screeners for processing heterogeneous limestone. In this situation, the task of substantiating rational constructive decisions and modes of raw materials screening, that provide an increase in enrichment efficiency, become urgent. A number of theoretical studies to determine dependencies between the input characteristics of the raw material, the structural parameters of the screen of the new design and the indicators of enrichment and screening efficiency must be performed. The analysis of the dependencies will create a scientific basis for implementing decisions important for practical use.

The introduction substantiates urgency of the problem that is solved in dissertation work, as well as formulates research task and defines the main scientific results that have been got for defense.

**Chapter 1** analyzes application areas and requirements for commercial limestone gravel. The features of inhomogeneous limestone deposits are highlighted. The structure of technological lines of limestone processing is considered. Theoretical aspects of limestones enrichment and classification are determined. The research tasks are formulated.

The metallurgical and building industries are the main consumers of limestone. Requirements for commodity limestone are set out in normative documents and are sufficiently informative and difficult to meet. The content of clay particles in a commodity product is normalized. In different grades of carbonate rocks, the maximum values of clay applications are different, but they must not exceed 20%. The upper levels of calcite content are not limited by the standard size classes. In the process of enriching the raw material of the lime deposit, it is important not to reach the lower boundary of calcite content. The presence of clay particles in the form of films and primes significantly impairs the conditions for obtaining a high-quality product. For the processing of raw materials, the operations of grinding and classification are used. Low efficiency of classification process is the reason for the continuous growth of tailings. There is a need to improve the existing technological lines for raw materials enrichment in order to improve the

quality of the product, expanding its fractional composition. In terms of high humidity of raw materials clay applications create problems with the limestone classification. Increasing moisture content of the raw material to be shaken leads to clinging the clay in the processing, and sticking to the surface of the screeners, that reduces the classification efficiency, and the process cannot be successfully realized in some cases. In this case, the company bears significant losses caused by the reduction of the output.

Wet processing of heterogeneous carbonate rocks in quarry is practically impossible, since in most cases there is no ability to process the water in the required volumes and utilize the sludge of production. Dry methods of processing of raw materials, that are accompanied by the separation of its clay particles, are not efficient enough and require improvement. It is necessary to continue searching for suitable methods of raw materials processing, which provide the effective separation of clay applications in different classes of material size, simple and reliable from technical point of view.

In terms of dry processing of raw materials, it is necessary to focus on the extended limits of operational modes, which are characterized by high performance of screening, increasing the material moisture content acceptable for this process. This will reduce the influence of weather and seasonal conditions on the equipment operating modes, shorting breaks in work of the technological lines.

It is shown that theoretical studies in the field of enrichment and classification of materials focus mainly on establishing links that exist between the known indicators of enrichment efficiency, classification of raw materials, as well as the technological and constructive parameters of the equipment that performs these processes. Probability theory and mathematical statistics methods are widely used.

Research tasks that involve mathematical modeling of the processes, the development of technological equipment for separating clay particles from limestone pieces, realizing effective sieve in conditions of high moisture content of raw materials, are formulated in the Chapter.

The concept of enrichment of limestone inhomogeneous deposits is formulated in **Chapter 2**. The results of chemical and granulometric analyzes of raw materials of a non-homogeneous limestone deposit are considered. The regression dependence between the limestone content and the size of limestone raw material particles is determined. A mathematical model for forecasting raw material enrichment efficiency, as well as a method for determining the rational size of material separation in grinding were developed.

The granulometric and chemical analysis of raw materials of the West-Tyaginsky carbonate deposit was performed. It is shown that increased size of the particles improves calcite content and decreases the clay applications. At the same time, the results of the conducted analyzes indicate that even large classes do not contain enough limestone to be classified as a commodity product. Uneven distribution of calcite content in various classes of grain size is a prerequisite for solving the problem of liming enrichment by classifying the raw material of the deposit, that is the exclusion from its composition of small classes of grain size with low calcite content and significant argillaceous applications. But obtaining a commodity product only by the classification of raw materials is not always possible (for example, in the absence of sufficient amounts of calcite in large fractions) or is not effective owing to accumulation of a significant amount of limestone in tailings storages. It requires additional actions. Author sees the possibility of increasing efficiency of the limestone enrichment process by separating clay applications from rocks and increasing the process of transferring a shallow fraction into a sub-region of the screen. It is also important that the process of classification is different depending on the stability of its efficiency.

It is known that an increase in moisture content of raw materials result in a decrease in screening efficiency and even a possible stop of the technological line. Therefore, an additional element, which eliminates the negative consequences, must be set into the processing line. This is the concept which is proposed by the author for the limestone's enrichment of heterogeneous carbonate deposits.

The heterogeneity of raw materials of limestone deposits causes uncertainty in the results of its enrichment with existing technological lines. Therefore, it is important to forecast the enrichment efficiency, the quality of the product obtained, basing on the chemical and granulometric analysis of the raw material of a specific deposit, as well as the operating modes of technological equipment. It is advisable to forecast the expected results before implementing the technological line, that will allow to analyze the results can be achieved, making conclusions about the appropriate structural construction and rational modes of screening of the technological line. It is important that forecasting is based on the minimum number of experimental studies, allowing for sufficient accuracy of the forecasted results. The results of the forecasting can serve as a ground for refusing to develop the deposit if the enrichment indicators are low and cannot be improved by the existing solutions.

The character of dependence between the limestone content and the size of raw material particles is determined by means of mathematical modelling. For this purpose, a regression analysis has been used. The application of step functions in regression dependences, that reflect the results of chemical and granulometric analyzes of raw materials of non-uniform limestones, has been confirmed. Basing on the regression analysis, analytical dependencies that link the indexes of raw material enrichment efficiency with the results of its granulometric and chemical analyzes, as well as the screening efficiency, were obtained. Basing on a limited number of experimental data, it allows to forecast the enrichment efficiency, taking into account the characteristics of the used screening devices. It was established that the dependence between the indicator of enrichment efficiency of raw materials and the size of the particle separation is extremum and the magnitude, corresponding to the maximum value, does not depend on the screening efficiency. Rational screening mode of a roll-thumb drive ensures enhancing enrichment efficiency, including the conditions for increased moisture content of raw materials. At the same time, the waste of the processing process decreases, which contributes to the improvement of ecological situation in the region. The method for determining the rational mode of

scraper performance (size of particle separation) and its calculation algorithm are developed. The versatility of the developed methodology is that it applies the developed mathematical model and can be used to analyze the raw material of any inhomogeneous limestone deposit. An option is to use a method for analyzing raw materials obtained from different slopes of the same field (in the case of significant differences in its characteristics).

**Chapter 3** justifies the expediency of applying a roll-and-pinion screen for classifying raw materials of a carbonate deposit. The dynamics of material particle is studied, and the conditions for ensuring rational size distribution of raw materials are determined.

The classification of raw materials of traditional screens with sifting surfaces does not ensure the enrichment stability as a result of adherence of fine particles of raw materials at high humidity. That is why, the sifting process is transferred to the mode of the scraper, where the sticking of particles appears to a small extent. The practical experience of the raw materials processing indicates that this mode characterizes the size of particle separation  $d \geq 20$  mm. In practice, the classification of raw materials to increase the enrichment efficiency  $E$  is usually implemented at lower limit ( $d = 20$  mm). The analysis shows that significant amount of the processed raw materials with high content of limestone are found in the tails. Concentration of the material in the tailings deposit leads to environmental problems.

In this situation, it is advisable to change the scraper operation in such a way as to achieve the maximum value of  $E$ . In this case, it is necessary to ensure high efficiency of ghosting  $E_2$  at the rational mode  $d = d_{opt}$ . In terms of high humidity of raw materials such efficiency  $E_2$  provide rollers, where holes are continuously cleared of sticking. Humidity increases the strength of clay coatings. There are favorable conditions for their separation by applying insignificant efforts to the surfaces of hard parts of the raw material, which is achieved by roll-fingers.

Different variants of roll-fingers construction are considered. Basing on features of rolls-and-thumb drives construction, a variant of screening material particle between a lining shaft and a finger of a screen is possible, which leads to

interruption of the screening process. It is necessary to study the dynamics of material particles to exclude the possibility of such modes. The forces acting on a particle of circular shape are determined, and an analytical dependence that determines the condition to realize the clamping mode is obtained. It is shown that such a mode does not depend on the values of the forces acting on the particle, but it is determined by the values of the capture angle  $\alpha$  and the angle  $\beta$ , which characterizes the position of the contact point of the material particle to the finger. Determining functional dependence allows designers of the rumble to carry out the verification of the design to exclude the mode of clamping particles.

Determining the structural parameters of the screen it is important to provide the given size of raw material particles separation. This is due to the fact that there is a feasibility of implementing division at the level  $d = d_{onm}$ . It is shown that the size of the window, which provides the rational size of the particle's separation  $d_{onm}$ , is related to the height of the screen. The dependence for its calculation is received.

In **Chapter 4** a number of regression models to solve the problem of increasing the efficiency of the enrichment of raw materials are developed, their adequacy is proved, and the analysis of the results of the process modelling is performed.

In order to confirm the expediency of using a roll-and-pinion screen in the technological line for raw materials enrichment, it became necessary to create mathematical models for calculating enrichment efficiency  $E$  and the sifting of  $E_2$  providing availability and absence of such a sieve is in the technological line. This approach to modeling allows to share existing indicators with the expected results implementing roll-thumb drives, to assess the degree of effectiveness of the proposed solutions. It is shown that for solving the formulated problem, the use of linear multifactor regression models is acceptable. Developing the models, it has been taken a number of factors that depending on the production vary in significant way and its regulation is practically impossible. These include: the content of lime  $\alpha$  in the raw material to be processed (factor) and the moisture content of the raw material (factor). The boundaries of the factors change and other factors influencing the values of  $E, E_2$  in the conditions of experiments are determined. Using

orthogonal planning, an experiment plan is drawn up. A complete factor experiment of type «2<sup>2</sup>» are completed. A matrix method for calculating coefficients of regression dependence is used. To assess the adequacy of multi-factor models, the values of the variances of adequacy, the variability of reproducibility, and the homogeneity of the dispersions in the experiments proved are determined. An estimation of the significance of the coefficients in the regression equations is carried out. The Fisher's criterion confirmed the adequacy of the developed models. The modelling of the raw materials enrichment process using regression dependencies shows that 1% change in the moisture content of raw materials  $W$  leads to a higher percentage change in the  $E_2$  and  $E$  than 1% of the change in the content of limestone in the raw material, so the degree of influence of the model factors on the response function is different. The screening effectiveness  $E_2$  to a small extent depends on the content of lime. There is a significant dependence between  $E_2$  and the moisture content of raw materials. Increasing the moisture content of raw materials improves  $E_2$  efficiency to 12% and using a roller-thumb drive exceeds the existing figure by 2 times, which helps to stabilize the value of this indicator in the process of changing the moisture content of raw materials. The increase of  $E_2$  result in an increase in the enrichment efficiency  $E$  by 10-20% (compared to the version without a crash).

Statements outlined above proves the expediency of using roller-thumb drives in the processing lines for the enrichment.

In **Chapter 5** the features of construction of the experimental sample of a roll-and-pinion screen are highlighted, experimental research is carried out, and the proposed variant of the using a roll-and-pinion screen in the processing line for raw materials enrichment is presented.

The experimental sample of a roll-and-pinion screener, designed in laboratory conditions, implements the results of theoretical studies performed by the author in terms of its construction, as well as operation modes of such types of screens. This created the basis for conducting a series of experimental studies of the indexes of raw materials enrichment, realizing the modes typical for the operating technological



lines. The procedure of sampling for granulometric and chemical analysis of raw materials is conducted. The results of granulometric analysis indicate that the weight ratios of large classes in the raw material are predominant. Chemical analysis confirms increasing mass of concomitant elements in small size classes. A number of experimental studies are carried out in accordance with the procedure for planning the experiment described in Chapter 4. While conducting the research, the value of the percentage of limestone in the source product, as well as the moisture content of the sample material have been varied. The modes of materials classification with availability and absence of the roll-and-pinion screen were investigated. Fulfillment of granulometric and chemical analyzes of high-precision and sub-scratch products allowed to calculate the achieved indicators of the screening and enrichment efficiency, basing on multivariable regression models, and perform a comparative analysis of the considered approaches to the raw materials enrichment. The results of the experiments show that using a roller-thumb drive result in an increase of the mass of sub-set product. The mass of clay additives and small particles of limestone increases, and in conditions of high humidity (12%) of the initial product such increase is more noticeable (in 1,5-2 times), which testifies expediency of using roll-fingers in technological lines of enrichment. It is proposed to classify the material with a roll-thumb drive at the early stage of the processing of limestone raw materials, increasing clay additives and small particles of limestone. This will allow to increase the degree of purification of raw materials at the early stage of the processing process, to improve the working conditions of the product ringlets due to the lack of small clay particles, to improve the quality of the resulting crushed stone. The constructive decisions of rolls and drives of roll-and-pinion screener are proposed and patented. The solutions consist of the special arrangement of the disk fingers against the neighboring roller shaft, applying the original fastening of the disk fingers. They ensure the screener's efficiency and reduce time for repair work.

**Key words:** enrichment efficiency, classification of raw materials, roller-finger screening machine, limestone, moisture content of raw materials.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Публікації у закордонних 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).

*Публікації у фахових виданнях:*

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. Науково-технічний збірник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2016. вип. 64(105). С. 59-68.

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

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

*Матеріали конференцій:*

6. 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.

7. Дрешпак О.С. Визначення залежностей вапнякової сировини Західно-Тягинського 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.

8. 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.

9. 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.

*Інші видання:*

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

11. 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.

12. 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.

## ЗМІСТ

	стор.
<b>Перелік умовних скорочень.....</b>	<b>23</b>
<b>Вступ.....</b>	<b>24</b>
<b>Розділ 1. Аналіз недоліків існуючої технології збагачення неоднорідних вапняків та постановка задач дослідження .....</b>	<b>31</b>
1.1. Аналіз вимог до товарного вапнякового щебеню .....	31
1.2. Визначення особливостей неоднорідних родовищ вапняків .....	38
1.3. Аналіз структури та визначення недоліків існуючих технологічних ліній переробки вапняків .....	43
1.4 Дослідження теоретичних аспектів збагачення і класифікації вапняків та формулювання задач дисертаційної роботи .....	52
1.5. Висновки до розділу 1.....	58
<b>Розділ 2. Розробка математичної моделі для прогнозування показника ефективності збагачення неоднорідних вапняків .....</b>	<b>60</b>
2.1. Аналіз вихідної сировини неоднорідних вапнякових родовищ.....	60
2.2. Обґрунтування використаних показників ефективності технологічного процесу .....	66
2.3. Визначення аналітичних залежностей для прогнозування показника ефективності збагачення .....	70
2.4. Обґрунтування раціональних режимів грохочення, створення методики та алгоритму їх розрахунку .....	77
2.5. Розробка спрощеної методики прогнозування технологічних параметрів.....	86
2.6. Висновки до розділу 2.....	92
<b>Розділ 3. Обґрунтування конструктивних параметрів грохота за характеристиками сировини для класифікації вапняків .....</b>	<b>94</b>
3.1. Аналіз передумов використання валково-пальцевого грохота .....	94

3.2. Визначення раціонального конструктивного виконання грохота .....	97
3.3. Дослідження динаміки руху частинок матеріалу .....	101
3.4. Висновки до розділу 3.....	110
<b>Розділ 4. Розробка регресійних математичних моделей для розрахунку ефективності збагачення та класифікації вапняку .....</b>	<b>112</b>
4.1. Обґрунтування доцільності використання регресійного аналізу для розробки моделей .....	112
4.2. Аналіз адекватності нелінійних однофакторних моделей.....	115
4.3. Побудова та аналіз багатфакторних математичних моделей для розрахунку ефективностей збагачення та класифікації .....	122
4.4. Висновки до розділу 4.....	140
<b>Розділ 5. Обґрунтування змісту експериментальних досліджень показників ефективності збагачення та грохочення вапнякової сировини .....</b>	<b>142</b>
5.1. Визначення особливостей проведення гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини .....	142
5.2. Розробка експериментального зразка валково-пальцевого грохота .....	148
5.3. Отримання та аналіз експериментальних даних для побудови багатфакторних регресійних моделей .....	152
5.4. Обґрунтування структурної побудови технологічної лінії з валково-пальцевим грохотом .....	160
5.5. Висновки до розділу 5.....	164
<b>Загальні висновки.....</b>	<b>166</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>169</b>
<b>Додаток А</b> Методика розрахунку регресійних залежностей вмісту $\text{CaCO}_3$ від крупності часток та розрахунку показників ефективності збагачення сировини .....	180
<b>Додаток Б</b> Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії .....	191
<b>Додаток В</b> Акт впровадження результатів дисертаційної роботи №1.....	193

<b>Додаток Д</b> Акт впровадження результатів дисертаційної роботи №2.....	194
<b>Додаток Е</b> Список праць за темою дисертації.....	195

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

$\gamma_i$  – вихід продукту за  $i$ -м класом крупності у співвідношенні до початкового стану матеріалу (до розділення), %;

$\Sigma \gamma_i$  – сумарний вихід за  $i$ -м класом крупності, %;

$m$  – загальна маса матеріалу, кг;

$\alpha$  – вміст цільового компоненту у вихідному матеріалі, %;

$\beta_1$  – вміст цільового компоненту в надрешітному продукті (концентраті), %;

$\beta_2$  – вміст цільового компоненту в підрешітному продукті (хвостах), %;

$\varepsilon_1$  – вилучення цільового компоненту в надрешітний продукт, %;

$\varepsilon_2$  – вилучення цільового компоненту в підрешітний продукт, %;

$E$  – ефективність збагачення за цільовим компонентом в операції, %;

$E_2$  – ефективність класифікації за цільовим компонентом в операції, %.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Широке використання вапняків в промисловості і сільському господарстві вимагає залучення в переробку сировини неоднорідних вапнякових 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, так як 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. Необхідно продовжити пошук прийнятних способів переробки вапняку, які дозволяють здійснювати ефективне відокремлення глинистих додатків у різних класах крупності матеріалу простими і надійними в роботі технічними засобами.

Показники ефективності роботи існуючих пристроїв просівання в значній мірі 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 зв'язують показники ефективності збагачення і класифікації сировини неоднорідних вапнякових 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 щепеню.

**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 вапнякових родовищ, що здійснюється шляхом його класифікації. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. З урахуванням вимог до товарного вапнякового щепеню, 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 методику 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 Стьюдента – 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. Раціональне 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 його 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 багатофакторні 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 (по відношенню 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 23.05.2018р.) та у ТОВ «Кар'єр Новосілка», Тернопільська область, (акт впровадження № 104 від 10.04.2018р.).

2. Розроблено спосіб збагачення неоднорідних вапнякових 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.

**Особиста участь автора** у рішенні наукової задачі дисертаційної роботи знайшла відображення в змісті ряду самостійних публікацій. В роботах, виконаній у співавторстві, участь автора полягає: в [1] – у розробці математичної моделі для прогнозування показників збагачення і класифікації, створенні методики і алгоритму розрахунку раціонального значення крупності розділення матеріалу. в роботі [10] – у визначенні технологічної схеми збагачення вапняку; в роботі [11] – у конструктивному виконанні пальця грохота та його розмірах; в роботі [12] – у конструктивному виконанні дисків та особливості кріплення пальців валково-пальцевого грохота.

**Достовірність наукових результатів** визначена відповідністю припущень, прийнятих в багатofакторних 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. Дніпропетровск, 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.); Interational 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 – інші видання.

**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.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ ІСНУЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ ВАПНЯКІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1. Аналіз вимог до товарного вапнякового щабелю

Розглядаючи актуальність досліджень цього напрямку, слід у першу чергу звернути увагу на область застосування вапняків в промисловості і сільському господарстві, оцінити обсяги їх використання, виділити пріоритетних споживачів як з точки зору завдань, що вирішуються промисловістю України, так і екологічних проблем, що виникають при розробці родовищ. Очевидно, що для вирішення різних виробничих завдань необхідні вапняки різної якості. Звідси виникає необхідність аналізу необхідних показників якості і продуктів, що одержуються безпосередньо з вапняку, так і самого вапняку, що використовується без додаткової переробки. Такий аналіз дозволить зрозуміти роль вапняків, які одержують при розробці неоднорідних вапнякових родовищ, визначити місце, яке вони займають в загальному балансі виробництва мінералу. Очевидно, що можливості збагачення сировини залежать від умов, в яких здійснюється переробка, її вихідного складу, обладнання, яке для цього використовують. Ці чинники значною мірою визначають як структуру діючих технологічних ліній, так і раціональні режими їх роботи, що забезпечують необхідні для заданої сфери використання вапняків показники.

Вапняки широко використовують у металургійній, хімічній, цементній, будівельній, цукровій галузях промисловості, а також у сільському господарстві. У металургійній промисловості вапняк застосовують як флюсову добавку до руди з великим вмістом мінералів кремнію при виплавці чавуну і сталі [1, 2, 3]. У доменному виробництві України практично єдиним видом основного флюсу є вапняк, який використовують у вигляді природної форми мінералу (кальциту –  $\text{CaCO}_3$ ), а також його збагаченої похідної (вапна

CaO). Флюс застосовують для скріплення кристалів кремнезему, що знаходяться в залізній руді. Для флюсування порожньої породи руди і золи коксу потрібна значна кількість основних оксидів. З огляду на те, що більшість технологічних процесів у металургії направлено на видалення шкідливих домішок, які прибирають з розплаву повністю або частково шляхом використання шлаків (шлакостворюючих речовин), добавки основного флюсу значні. Найважливіша вимога до них – низький вміст кремнезему, глинозему, а також шкідливих домішок – сірки та фосфору [4]. Варто зазначити ще один важливий факт: вапнякові продукти в процесі плавлення металу утворюють захисний шар шлаку на його поверхні. Це спостерігається також при здійсненні операції лиття заготовок. Шар, який утворився, ефективно знижує втрати тепла з поверхні розплаву, що дозволяє економити енергетичні ресурси [5].

При виробництві цементу для будівельної галузі суміш глини з вапняком в певних кількісних співвідношеннях спікають в спеціальних печах при температурі 1400-1500 °С. Отриману спечену масу розмелюють в тонкий порошок, до складу якого в основному входять елементи Ca, Al, Fe, Si, O. З цементу, піску, щебеню шляхом додавання води і деяких інших добавок отримують основний будівельний матеріал – бетон. Подрібнений вапняк розміром 0-80 мм і бутовий камінь розміром 80-180 мм широко застосовують в будівництві як наповнювач бетону для будівельних сумішей. Тут вапняк виступає в ролі каталізатора хімічних реакцій, що протікають в них. Вапняк використовується як сировина для виробництва вапна, а також при виконанні оздоблювальних робіт в фасадах будівель [6,7,8]. Вапняковий пісок без домішок часто використовують як наповнювач при виробництві високоякісної продукції:

- керамічних виробів, плитки;
- вапнякового борошна;
- полімерно-піщаної черепиці;
- в якості наповнювача для бетонно-мозаїчних підлог.



У будівельній галузі вапнякову крупку розміром 1-10 мм застосовують при виробництві силікатної цегли, стінових блоків. Вона служить пластифікатором у штукатурних розчинах, полімербетоні, асфальтобетонних та інших сухих будівельних сумішах [9–11].

Вапняк є важливим реагентом у технологічному процесі скловаріння [12]. Скло майже на третину складається з карбонату кальцію, що міститься у вапняку. Складові вапняку виступають в ролі затверджувача, завдяки якому скло набуває твердості та щільності. До застосовуваної у скловарінні вапнякової крупки висуваються жорсткі вимоги – низький вміст заліза (не більше 0,2%, а для сортового посуду – 0,3%). Це необхідна умова для отримання безбарвного скла. Вміст кальциту повинен перевищувати 53%. Оксид кальцію, який отримують з вапняку, сприяє сілікатоутворенню, істотно полегшує процес варіння скла і забезпечує його прозорість.

Застосування вапняку при виробництві скла сприяє прояву антикорозійних і антиерозійних властивостей, підвищує стійкість до температурних і хімічних впливів, захищає скло від вивітрювання. Негашене вапно і вапняна мука використовують при виробництві скловолокна і склотканини [10].

Практично незамінним вважається використання вапняків при виробництві цукру. Із його допомогою здійснюють очистку бурякового соку від різного роду домішок. Вапняк виконує головну роль в процесі освітлення кінцевого продукту (цукру). У цукровій промисловості використовують вапно високої якості. Його отримують при дотриманні підвищених вимог до вапнякового щебеню. Для очищення цукру цукровий розчин пропускають через вуглекислий газ, що виділяється при випалюванні. У результаті обробки отримують очищений цукровий розчин, з якого виготовляють високоякісний цукор. Сатураційний осад (карбокальк або сатураційний вапняк), що залишився після завершення виробничого циклу, надалі використовують у сільському господарстві в якості мінерального добрива [13].

У тваринництві вапнякова мука використовується при виробництві комбікормів для тварин і птиці [14]. Яйценосні і м'ясні породи птахів потребують постійної наявності в раціоні мінералів, які сприяють швидкому формуванню кісткової тканини і шкаралупи яєць. Застосування вапнякового борошна в процесі годування тварин успішно покриває ці потреби. Використання крупки малого діаметра при годівлі птиці здійснюється не тільки шляхом її змішування з основним кормом, але і в якості самостійного харчового продукту.

Застосування вапняку в сільському господарстві пов'язано з необхідністю зниження кислотності ґрунту. Успішне вирощування злаків, овочів і коренеплодів можливо при підтримці заданої кислотності ґрунту (рН). Борошно вапнякове та доломітове є нейтралізатором кислотності (розкислювачем) ґрунту, що визначає її широке застосування в рослинництві.

Таким чином, в різних галузях народного господарства вапняковий щебінь виступає як основний елемент або ключова добавка при виробництві кінцевого продукту.

Обсяги використання вапняку в різних галузях промисловості і сільського господарства різні. Оскільки вимоги до цих продуктів не однакові, виникає необхідність аналізу цих обсягів, що дозволить сформуванню існуючої картини їх потреби і визначити роль неоднорідних вапнякових родовищ у забезпеченні цієї потреби.

Обсяги виробництва вапнякового щебеню в період 2010-2017 рр. коливаються в межах від 14,3 (2015 р.) до 26,3 (2011 р.) млн. тон на рік [15]. Виробництво щебеню в останні роки неухильно знижувалося, що в першу чергу пов'язано із зупинкою основних підприємств з виробництва флюсового вапняку Донецького регіону і АР Крим. У період 2015-2016 рр. спостерігався деякий підйом випуску вапнякового щебеню, що було зумовлено зростаючими вимогами виробництв металургійного переділу України.

У значних обсягах вапняковий щебінь поставляють для доменного, агломераційного, сталеплавильного і феросплавного виробництв, а також для

потреб цементного виробництва. Характерною особливістю є послідовне зменшення споживання вапняку іншими виробництвами, особливо хімічною промисловістю. Переважаюча частка щорічного споживання вапняків металургійною та цементною промисловістю зберігається і, швидше за все, в майбутньому їх споживання залишатиметься на високому рівні. Тому у першу чергу слід аналізувати вимоги галузевих стандартів і ДСТУ до вапнякових щебенів саме цих виробництв [4, 5, 9, 10].

Аналіз основних споживачів вапняків показує, що територіально вони зосереджені в південно-східному регіоні України. Це визначає доцільність розміщення родовищ вапняків у цьому регіоні України, так як при такому розміщенні зменшуються логістичні витрати, витрати на складування і перевезення щебеню.

Донецька область з 2014 року істотно знизилася обсяги виробленого високоякісного флюсового щебеню, у зв'язку з чим збільшилася частка виробництв Західного (Хмельницька і Тернопільська області) і Південного (Херсонська і Миколаївська області) регіонів. Однак вихідна якість сировини цих вапнякових родовищ невисока. Таким прикладом може служити вапняк Західно-Тягинського родовища, детальний аналіз властивостей якого виконаний у розд.2. дисертаційної роботи.

Вимоги різних галузей промисловості до вапнякового щебеню детально регламентовані як за якісними показниками (процентний вміст хімічних елементів, його міцність), так і кількісними (гранулометричний склад, вологість та інші). Вимоги найбільш значущих споживачів до товарних вапняків наведені в таблиці 1.1 [9].

У табл. 1.1 наведені граничні значення концентрації окремих мінералів у товарному продукті, причому для  $\text{CaO}$  і  $\text{MgO}$  приведена нижня допустима межа, а для інших компонентів – верхня гранична межа. Із табл. 1.1 видно, що вимоги до вапнякового щебеню досить високі, оскільки з очищеного кальциту  $\text{CaCO}_3$  отримують 56% цільового компонента  $\text{CaO}$ . При наявності у вапняках глинистих добавок (що характерно для неоднорідних вапнякових родовищ)

отримання високоякісного вапняку, що відповідає вимогам табл. 1.1, проблематично і можливо при високих показниках збагачення вихідної сировини.

Таблиця 1.1

### Вимоги до товарних вапняків

Якісні показники вапняків		ДСТУ, СОУ або ТУ для промисловостей				
		домен. вир-во, агломерація	метал. пр-вість	сталеплавил. феросплав. вир-ва	вир-во вапна	вир-во цементу
Класи крупності щебенів, мм		0-5, 5-20, 20-40, 40-80, 80-130	5-20, 20-40, 40-80, 80-130	5-20, 20-40, 40-80, 80-130	5-20, 20-40, 40-80, 80-130	0-5, 5-20, 20-40, 40-80
Цільові комп-ти, не менше, ніж	CaO, %	50,5	52,5	53,0	51,5	45,0
	MgO, %	5,0	5,0	3,5		2,0-4,0
Нецільові комп-ти, не більше, ніж	SiO <sub>2</sub> , %	3,0	2,0	2,0	8,0	25,0
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	4,0	3,0	Не норм.		
	S, %	0,15	0,15	0,15	Не норм.	Не норм.
	P, %	0,06	0,06	0,01	Не норм.	Не норм.

Нормативні документи визначають перелік конкретних вимог до щебеню та каменю з вапнякових порід [4, 5, 9, 10]. Вони регламентують вміст нецільових компонентів (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) у товарному щебені, які можуть характеризувати ступінь і глибину переробки в залежності від вимог галузі,

яка споживає вапняк. Залежно від хімічного складу вапнякові породи діляться на класи. Ці класи представлені в табл. 1.2.

Крім вимог до хімічного складу технічні умови регламентують і інші фізико-механічні властивості. До них слід віднести гранулометричний склад вапнякового щебеню до 80 мм і каменю 80-180 мм (див. табл.1.3), а також лещадність, вміст комової глини та міцність на стискання.

Таблиця 1.2

### Класи вапнякових порід

Показники	Класи карбонатних порід						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Вуглекислий кальцій CaCO <sub>3</sub> , %	92	86	77	72	52	47	72
Вуглекислий магній MgCO <sub>3</sub> , %	5	6	20	20	45	45	8
Глинисті добавки (SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	3	8	3	8	3	8	20

Таблиця 1.3

### Класифікація вапнякових порід за крупністю

Найменування	Розмір класу крупності, мм
Щебінь з вапнякових порід	Від 0 до 5 включно
	Більше 5 до 20 включно
	Більше 20 до 40 включно
	Більше 40 до 80 включно
Камінь з вапнякових порід	Більше 80 до 120 включно
	Більше 120 до 180 включно

Також нормативні вимоги обмежують вміст у фракції зерен менших нижньої і більших верхньої її меж (не більше 5%), що підвищує вимоги до пристроїв класифікації вихідної сировини. ДСТУ передбачає випуск щебеню дрібних класів крупності (фракція 0-5 мм), вимоги до якості яких не знижуються [9, 10]. Концентрація глинистих добавок не перевищує 20% (для VII класу). Верхні рівні вмісту цільових компонентів у фракціях не обмежуються. Це означає, що в процесі збагачення вапняку важливо не порушувати їх нижні граничні рівні. Різні рівні збагачення вапнякових порід повинні поєднуватися з можливою сферою їх подальшого застосування. Слід пам'ятати, що підвищення якості вапняку пов'язано з додатковими витратами і доцільність цього підвищення має бути зумовлена реальною необхідністю, пов'язаною зі сферою застосування щебеню.

## **1.2. Визначення особливостей неоднорідних родовищ вапняків**

Мета цього параграфа – відобразити різноманіття неоднорідних вапнякових родовищ, звернути увагу на хімічний склад вихідної сировини, умови її видобутку. Це дозволить вибрати із існуючих варіантів прийнятну для переробки сировину, орієнтовану на конкретного споживача, сформулювати завдання її збагачення.

Класифікація неоднорідних вапнякових родовищ у певному сенсі відображає особливості сировини, що використовується, і умов її переробки. Існуючі підходи до класифікації різні. Наприклад, С.С. Виноградовим для полегшення вибору методу розвідки, а також способу видобутку і переробки, була запропонована промислова класифікація родовищ вапняків, в основу якої покладено відмінності в умовах залягання, форми і розмірів покладів. Поділ вапнякових родовищ на два типи за принципом витриманості потужності пласта, будови та якості корисної копалини прийнято в «Інструкції щодо застосування класифікації запасів родовищ вапнякових порід» [16]. Відповідно до цих ознак В. А. Богословським і С. П. Першиним запропоновано

класифікацію родовищ осадових порід для баластної сировини. Поділ родовищ за кутом падіння покладу, його формою, а з горизонтальним заляганням - потужністю (значна і незначна) прийнято І. Залкінд і Ю. Нечаєвим при вивченні родовищ вапнякових порід Західного Уралу [17 – 21].

При вивченні родовищ вапнякових порід і визначенні напрямку механізації видобувних робіт може бути використаний ряд положень загальної класифікації нерудних родовищ за характером використаних засобів механізації, розробленої М. М. Чесноковим. У цій класифікації родовища групують за міцністю корисної копалини, що видобувається, за ступенем однорідності порід (однорідні з прошарками слабких порід, які можуть бути виділені при селективній розробці; неоднорідні, що вимагають спеціального збагачення з урахуванням міцності і однорідності), за потужністю корисної копалини (малої і середньої потужності з видобуванням корисних копалин одним уступом; середньої і великої потужності, де розробка виконується кількома уступами; практично необмеженої потужності), за кутом падіння, за потужністю розкриву, за міцністю розкривних порід, за рельєфом місцевості (рівнинні; з горбистим, слабо пересіченим рельєфом місцевості; гористі), за величиною запасів, за кліматичними умовами.

Будівельні властивості вапнякових порід детально вивчені І.Б. Шлаїном [22]. Він запропонував класифікацію родовищ і систем їх розробки, встановив вплив основних фізико-механічних властивостей сировини на способи її видобутку і переробки. У розробленій гірничо-технологічній класифікації враховують: з одного боку – різноманіття умов залягання і характеру порід, з іншого – вимоги до сировини з боку промислових підприємств. Важливо, що при цьому була дана кількісна оцінка класифікаційних ознак, що полегшує можливість проведення технологічних розрахунків.

У різних наукових роботах, присвячених класифікації родовищ корисних копалин, враховано близько сорока характерних ознак [23 – 30]. При розробці гірничо-технологічної класифікації родовищ вапнякових порід

використано ряд ознак (мінливість за змістом слабких різниць, неоднорідність за міцністю і т. п.), неврахованих у розроблених раніше підходах. При цьому ряд ознак, що характеризують особливості родовища, але не впливають на вибір системи розробки, не враховується. До таких ознак віднесені: генетичний тип, форма покладу, характеристика вторинних змін, стійкість порід і інші. Деякі ознаки, віднесені до класифікаційних, мають лише описове значення (кут падіння, тріщинуватість, обводненість) і не враховуються у зв'язку з цим при різних технологічних розрахунках.

Виходячи з недостатньої вивченості неоднорідних родовищ вапнякових порід України, створити єдину класифікацію з розкриттям взаємозалежностей різних ознак у даний час не представляється можливим. Тому гірничо-технологічна класифікація, що викладена нижче, створена за окремими ознаками або за групами ознак [22].

Найважливішими характеристиками вапнякових родовищ є показники міцності гірських порід. Вони впливають на сферу використання каменю, асортимент щебеню, визначають вибір принципової технологічної схеми і використаних техніко-економічних показників. Важливою є характеристика різнотипності та різносортності порід, мінливості літологічних особливостей, що впливають на вибір системи розробки.

До осадових порід скельного типу відносяться вапняки, доломіт, пісковики, гіпс, ангідрит, конгломерати, брекчії. Для виробництва флюсового щебеню та будівельних матеріалів розробляються родовища вапняків, доломіту і пісковиків. Карбонатні породи (вапняки, доломіт) складаються переважно із кальциту з включеннями карбонату магнію і доломіту. У таких породах практично завжди містяться домішки у вигляді глини, піску, кварцу.

Хімічний склад вапняку (кальциту) такий: 56,04% CaO та 43,96% CO<sub>2</sub>. При розробці вапнякових родовищ України виявлені додаткові домішки у вигляді карбонатів магнію, глини, піску, кварцу, мергелю, польового шпату, слюди і інших мінералів. В існуючих класифікаціях число вапнякових порід є



більшим 20. Їх найменування в основному визначаються наявністю і вмістом кальциту, доломіту, глинистої, кремнієвої і піщаної складових.

У дисертаційній роботі увага зосереджена на Західно-Тягинській ділянці Тягинського родовища вапняків (Херсонська область), яке є типовим представником неоднорідного вапнякового родовища. Сировина цього родовища використана при проведенні експериментальних досліджень дисертаційної роботи, аналізі її хімічного і гранулометричного складу.

Західно-Тягинське родовище представлено слабоокремненими вапняками з глинистими прошарками невеликої потужності. Істотна неоднорідність складу сировини і товщини шарів залягання, пов'язана з умовами первинного формування родовища і протікання вторинних процесів (вивітрюванням, метаморфізацією і т.п.), обумовлює відмінності фізико-механічних властивостей і є важливою особливістю, яку слід враховувати при виборі технологічної схеми підготовки і переробки вапняку. Кількість і неоднорідність домішок піщано-алевритового матеріалу і кремнезему (глини) при розробці поточного шару вапняку визначає технологію його дроблення і класифікації, методи і засоби підвищення вмісту вапняку  $\text{CaCO}_3$  в кондиційних класах крупності готового продукту. Додатковим фактором, який ускладнює переробку вапняку, є підвищена вологість гірської маси, завдяки якій утворюються конгломерати із глини з тонкозернистим включеннями вапняку. Конгломерати частинок часто сприяють збідненню кондиційних класів крупності, а при перевалках сировини, пов'язаних з доставкою до кінцевого споживача, частково руйнуються і утворюють мілкі класи крупності, що не відповідають вимогам ДСТУ [9, 10]. Конгломерати схильні до налипання на поверхнях перевалочних ємностей (стінках вагонів, кузовах самоскидів, ківшах фронтальних навантажувачів і т.п.). Підвищена вологість ускладнює видобуток і збагачення вапняку, призводить до зменшення продуктивності основного обладнання машин технологічного процесу, а в деяких випадках призводить до повної зупинки виробництва.

В геологічній будові Західно-Тягинського родовища у межах вивчених глибин присутні осадові породи неогенового і четвертинного періодів. Корисна копалина (кальцит) представлена вапняками понтічного, меотичного, верхньосарматського віку. Загальна потужність корисної копалини коливається від 3 до 22 м. Прошарки глинистих вапняків і глин, що залягають у верхній частині розрізу верхньосарматських відкладень, віднесені до проміжного розкриву. Розкривні породи представлені ґрунтово-рослинним шаром, суглинками, глинами, плитчастими і зруйнованими раковино-детритними вапняками потужністю від 0 до 18,7 м при середній потужності 4,97 м. Глинисті породи розкриву містять уламки вапняку і гіпсових включень (більше 3 мм), мають підвищені силікатні і глиноземні модулі.

Аналіз даних свідчить про наявні відмінності у складі вапняків, їх фізико-механічних властивостях. Вапняки різних шарів характеризуються порівняно високим вмістом кальцію, низьким вмістом магнію, нерівномірним вмістом кремнезему. Змішування порід різних складових веде до зниження вмісту кальциту в товарних продуктах, а також до підвищення середнього вмісту нерозчинного залишку в готовій продукції, що обмежує сферу її використання в металургійній і цементній промисловостях.

Особливості Західно-Тягинського родовища вапняків послужили основою для розробки рекомендацій з переробки його сировини. Рекомендації складені таким чином, що їх виконання забезпечує отримання продукту, який наближається за своїми властивостями до вимог споживача. При цьому витрати на його переробку незначні. У першу чергу це досягається селективним відпрацюванням шарів родовища. При розробці пласта намагаються виключити потрапляння в продукт глинистих порід проміжного розкриву. Раковино-детритні вапняки контічного ярусу можна розробляти одним уступом, але для отримання високоякісної сировини їх краще розробляти окремо. Порооди скельного розкриву придатні для отримання високоякісної сировини за умови їх попереднього сортування в суху погоду. Для металургійної промисловості доцільно використовувати вапняки

понтічного ярусу і верхньої частини меотичного ярусу, що характеризуються низьким вмістом кремнезему. Вапняки сарматського ярусу рекомендовано використовувати для виробництва вапна. Незатребувані класи крупності, відходи класифікації використовують для виробництва цементу.

Із викладеного вище випливає висновок про те, що розробка неоднорідних родовищ передбачає селективне відпрацювання шарів, причому сировину кожного шару орієнтують на певного споживача (або декількох споживачів). Через розбіжності хімічного складу, фізичних властивостей сировини методи переробки різних шарів (і, відповідно, технологічне обладнання, що використовується) можуть відрізнитися. З огляду на той факт, що СГУ [4, 5] у першу чергу встановлює граничні рівні вмісту глинистих добавок у переробленій сировині, в дисертації аналізуються технологічні лінії, орієнтовані на переробку сировини зі значним вмістом цих добавок. Особлива увага до глинистих добавок обумовлена властивостями глини (зокрема, її пластичністю), які в значній мірі визначають показники класифікації сировини (особливо при підвищеній вологості). Наступний параграф дисертації присвячений аналізу технологічних ліній, які використовуються для переробки вапняків.

### **1.3. Аналіз структури та визначення недоліків існуючих технологічних ліній переробки вапняків**

Різноманіття результатів хімічного і гранулометричного аналізів сировини неоднорідних вапнякових родовищ передбачає використання різних за своєю структурою і застосуванням обладнання технологічних ліній. Підбір обладнання здійснюють з урахуванням як складу сировини у косяку, що розробляється, так і області подальшого використання переробленої сировини. У той же час в діючих технологічних лініях можна виділити загальні ознаки. Суха переробка сировини передбачає наявність операцій дроблення і подальшої класифікації матеріалу. Необхідність дроблення сировини

обумовлена тим, що значна частина товарного щебеню має розмір, менший 80 мм. Таким чином, камені великих розмірів підлягають подрібненню. Подальша класифікація матеріалу необхідна для виділення класів крупності, що відповідають вимогам ДСТУ. При цьому враховується той факт, що концентрація вапняку зростає з ростом крупності частинок. Ясно, що найчастіше перероблений матеріал внаслідок наявності значних домішок не відповідає якісним показникам, визначеним ДСТУ. Це у першу чергу стосується матеріалів дрібних фракцій. Тому класи крупності менші 20 мм на підприємствах, що розробляють неоднорідні вапнякові родовища, часто складають у відвал. Діючі підприємства змушені накопичувати такий матеріал, формуючи техногенні зони на території гірничого відводу значною місткістю (до 10 млн. т). Сумарна цифра матеріалу, що складається основними працюючим підприємствами, досягає 200 млн. т [15]. Таке масштабне накопичення пов'язане з тим, що виробники здійснюють збагачення основних класів крупності 20-80 мм шляхом виведення глинистих частинок в підрешітний продукт, що направляється у відвал. Причому обґрунтуванням прийнятої межі поділу вважається здатність грохоту здійснювати ефективно грохочення вапнякового щебеню сухим способом з вологістю до 8%. При більшій вологості спостерігається забивання просіюючих поверхонь грохотів глинистим матеріалом. Такий підхід до переробки визначив штучну появу товарних класів крупності 25-50 мм і 50-80 мм, характерних тільки для вапнякових порід.

На рис. 1.1 наведена найбільш часто використовувана схема переробки вапняку. У наведеній схемі переробки сировини відсутні пристрої, які здійснюють відділення глини від вапняку. Тому ефект збагачення сировини забезпечується виключно за рахунок складування у відвал дрібних класів, що містять глинисті добавки. Наявність в вапнякових породах значних за масовим показником глинистих добавок створює істотні труднощі в процесі переробки сировини. Цей недолік проявляється в тому, що глина покриває поверхню кусків вапняку, утворюючи при цьому досить міцну плівку, яка погано

піддається руйнуванню. З огляду на те, що ДСТУ обмежують рівень вмісту глини в товарному продукті (причому, ці обмеження досить жорсткі), завдання відділення глини від більш міцного матеріалу – кальциту вирішувалося раніше [31–45] і продовжує бути актуальним у нинішніх умовах. Видалення глинистих добавок є однією з основних задач, остаточно не розв'язаною досі.

Сепараційні апарати, які можуть бути застосовані для класифікації матеріалу сухим способом [46–61], не експлуатуються на діючих підприємствах через слабку розподільчу здатність, невисоку продуктивність і високу чутливість до зміни параметрів вихідної сировини.

Сухі методи переробки сировини з метою відділення глинистих включень до сих пір недостатньо ефективні і потребують удосконалення. Відомий, наприклад, спосіб обробки вапнякових порід, що полягає у використанні металевого пристрою, який забезпечує шматкам вапняку, покритим глинистою оболонкою, значну кінетичну енергію [62].

Рухаючись з високою швидкістю, шматок гірської породи стикається з металевою поверхнею. У результаті удару відбувається відшарування глини від поверхні, що створює можливість відділення цього компоненту і переміщення в підрешітний продукт. Недолік способу полягає в істотних витратах енергії на забезпечення необхідної швидкості руху частинок. Результати переробки матеріалу свідчать про те, що відділення глини відбувається не в повній мірі, причому ефективність процесу різна для матеріалів різної крупності. Слід також врахувати, що досліді, проведені авторами способу при низькій вологості сировини (до 6%), слабо відображають реальні умови переробки вапняків в умовах роботи підприємства протягом року. Використання значних рівнів накопиченої і звільненої при ударі кінетичної енергії вимагає застосування конструктивних елементів установки, що мають підвищену міцність. Слід припустити, що такі установки не матимуть високої надійності та довговічності.

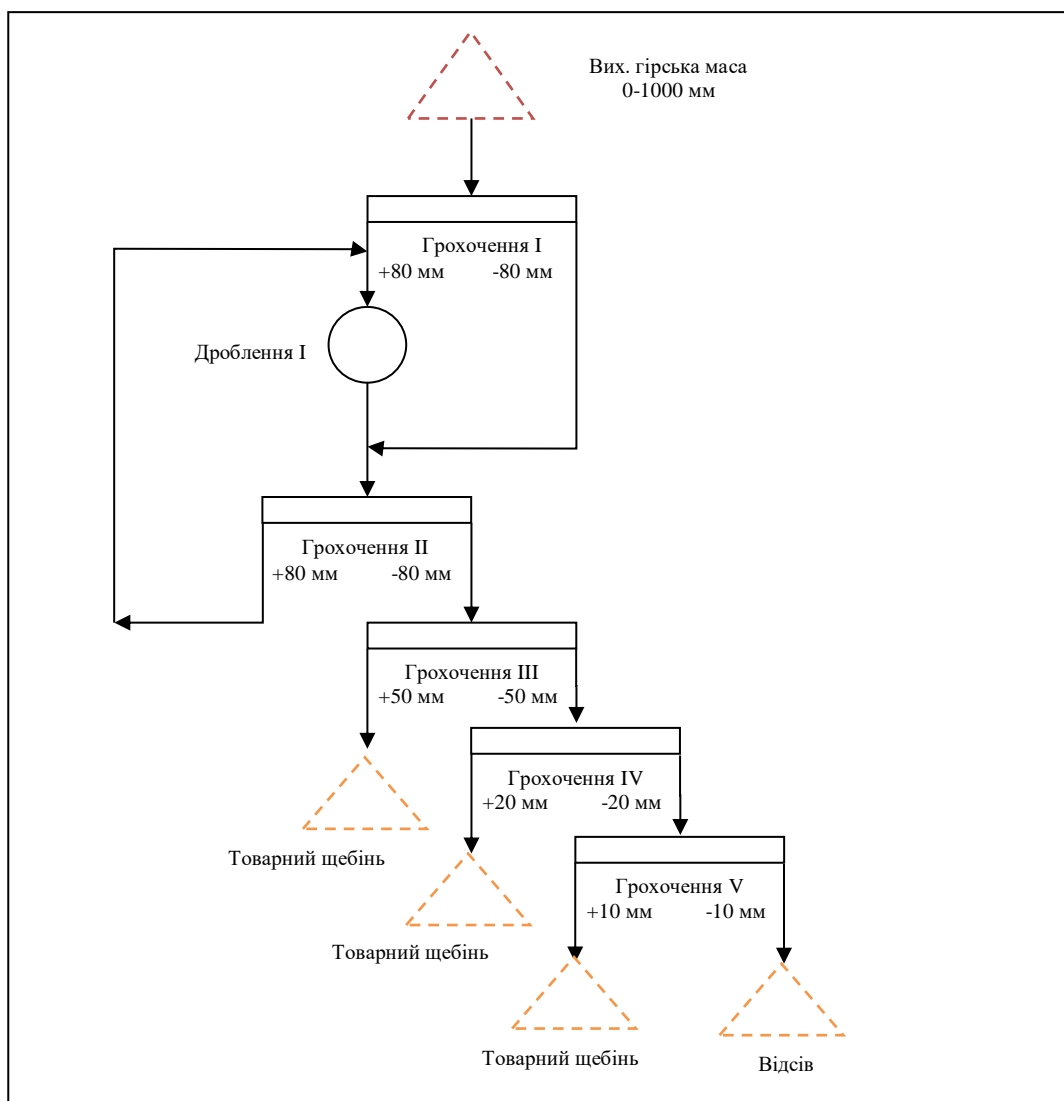


Рис. 1.1. Технологічна лінія переробки вапняку.

З огляду на вищевикладені недоліки існуючого способу відділення глини, необхідно здійснити подальший пошук прийнятних методів обробки, що характеризуються меншими енергетичними витратами, дозволяють здійснити ефективне відділення глини в різних класах крупності шляхом застосування простих і надійних в роботі технічних пристроїв. Створені установки повинні бути сумісними з існуючим технологічним обладнанням як за продуктивністю їх роботи, так і в забезпеченні якості товарного продукту. Тому при розробці важливо аналізувати не тільки характеристики нового пристрою, але і характеристики всієї технологічної лінії, до складу якої увійде цей пристрій. Для зниження енергоємності процесу необхідно відмовитися від

удару як механізму відділення глини від шматків гірської породи. Якщо процес відділення глини пов'язувати з тертям, що виникає між конструктивними елементами установки і кусками гірської породи, то слід очікувати зниження рівня енерговитрат. Цей варіант характеризується меншими навантаженнями на робочі поверхні пристрою, що передбачає підвищення його надійності і довговічності. Таке рішення задачі розглядається в даній дисертації.

Наявність глинистих добавок в надрешітному продукті має і інші негативні наслідки. Важливим параметром, що впливає на отримання високоякісного вапнякового щебеню, є вологість вихідної сировини. Вологість істотно впливає не тільки на ефективність грохочення, а й визначає продуктивність операції дроблення. Так, наприклад, поправочний коефіцієнт, що враховує продуктивність установки, істотно знижується з підвищенням вологості в умовах дроблення на щоківій дробарці [62–67].

Необхідність виділення в товарних щебнях класів різної крупності передбачає застосування відповідних класифікуючих пристроїв. Відомо [68], що дрібні глинисті частки в процесі грохочення навіть при незначній вологості схильні до окомковування. Утворені при цьому крупні частки глини потрапляють в надрешітний продукт, істотно знижуючи показник його якості. Крім того, при використанні сит з дрібними осередками спостерігається налипання на них глини, що знижує ефективність грохочення, а в деяких випадках призводить до неможливості реалізації процесу класифікації. При сухій переробці матеріалів негативні наслідки, пов'язані з наявністю глини, проявляються в умовах підвищеної вологості, коли пластичність глини підвищується. Саме це є причиною зупинки технологічних ліній переробки сировини в кар'єрних умовах в періоди значних (особливо в зимові періоди) атмосферних опадів [69]. При цьому збиток, пов'язаний з недостатнім випуском продукції, значний.

Зупинимося на аналізі такого впливу більш докладно. В [70] доведено, що капілярна вода, яка знаходиться в порах і тріщинках зерен оброблюваного матеріалу, а також хімічно зв'язана вода не впливають на процеси грохочення.

Негативні явища відбуваються під впливом механічно примішаної (гігроскопічної) вологи на поверхні зерен. Причому, в дрібних класах крупності, що мають велику площу поверхні, вміст вологи зростає. Присутність вологи на поверхні зерен призводить до злипання дрібних частинок матеріалу. Крім того, спостерігається їх налипання на великі куски гірської породи. Останнє призводить до погіршення показників товарного продукту, так як ДСТУ обмежує вміст у визначених класах крупності зерен з розмірами, меншими нижньої межі поділу. Налипання глини на дротяну основу сита призводить до зменшення площі отворів. Утруднюється проходження дрібних зерен через отвори сита і ці зерна залишаються в надрешітному продукті. В [64, 70–72] наведені графічні залежності, що характеризують зв'язок показника ефективності грохочення від вологості просіяних частинок (рис.1.2).

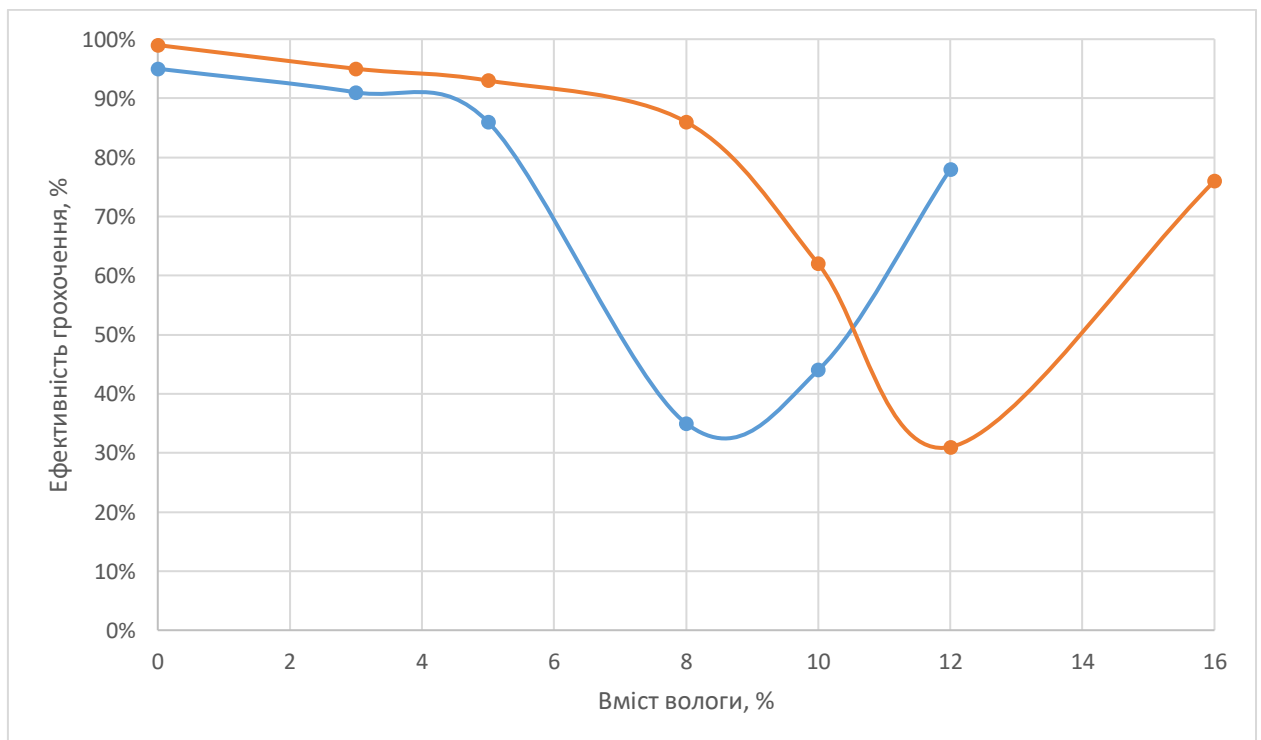


Рис. 1.2. Ефективність грохочення однорідних матеріалів різної вологості.



Розглянуто також [73, 74] варіанти грохочення вологоємного і невологоємного матеріалів. Результати свідчать про те, що характер зміни кривих для розглянутих матеріалів однаковий. При низькій вологості показник ефективності грохочення  $E_2$  руди має високі значення. Збільшення рівня вологості  $W$  вище 6% призводить до суттєвого зменшення показника ефективності грохочення  $E_2$  (до 30%). Подальше насичення матеріалу водою призводить до прояву ефектів, характерних для мокрого грохочення. При цьому ефективність процесу знову зростає.

Ясно, що в умовах сухого грохочення, яке застосовується на кар'єрах при переробці неоднорідних вапнякових родовищ, необхідно прагнути до розширення області з високим показником ефективності грохочення в напрямку збільшення вологості  $W$  сировини, що переробляється. Бажана форма (крива 2), наведена на рис. 1.3, повинна відповідати цій вимозі.

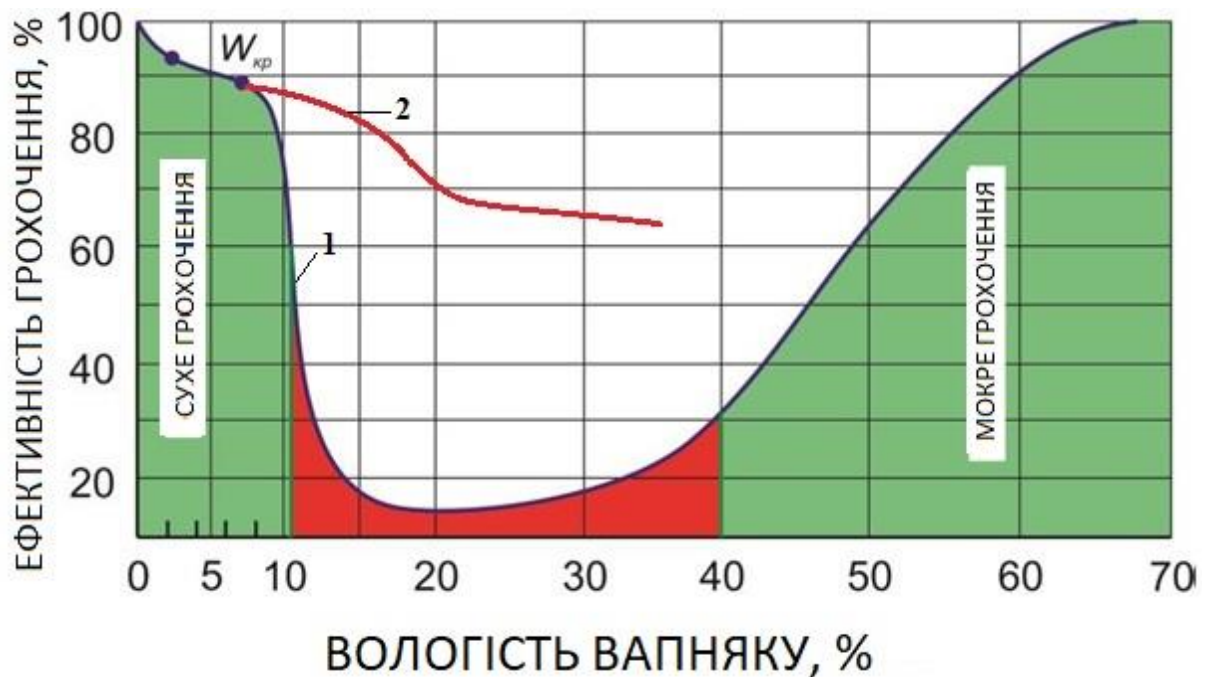


Рис. 1.3. Залежність ефективності грохочення неоднорідних вапнякових порід від вологості вихідної сировини [75]. Крива 1 – існуюча залежність; крива 2 – бажана форма кривої.

Реалізація залежності 2 (рис. 1.3) дозволить стабілізувати характеристики пристроїв грохочення у певному діапазоні зміни вологості

вихідного матеріалу, що в свою чергу призведе до підвищення продуктивності грохотів в умовах підвищеної вологості, зменшення залежності режимів роботи обладнання від погодних умов. Реалізація характеристик призведе до скорочення перерв у роботі технологічних ліній в період значних атмосферних опадів.

Технології з переробки вапнякової сировини і отримання кінцевого продукту вимагають поділу її за класами крупності, причому в більшості випадків мова йде про лінії значної продуктивності. Наприклад, при видобутку і переробці однорідної вапнякової сировини продуктивність обладнання, що класифікує, може досягати 1000 т / год і більше. Тут широко використовують вібраційні грохоти різних типорозмірів і конструктивного виконання. Вони значною мірою відповідають експлуатаційним вимогам і тому їх широко використовують у світовій практиці переробки сировини. З метою їх повсюдного впровадження створена сучасна наукова база [76–83]. Розроблено ефективні просівні поверхні, виконано моделювання процесів класифікації, що дозволяє вибрати раціональні параметри грохотів, режими їх роботи для забезпечення необхідних технологічних показників. Незважаючи на тривалий досвід виробництва і експлуатації вібраційних грохотів, є ряд сировинних продуктів, в технології переробки яких використання вібраційних грохотів не дає задовільних результатів. Це визначає пошук альтернативних рішень. Перш за все це стосується класифікації вапнякової гірської маси підвищеної вологості зі значним вмістом дрібної фракції і наявністю глинистих частинок. Наприклад, грохочення відсіву вапняків, доломіту, гранітного щебеню з підвищеним вмістом глини вимагає застосування спеціальних засобів, що виключають налипання, окомкування, віброущільнення.

В останні роки у зарубіжній практиці переробки сировини вапнякових родовищ набули широкого поширення валкові грохоти. На міжнародному ринку є комерційні пропозиції більше сорока зарубіжних фірм, що виготовляють валкові класифікатори для різних умов експлуатації. Значний

інтерес до цих механізмів викликаний тим, що вони дозволяють вирішувати ряд проблемних питань, зокрема, здійснювати класифікацію вологих, липких, дрібних матеріалів підвищеної вологості з високою ефективністю і малими питомими витратами енергії. Докладний аналіз принципу дії, конструктивних особливостей цих пристроїв виконаний в розд.3. З аналізу випливає, що запропоновані конструктивні рішення орієнтовані на переробку сировини, яка має конкретні характеристики і властивості. Тому має сенс проведення наукових досліджень в частині вдосконалення структури валкового грохоту з урахуванням завдань класифікації сировини неоднорідних вапнякових родовищ при сухому збагаченні в кар'єрних умовах.

У дисертації розглядається пристрій грохочення, що здійснює класифікацію сировини шляхом прикладання зовнішніх сил, що створюються рухомими елементами пристрою. Конструктивне виконання пристрою таке, що налипання глини в процесі класифікації матеріалу не відбувається, що забезпечує високу ефективність грохочення.

Існуючий підйом показника ефективності грохочення в області високих значень вологості (мокре грохочення) визначає принципову можливість використання таких режимів переробки сировини неоднорідних вапнякових родовищ. При цьому слід оцінити трудомісткість таких робіт і можливість їх практичної реалізації в кар'єрних умовах. Так, наприклад, для ефективного видалення глинистих часток дослідники пропонували підготовчу промивку щебеню в коритних мийках з подальшим фінальним гідрогрохоченням і зневодненням товарного продукту [64]. Такий підхід багаторазово підвищує вартість кінцевого продукту, значно ускладнює технологічну схему, змушуючи виробників обладнати шламовідстійники і лінії оборотної води. Крім того, така технологічна схема характеризується сезонністю робіт. Промивання шламу вимагає особливих форм утилізації, а готовий щебінь має схильність до змерзання через підвищену вологість.

Аналіз свідчить про те, що мокра переробка неоднорідних вапнякових порід в кар'єрних умовах пов'язана з істотними труднощами через відсутність

умов для забезпечення виробничого процесу зворотною водою, складність утилізації шламів збагачення і створення екологічно прийняттого варіанту для водовідведення, включаючи виділення земельної ділянки з її подальшою обов'язковою рекультивацією. З цієї причини автор вважає за доцільне удосконалення сухих методів переробки сировини шляхом покращення експлуатаційних характеристик обладнання, яке використовується [65, 66].

#### **1.4. Дослідження теоретичних аспектів збагачення і класифікації вапняків та формулювання задач дисертаційної роботи**

У попередніх параграфах цього розділу розглянуті проблеми, що виникають при переробці сировини неоднорідних вапнякових родовищ. Ці проблеми пов'язані з необхідністю відділення глини від кусків гірської маси, зі стабілізацією режимів роботи грохотів в умовах мінливої вологості, з визначенням раціональних режимів роботи обладнання, що забезпечують необхідні показники товарного продукту. Ясно, що ці завдання стосуються області збагачення мінеральної сировини, її класифікації.

Аналізуючи теоретичні підходи до вивчення процесів збагачення сировини, можна прийти до висновку, що значна частина досліджень присвячена отриманню аналітичних і стохастичних залежностей, які зв'язують показник ефективності збагачення  $E$  з технологічними і конструктивними параметрами пристроїв, що реалізують процес збагачення. Цьому напрямку присвячені роботи [1, 17, 46, 69, 76, 77, 84–86]. Оскільки ефективність збагачення  $E$  пов'язана з рядом параметрів, що характеризують особливості протікання процесу і є його самостійними характеристиками, то визначенню підлягають також показники якості концентрату  $\beta$ , виходу продукту  $\gamma$ , вилучення  $\varepsilon$ . З огляду на значну різноманітність процесів збагачення, наявність характерних особливостей їх протікання, зв'язки між розглянутими показниками мають свої особливості, що і є предметом багатьох досліджень [89–91]. Важливим є те, що в області наукових досліджень встановлено

перелік загальноприйнятих параметрів, які досить повно характеризують усі сторони процесів, що протікають.

Іншою важливою особливістю теоретичного підходу до вивчення явищ, що відбуваються при збагаченні мінералів, є використання теорії ймовірностей і математичної статистики [92]. Очевидно, що такий підхід виправданий, тому що характеристики вихідної сировини, як правило, змінюються випадковим чином і це вносить певні корективи в досягнуті при збагаченні показники. Відомі математичні моделі для розрахунку показників ефективності збагачення, що базуються на використанні методів математичної статистики [91, 92]. Основу такого моделювання складає визначення функцій розподілу випадкових величин, що характеризують показники вихідної сировини, а також сепараційних характеристик використаного для класифікації обладнання. Для показників сировини неоднорідних вапнякових родовищ такі дослідження не були проведені.

Технологічні лінії, які використовують в практиці збагачення вапняків, побудовані на принципі класифікації вихідної сировини, що враховує зв'язок між розміром частинок і вмістом в них вапняку. Однак характер такого зв'язку до цих пір не був встановлений. Його невизначеність створює проблему вибору оптимального режиму роботи пристрою грохочення. Проблема може бути вирішена шляхом встановлення характеру існуючого зв'язку, розрахунку оптимального режиму класифікації (у першу чергу оптимальної крупності розділення частинок) і прогнозування на цій основі очікуваних показників ефективності збагачення, виходячи з хімічного і гранулометричного аналізів вихідної сировини. Для цього необхідно створити математичну модель для розрахунку показника ефективності збагачення, яка дозволяє в умовах зміни властивостей вихідної сировини в процесі розробки родовища, експлуатаційних характеристик пристроїв класифікації прогнозувати рівень збагачення, що досягається. Попереднє (до моменту установки технологічного устаткування) виконання такого розрахунку дозволить зіставити отримані результати з необхідними показниками, що характеризують властивості

товарного продукту, зробити висновок про ефективність збагачення, що досягається, і, в разі необхідності, визначити шляхи її подальшого підвищення.

Проведено ряд різноманітних наукових досліджень в області класифікації матеріалів підвищеної вологості [82, 83, 95–103]. Різноманіття пристроїв для класифікації, які реалізують принципи сухої та мокрої переробки вихідної сировини, створило умови для формування окремих напрямків, що враховують особливості певних конструктивних рішень, режимів їх роботи. Дослідженням процесів сухої класифікації сировини займалися видатні вітчизняні та зарубіжні вчені: Андреев С.Є., Бардівський А.Д., Бердус В.В., Блехман І.І., Вайсберг Л.А., Картавий Н.Г., Левенделл Е.Е., Левенсон Л.Б., Ліандов К.К., Надутий В.П., Непомнящий Е.А., Олевський В.А., Олюнін В.В., Потураєв В.Н., Рундквіст К.А., Учитель А.Д., Франчук В.П., Червоненко А.Г., Шлаїн Б.І. та інші.

Так як переробка вапняків передбачає їх поділ за крупністю з використанням в якості пристроїв для класифікації грохотів, зупинимося на дослідженнях в області грохочення сухих матеріалів. У теоретичному плані становлять інтерес траєкторії руху окремих частинок і, як результат, умови їх поділу. Однак внаслідок різноманіття форм, розмірів частинок матеріалу вивчення траєкторій їх руху є досить трудомістким і не дає повного уявлення про характер явищ, які відбуваються. Тому в практиці застосовують методи дослідження, що розкривають більш загальні закономірності поведінки частинок матеріалу, який підлягає класифікації. Йдеться про використання методів теорії ймовірностей і математичної статистики [93]. Проведені дослідження спрямовані на отримання залежностей для розрахунку статистичних характеристик, визначення оцінок значень цих параметрів, виходячи з результатів експериментальних досліджень, розрахунок параметрів, що характеризують точність отриманих оцінок з подальшим формуванням довірчих інтервалів [93].

При аналізі пристроїв грохочення важливе місце приділяють дослідженню силових впливів на частки матеріалу в процесі їх поділу. На вібраційних грохотах частки піддаються не тільки впливу сил тяжіння, а й додатковому силовому впливу [104]. Істотна увага приділяється аналізу форми отворів сит, які використовують в грохотах. Раціональну форму отвору сита пов'язують з характеристиками матеріалу, що підлягає класифікації [78]. Існують різноманітні рекомендації, що стосуються встановлення раціональних меж поділу матеріалів окремих класів крупності. Доведено, що ефективність класифікації вище, якщо ці межі звужені. У той же час необхідно орієнтуватися на допустимі розміри частинок у товарних продуктах, які визначаються ДСТУ.

При аналізі ефективності грохочення значна увага приділяється площі поверхні просіювання, порядку розташування отворів на її поверхні. Розраховують ймовірність попадання частинки розміром нижче межі поділу в отвір сита [104, 105]. Усе це дозволяє теоретично передбачити рівні ефективності грохочення матеріалів, що досягаються, обґрунтувати прийнятні технічні рішення. У той же час стає очевидним той факт, що спроба дослідників врахувати безліч чинників, які впливають на класифікацію, призводить до суттєвого ускладнення аналітичних залежностей, формування громіздкого математичного апарату, використання якого ускладнено не тільки з точки зору збільшення обсягу виконаних обчислень, але і формування бази вихідних даних для здійснення таких розрахунків. Безліч параметрів, що представляють базу вихідних даних, змінюються випадковим чином, що істотно ускладнює розрахунок. Тому останнім часом для дослідження процесів у складних системах (зокрема, грохотах) використовують регресійний аналіз [79]. У якості факторів, що безпосередньо впливають на ефективність грохочення, приймають, наприклад, такі як: продуктивність установки, швидкість обертання короба грохоту, нахил поверхні грохочення та інші [79]. Підхід базується на формуванні досить простих аналітичних залежностей, що пов'язують ефективність грохочення з технологічними і

конструктивними параметрами. Передбачається проведення експерименту для отримання вихідних даних, необхідних для побудови регресійної моделі. Так як вихідні дані для розрахунку отримують експериментальним шляхом, то результати моделювання процесів мають високу ступінь достовірності. Частина робіт присвячена оптимізації конструктивних параметрів грохотів [78, 99, 107–111], що передбачає формулювання і рішення задач параметричної оптимізації. Однак такий підхід має певні недоліки. Експериментальні дані для побудови регресійних моделей зазвичай отримують в лабораторних умовах, що передбачає певну ступінь їх відмінності від виробничих режимів. Це може вплинути на розташування точок оптимуму, внести похибку в результати розрахунку. Інший недолік підходів із застосуванням регресійного аналізу полягає у тому, що прагнення дослідника до скорочення кількості параметрів, які враховуються в моделі (і відповідного скорочення необхідної кількості експериментів), призводить до того, що деякі параметри, представлені в моделі у вигляді їх середніх значень, не відповідають реальним режимам роботи обладнання і вносять в розрахунок істотну похибку.

Автор бачить певні переваги використання регресійного аналізу для обробки експериментальних характеристик вихідної сировини вапнякового родовища. На цій основі можливе розкриття стохастичною зв'язку між якістю надрешітного продукту пристрою класифікації (грохоту) і граничною крупністю розділення частинок. Така постановка задачі дозволить шляхом моделювання майбутнього процесу класифікації визначити режим роботи грохоту, що відповідає необхідному рівню показника збагачення сировини.

Регресійні моделі представляють також інтерес з точки зору оцінки впливу зміни вологості сировини в процесі розробки родовища на показники збагачення і класифікації. Необхідність такої оцінки пов'язана перш за все з використанням нової оригінальної конструкції грохоту, розглянутої в розд.3, яка реалізує певні переваги в частині забезпечення стабільності експлуатаційних характеристик.



Викладені вище аргументи дозволяють сформулювати наукове завдання дослідження. Воно полягає у встановленні закономірностей, що зв'язують показники ефективності збагачення і класифікації сировини неоднорідних вапнякових родовищ з її вихідними характеристиками, технологічними і конструктивними параметрами обладнання, яке здійснює її переробку, визначенні на цій основі раціональних параметрів, що забезпечують необхідні показники товарного щебеню.

Рішення наукової задачі має підтвердити ефективність запропонованої в дисертаційній роботі концепції збагачення сировини, розкрити можливості, пов'язані з її реалізацією, запропонувати нові конструктивні рішення елементів, що вводяться в технологічну лінію і забезпечують функцію відділення глинистих добавок від кусків гірської маси, стабілізацію показників ефективності грохочення в розглянутому діапазоні зміни вологості.

Для вирішення сформульованої наукової задачі необхідно:

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 методику 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.

### **1.5. Висновки до розділу 1**

1. Вимоги державних стандартів до товарних вапняків досить високі. Вони стосуються як хімічного, так і гранулометричного складу товарних продуктів. Використовують декілька класів крупності перероблених вапнякових порід. Вміст глинистих частинок у товарному продукті нормується. У різних класах вапнякових гірських порід граничні значення глинистих добавок різні, проте не перевищують 20% (для VII класу).

2. Сировина неоднорідних родовищ вапняків України характеризується значним вмістом нецільових компонентів. Вихідний продукт, що видобувається в кар'єрі, складається із частинок різної крупності. Значна частина вихідної вапнякової сировини містить глинисті частинки у вигляді плівок, примазок, комової глини, що істотно ускладнює процес отримання товарного продукту високої якості. Наявність глинистих частинок створює проблеми при виконанні операцій класифікації вапняків в умовах підвищеної вологості.

3. Технологічні лінії класифікації та збагачення сировини неоднорідних вапнякових родовищ реалізують, як правило, операції її дроблення і грохочення. Технологічні лінії сухої переробки сировини, які застосовують на кар'єрах, забезпечують отримання товарних продуктів прийнятної якості тільки для крупних класів щебеню в умовах низької вологості. Дрібні класи щебеню (розміром 0-20 мм) при цьому не використовуються і спрямовуються

у відвал (хвості). Виникає необхідність удосконалення існуючого процесу класифікації і збагачення сировини з метою підвищення якості кінцевого продукту і розширення на цій основі фракційного складу товарного щебеню, який відповідає вимогам державних стандартів.

4. Теоретичні дослідження в області збагачення і класифікації матеріалів в основному спрямовані на встановлення зв'язків, що існують між відомими показниками ефективності збагачення, класифікації сировини та технологічними, конструктивними параметрами обладнання, яке здійснює ці процеси. Завдання дослідження полягає у встановленні цих зв'язків для запропонованої технології переробки вапняку, визначенні на цій основі раціональних режимів процесу, що забезпечують підвищення ефективності збагачення.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [31, 65, 66].

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ ВАПНЯКІВ

### 2.1. Аналіз вихідної сировини неоднорідних вапнякових родовищ

У розд. 1 викладені основні вимоги до вапнякових порід, що відповідають ДСТУ Б. В. 2.7-109-2001 [9]. Відповідно до діючого стандарту до таких порід пред'являються певні вимоги, які регламентують вміст цільових ( $\text{CaCO}_3$ ) і нецільових (глинисті добавки) компонентів. Співвідношення цих компонентів визначають одержувані в процесі переробки вихідної сировини класи вапнякових порід. Процес збагачення вапняків передбачає збільшення вмісту цільового компонента в товарному продукті і відповідне зменшення нецільового компонента. Ясно, що досягнуті показники збагачення залежать від характеристик вихідної сировини неоднорідних вапнякових родовищ, ступеня їх відмінності від характеристик товарного продукту. Тому виникла необхідність виконання такого аналізу. Його результати дозволять розробити прийнятний підхід до збагачення сировини безпосередньо в кар'єрних умовах, орієнтуючись на її суху переробку.

У дисертаційній роботі виконано гранулометричний і хімічний аналіз вихідної сировини Західно-Тягинського вапнякового родовища [31, 66, 119]. Методика проведення експериментальних досліджень і виконання на цій основі зазначених аналізів викладена в розд. 5. У цьому розділі в табл.2.1 наведені результати виконаних досліджень. Для  $i$ -го класу крупності вихідної сировини визначалися:

вага навіски  $m_i$ , г;

вихід продукту  $i$ -го класу крупності  $\gamma_i$ , %;

сумарний вихід  $\Sigma\gamma_i$ , %, що представляє собою кумулятивну суму виходів низьких класів крупності;

масу глинистих добавок  $m_{ri}$ , г;

процентний вміст глинистих добавок  $m_{ri}$ , %;

масу вапняку  $m_{ui}$ , Г;

процентний вміст вапняку  $m_{ui}$ , %;

питомий вміст глинистих добавок  $\frac{m_{ri}}{m}$ , % ( $m$  - загальна маса проби матеріалу, Г);

питомий вміст вапняку  $\frac{m_{ui}}{m}$ , (%).

Таблиця 2.1

Результати аналізу вихідної сировини Західно-Тягинського родовища

Клас крупно- сті, мм	Вага навіски, $m_i$ , Г	Част. вихід, $\gamma_i$ , %	Сум. вихід, $\sum \gamma_i$ , %	Маса глини, $m_{ri}$ , Г	Вміст глини, $m_{ri}$ , %	Маса вапняку $m_{ui}$ , Г	Вміст вапняку $m_{ui}$ , %	Пит. вміст розд. $\frac{m_{ri}}{m}$ , %	Пит. вміст вапняку $\frac{m_{ui}}{m}$ , %
40-80	413,26	19,03	100,00	111,74	27,04	301,52	72,96	5,14	13,88
20-40	345,6	15,91	80,97	104,5	30,24	241,1	69,76	4,81	11,10
10-20	270,07	12,43	65,06	110,85	41,04	159,22	58,96	5,10	7,33
7-10	236,29	10,88	52,63	105,58	44,68	130,71	55,32	4,86	6,02
5-7	150,75	6,94	41,75	83,88	55,64	66,87	44,36	3,86	3,08
2-5	165,64	7,63	34,81	92,05	55,57	73,59	44,43	4,24	3,39
0,8-2	240,32	11,06	27,19	156,32	65,05	84,00	34,95	7,20	3,87
0-0,8	350,26	16,12	16,12	194,23	55,45	156,03	44,55	8,94	7,18
ВСЬОГО	2172,19	100							

З табл. 2.1 випливає, що зі збільшенням крупності частинок вміст вапняку зростає, а вміст глинистих добавок знижується, причому, ця закономірність яскраво виражена. Переважаючими є виходи ( $\gamma_i$ ) крупних класів, а також найбільш дрібних класів (0-2 мм). Нерівномірність розподілу вмісту вапняку ( $m_{ui}$ , %) в різних класах крупності вихідної сировини є передумовою для вирішення завдання збагачення вапняку шляхом класифікації вихідної сировини, тобто виключення з його складу дрібних класів крупності з низьким вмістом вапняку і значним вмістом глинистих добавок. Але із табл. 2.1 слідує також, що крупні класи не містять достатньої кількості вапняку, необхідного для їх віднесення до товарного продукту

(максимальне значення відповідає 72,96%). Ясно, що дані табл. 2.1 представляють собою вибіркові значення, однак вони підтверджують, що проблема низького вмісту вапняку в початкових продуктах неоднорідних вапнякових родовищ існує і отримання його рівнів, що відповідають вимогам ДСТУ, можливо шляхом збагачення всіх класів крупності. Причому тільки класифікація продукту (як підхід до збагачення) не дозволить досягти вимог ДСТУ. Необхідні додаткові дії. Автор бачить можливість підвищення ефективності збагачення вапняку шляхом відділення глинистих добавок від кусків гірської породи, переведенням їх в дрібні фракції з наступною класифікацією переробленого продукту. Важливо також, щоб процес класифікації відрізнявся стабільністю показника його ефективності. Дійсно, відомо, що підвищення вологості вихідної сировини супроводжується істотним погіршенням показника ефективності грохочення, що призводить найчастіше до зупинки технологічної лінії збагачення. Очевидно, що в технологічну лінію переробки вапняку повинен бути введений новий елемент, який дозволяє виключити ці негативні явища. У цьому полягає запропонований автором підхід до збагачення вапняків неоднорідних вапнякових родовищ. Графічна інтерпретація запропонованого підходу до збагачення передбачає наявність аналітичної залежності, що зв'язує процентний вміст вапняку з розміром частинок. Отримання аналітичної залежності, що характеризує стохастичний зв'язок між змінними, можливо шляхом залучення регресійного аналізу. Побудова регресійної залежності, виходячи з експериментальних даних, наведених у таблиці 2.1, здійснюється шляхом визначення виду апроксимуючої функції з подальшим розрахунком коефіцієнтів, що характеризують її розташування на площині.

Виходячи з результатів проведених раніше експериментальних досліджень, отримані табличні дані (табл.2.2), що характеризують вміст  $\text{CaCO}_3$  (кальциту) у вихідному матеріалі ( $Y_i$ ) при різних значеннях його класу крупності. Крупність частинок вапняку в  $i$ -ому досліді  $X_i$  запропоновано

задавати у вигляді середнього значення  $i$ -ого класу крупності, отриманого в процесі гранулометричного аналізу.

Для отримання регресійної аналітичної залежності між вмістом кальциту ( $Y_i$ ) і середньою крупністю частинок  $X_i$  необхідно задати її вид. При цьому слід виходити з взаємного розташування експериментальних точок на площині.

Таблиця 2.2

Середнє значення  $i$ -го класу крупності в співвідношенні з цільовим компонентом  $\text{CaCO}_3$

$X_i$ , мм	60	30	15	8,5	6	3,5	1,4	0,4
$Y_i$ , %	72,96	69,76	58,96	44,36	44,43	34,95	34,95	44,55

Для вибору типу кривої, що задовольняє заданому розташуванню точок, доцільно користуватися стандартним набором функцій, представлених, наприклад, в програмі MathCAD [115]. В результаті підбору апроксимуючої функції виявилось, що прийнятна регресійна залежність може бути представлена ступеневою функцією. Звернення до функції *pwzfit* програми MathCAD дозволяє шукати регресійну залежність виду:

$$Y = aX^n + b, \quad (2.1)$$

де  $Y$  – оцінка математичного очікування вмісту кальциту у вихідному матеріалі.

При цьому пошуку підлягають значення  $a$ ,  $n$  і  $b$ , що забезпечують мінімальне значення середньоквадратичної похибки. Використання методу найменших квадратів дозволило отримати регресію виду:

$$Y = 7,3X^{0,432} + 33,4. \quad (2.2)$$

Адекватність регресійної моделі доведена в розд.4. Відповідна нелінійна регресійна залежність показана на рис. 2.1. Тут же показано розташування експериментальних точок. Незважаючи на те, що для визначення положення лінії був використаний метод найменших квадратів, розрахункове значення суми квадратів відхилень між експериментальними значеннями і значеннями, розрахованими за кривою регресії, склало  $F = 161$ .

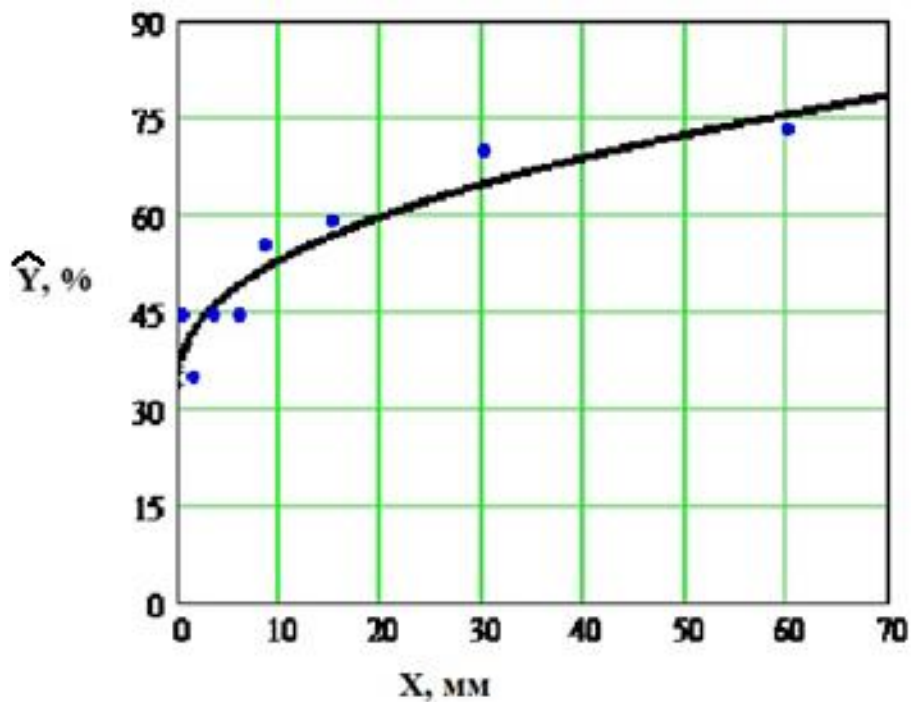


Рис. 2.1. Нелінійна регресійна залежність вмісту кальциту від крупності часток матеріалу.

Нижче наведена формула для розрахунку суми найменших квадратів відхилень [46]:

$$F = \sum_{i=1}^N [Y_i - Y(X_i)]^2, \quad (2.3)$$

де  $N$  – кількість дослідів.



Таким чином, експериментальні точки дещо «віддалені» від лінії регресії. Ступінь стохастичною зв'язку між змінними визначається кореляційним відношенням  $\rho$  [104]. Значення  $\rho$  для кривої (2.2) отримано в розд.4.

Слід пам'ятати, що отримана залежність (2.2) є характеристикою вихідного матеріалу. У процесі переробки сировини (зокрема, відшарування глинистих частинок від кусків вапняку і переведення їх в підрешітні класи крупності) залежність повинна змінитися. У класах крупності вищих межі поділу матеріалу процентний вміст вапняку має підвищитися, а в класах крупності менших цієї межі – зменшитися. В ідеальному варіанті, що відповідає вимогам ДСТУ для вапняків, товарні класи крупності повинні мати однакові значення вмісту оксиду кальцію на стандартному рівні, а класи крупності нижчі межі поділу матеріалу (вони потрапляють в хвости) не повинні містити вапняку. Рис. 2.2 ілюструє три залежності:

- 1 – розрахункова характеристика вихідного матеріалу (відповідає рис. 2.1);
- 2 – ідеальна залежність, що відповідає вимогам ДСТУ;
- 3 – очікувана характеристика переробленого продукту (відповідно до запропонованого підходу до збагачення).

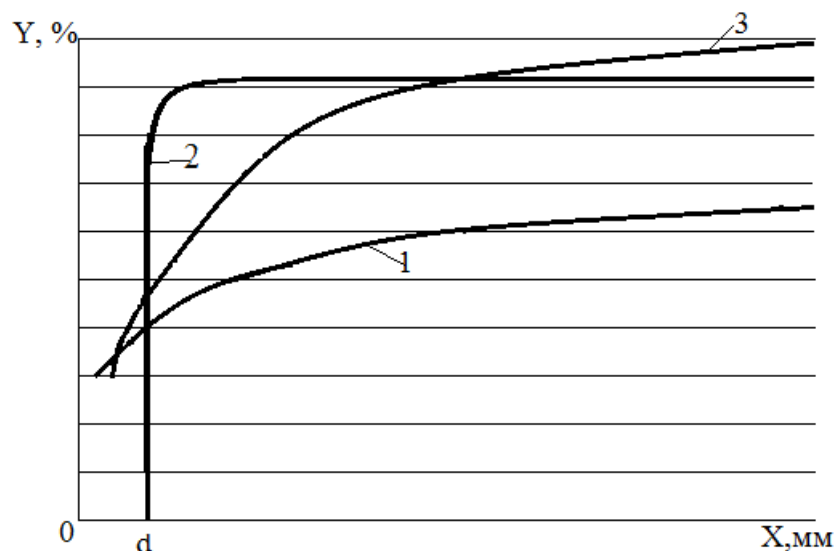


Рис. 2.2. Порівняння залежностей, що підлягають аналізу.

Ясно, що зіставлення цих характеристик дозволить судити про ефективність запропонованого підходу (концепції) до збагачення вапняків виходячи з вимог, встановлених ДСТУ. Якщо в процесі збагачення вдасться реалізувати криву 3, то значна частина надрешітного продукту (в крупних класах) за своїм хімічним складом буде відповідати високому класу вимог до товарних вапняків. У більш дрібних класах крупності вміст глинистих включень знизиться, зменшиться вміст вапняку в хвостах.

Ступінь наближення кривих 1 і 3 до ідеальної кривої 2 можна оцінити, порівнявши значення похідних в точках, що відповідають граничній крупності зерен при класифікації сировини ( $d$ ). Для ідеальної кривої 2 похідна буде виглядати  $dY/dX_{(x=d)} = \infty$ . Якщо криві 1, 3 представлені ступеневими залежностями виду  $Y = aX^n + b$ , то зіставляються їх похідні з кінцевими значеннями. Причому важливо, щоб крутизна наростання кривої 3 в точці  $X = d$  була більшою аналогічного значення для кривої 1, що підтвердить ефективність процесу збагачення вихідного матеріалу.

Графічні залежності, представлені на рис 2.2, ілюструють запропонований автором підхід до збагачення вапняків. Для реалізації запропонованої концепції необхідно змінювати структуру технологічної лінії переробки вапняків, вводячи додатковий елемент, який здійснює відділення глини від кусків вапняку. Реалізація підходу може бути здійснена певним конструктивним виконанням зазначеного елемента. Додаткова вимога до цього пристрою полягає в забезпеченні стабільності характеристик класифікації. Нестабільність характеристик спостерігається в існуючих технологічних лініях. Вона обумовлена підвищенням в'язкості глини при збільшенні вологості сировини, яка переробляється, супроводжується комкуванням глини і її налипанням на осередки сит грохотів.

## **2.2. Обґрунтування використаних показників ефективності технологічного процесу**

У попередньому розділі було показано, що вихідний матеріал Західно-Тягинського родовища неоднорідних вапняків містить різну кількість

кальциту  $\text{CaCO}_3$ . Спостерігається зв'язок між хімічним і гранулометричним складом вихідного матеріалу. Це стало передумовою для розгляду підходу до збагачення вапнякової сировини. Було запропоновано відділяти дрібні класи крупності з незначним вмістом кальциту від крупних, де вміст  $\text{CaCO}_3$  переважає. Таким чином, мова йшла про класифікацію вихідної сировини. У той же час було підкреслено, що у вихідній сировині Західно-Тягинського родовища неоднорідних вапняків навіть класи крупності 10-20, 20-40 і 40-80 мм не містять масової частки  $\text{CaCO}_3$ , що задовольняє вимогам до щебеню з вапнякових порід [9]. Таким чином, була сформована концепція збагачення вихідної сировини, що передбачає відділення глинистих включень від кусків гірських порід і переведення цих включень в дрібні класи крупності з подальшою класифікацією переробленої сировини. Виходячи з цього підходу, процес збагачення включає дві операції: відділення глинистих частинок за допомогою запропонованого пристрою і класифікацію переробленої сировини за заданою крупністю.

Необхідно вивчити, якою мірою перераховані дії можуть вплинути на показники ефективності збагачення. Такий поділ результатів цих дій дасть змогу оцінити ефективність кожного з них, визначити раціональні режими, прийнятні для їх спільного прояву.

Будемо виходити з того, що відділення глини від кусків гірської породи призводить до зміни гранулометричного складу сировини, що переробляється, по відношенню до вихідної. Зміниться також вміст кальциту в різних класах крупності. Ясно, що класифікації буде піддана сировина, яка істотно відрізняється від початкової. Якщо зіставити результати збагачення, виконаного шляхом класифікації не переробленої вихідної сировини і сировини, переробленої за допомогою запропонованого в розд.3 пристрою, то отримаємо оцінку дії, пов'язаних з відокремленням глини. Якщо процес відділення глини на даному етапі дослідження не розглядати, то класифікація не переробленої вихідної сировини дає можливість оцінити тільки її вплив на показник ефективності збагачення. Оскільки характеристики вихідної

сировини були отримані в підрозділі 2.1, то завдання оцінки впливу процесу класифікації на показник ефективності збагачення не переробленої вихідної сировини може бути вирішене на основі цих даних вже на цьому етапі дослідження. Її вирішенню присвячені наступні підрозділи розд.2 дисертаційної роботи.

Перш за все, необхідно визначити показники ефективності збагачення сировини. Оскільки мова йде про використання пристрою класифікації, то процес збагачення повинен супроводжуватися поліпшенням якості надрешітного продукту і враховувати вміст цільового компонента в підрешітному продукті. Крім того, важливі вагові показники концентрату і хвостів. Цим вимогам відповідає широко використовуваний при збагаченні корисних копалин показник ефективності збагачення  $E$  [72]:

$$E = \frac{\varepsilon_1 - \gamma_1}{1 - \alpha}, \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon_1$  – вилучення кальциту в надрешітний продукт, %;

$\gamma_1$  – вихід надрешітного продукту, %;

$\alpha$  – вміст кальциту у вихідному матеріалі, %.

У формулі (2.4) враховано, що вміст цільового компонента (кальциту) в мінералі дорівнює 100%. Будемо розраховувати значення  $E$  в частках одиниці. У цьому випадку параметри, що входять в формулу (2.4), також вимірюють в долях одиниці. Значення витягу для надрешітного продукту (концентрату), отримаємо з формули [72]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma_1 \beta_1}{\alpha}, \quad (2.5)$$

де  $\beta_1$  – вміст кальциту в надрешітному продукті (концентраті), %.

Якщо  $E = 0$ , то вміст кальциту у вихідному матеріалі і надрешітному продукті однаковий, тобто процесу збагачення немає. Ясно, що необхідно

прагнути до збільшення значення  $E$ . Верхня межа можливої зміни цього показника дорівнює 1.

Важливим параметром, який використовують для оцінки ефективності роботи пристрою класифікації матеріалу, є показник ефективності процесу класифікації  $E_2$ . Якщо в якості класифікуючого пристрою використовується грохот, то розглядають ефективність грохочення матеріалу  $E_g$ :

$$E_g = \frac{m_2}{m_{2d}}, \quad (2.6)$$

де  $m_2$  – маса підрешітного класу, г;

$m_{2d}$  – маса підрешітного класу у вихідному матеріалі, г.

Значення показника ефективності грохочення може знаходитися в межах 0-1. При нульовому значенні  $E_g$  поділу вихідного продукту за крупністю не відбувається. Значення  $E_g$  залежить від багатьох технологічних параметрів, пов'язаних режимами переробки сировини, а також конструктивних параметрів установки, що реалізує процес класифікації. Характер зв'язку  $E_g$  з цими параметрами досить складний і погано піддається математичному опису. Однак у рамках даної роботи важливо врахувати залежність  $E_g$  від вологості вихідного продукту, що підлягає переробці. Це обумовлено тим, що при значному вмісті глинистих добавок зміна вологості призводить до суттєвих змін значення  $E_g$ . При цьому можливі технологічні режими, при яких процес класифікації не реалізується.

З огляду на сформульований підхід (концепцію) до збагачення сировини, можна прийти до висновку про те, що обидва показники ефективності ( $E$ ,  $E_g$ ) важливі, так як відображають різні, але взаємопов'язані сторони процесу. Саме аналіз цих показників дозволяє встановити раціональні режими переробки сировини з неоднорідних вапнякових родовищ, підтвердити правильність і ефективність сформульованого підходу до

збагачення. Очевидним є те, що між показниками  $E$  і  $E_2$  існує функціональний зв'язок. Характер цього зв'язку розкрито в наступному підрозділі роботи.

### **2.3. Визначення аналітичних залежностей для прогнозування показника ефективності збагачення**

Існуюча невизначеність у виборі оптимального режиму роботи пристрою грохочення може бути усунена шляхом прогнозування очікуваних показників ефективності збагачення виходячи з характеристик вихідної сировини. Для цього необхідно створити математичну модель, яка дозволяє в умовах змінних у процесі розробки родовища властивостей вихідної сировини, експлуатаційних характеристик грохотів прогнозувати рівень збагачення, що досягається. Попереднє (до моменту установки технологічного устаткування) виконання такого розрахунку дозволить зіставити отримані результати з необхідними показниками, що характеризують властивості товарного продукту, зробити висновок про ефективність збагачення, що досягається, і, у разі необхідності, визначити шляхи її подальшого підвищення.

Розкриття характеру стохастичною зв'язку масової частки кальциту в мінералі з розміром його частинок, отриманого в підрозділі 2.1, дозволяє застосувати новий підхід до створення математичної моделі для прогнозування показників збагачення вапняків неоднорідних вапнякових родовищ, що враховує результати гранулометричного та хімічного складів вихідної сировини. Використання регресійного аналізу для обробки експериментальних даних вихідної сировини, наданих в табличному вигляді, дозволяє отримати аналітичні залежності, що характеризують стохастичні зв'язки між якістю надрешітного продукту пристрою класифікації (грохоту) і граничною крупністю розділення частинок. Така постановка задачі дозволяє шляхом моделювання майбутнього процесу класифікації визначити режим роботи грохоту, що відповідає необхідному рівню показника збагачення сировини.

Мета проведеного дослідження, якому присвячено цей підрозділ, полягає в отриманні математичної моделі на основі регресійного аналізу характеристик вихідної сировини. Розрахунок значення  $E$  здійснюється виходячи із залежності (2.4) з урахуванням того факту, що грохоченню підлягає матеріал, що містить цільовий компонент  $\text{CaCO}_3$ , а також глинисті частинки – нецільовий компонент. Таким чином, ефективність збагачення визначається рівнем витягу кальциту  $\varepsilon_1$ , виходом надрешітного продукту  $\gamma_1$  і залежить від змісту кальциту у вихідній сировині  $\alpha$ . Ясно, що значення  $E$  залежить від граничної крупності розділення вихідного матеріалу  $d$ . Чим вище рівень граничної крупності розділення вихідного матеріалу  $d$ , тим більша частина матеріалу виявиться в підрешітному продукті, що призведе до зміни значення  $E$ , так як різні класи крупності мають різну концентрацію вапняку.

Відомі із практики переробки вихідної сировини способи отримання товарного продукту високої якості при малих обсягах його виробництва привели до використання сит з великими вічками (завищеним розміром розділення частинок). При цьому значна частина вапняку виявилася в підрешітному продукті. Такі режими переробки сировини не відповідають високим показникам ефективності збагачення  $E$ , призводять до збільшення маси відходів виробництва (хвостів) і створюють додаткові проблеми з їх складуванням, погіршуючи екологічну ситуацію в регіонах переробки сировини.

Використання регресійного аналізу для обробки експериментальних даних вихідної сировини у вигляді дискретних значень параметрів, дозволить отримати рівняння регресії, що характеризують стохастичні зв'язки між якістю надрешітного продукту пристрою класифікації (грохоту) і розміром розділення частинок. Така постановка задачі дозволить шляхом моделювання майбутнього процесу класифікації визначити режим роботи грохоту, що відповідає необхідному рівню показника збагачення сировини.

Залежність  $E(d)$  може бути отримана шляхом формування аналітичних залежностей, що пов'язують зі значенням параметра  $d$  масу матеріалу  $m_{2d}(d)$ , а

також масу вапняку  $m_{u2d}$  в нижніх класах крупності вихідного матеріалу. У відносних одиницях такі залежності матимуть вигляд  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$ , де  $m$  – маса вихідного матеріалу. Отримання таких аналітичних залежностей можливо шляхом апроксимації даних про вихідну сировину, представлених в табл.2.1. Задаючи різні рівні параметра  $d$  (верхні межі класів крупності в табл. 2.1), знайдемо масові частки вихідного продукту крупністю, що не перевищує значення  $d$  ( $m_{2d}/m$ ), а також вапняку ( $m_{u2d}/m$ ). Результати зведені в табл. 2.3. Звернемо увагу на той факт, що в табл. 2.3 значення  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$  представляють собою накопичену (кумулятивну) суму масових часток класів, крупність яких не перевищує значення  $d$ . Апроксимуючи зв'язок між змінними регресійною залежністю, отримуємо аналітичні залежності  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$ .

Процес апроксимації передбачає попередній вибір виду прийнятної для апроксимації кривої.

Таблиця 2.3

Зв'язок масових часток вихідного продукту і вапняку в нижніх класах з розміром розділення  $d$

$m_{2d}/m$	27,19	34,18	41,75	52,63	65,06	80,97	100
$m_{u2d}/m$	11,05	14,44	17,52	23,54	30,87	41,97	55,85
$d$ , мм	2	5	7	10	20	40	80

Підбір прийнятної виду аналітичної залежності здійснювався шляхом вибору із сукупності функцій системи MathCAD такої, що найбільш повно відповідає розташуванню експериментальних точок, наведених в табл. 2.3. Виявилось, що для обох залежностей прийнятна ступенева функція виду  $Y = aX^n + b$ . Звернення до функції *pwzfit* системи MathCAD дозволило отримати наступні регресійні залежності:

$$m_{2d}/m = 22,403d^{0,347} - 0,675; \quad (2.7)$$

$$m_{u2d}/m = 7,962d^{0,448} - 0,271. \quad (2.8)$$



Розрахунок (див. додаток А) показав, що запропоновані криві практично ідеально підходять для апроксимації результатів експериментальних досліджень, наведених в табл. 2.3. Рисунок 2.3 ілюструє отримані залежності в графічному вигляді. Значення показника  $F$ , розраховане за формулою 2.3, для зазначених кривих склали:

- Для кривої 1 – значення  $F = 39,2$ ;
- Для кривої 2 – значення  $F = 8,0$ .

Розрахункові значення кореляційних відношень  $r$  для розглянутих нелінійних моделей склали відповідно:

- для кривої (2.7) –  $r = 0,997$ ;
- для кривої (2.8) –  $r = 0,998$ .

Зіставлення розрахункових значень критерію Фішера з табличними, виконане в розд.4, підтвердило адекватність запропонованих регресійних моделей.

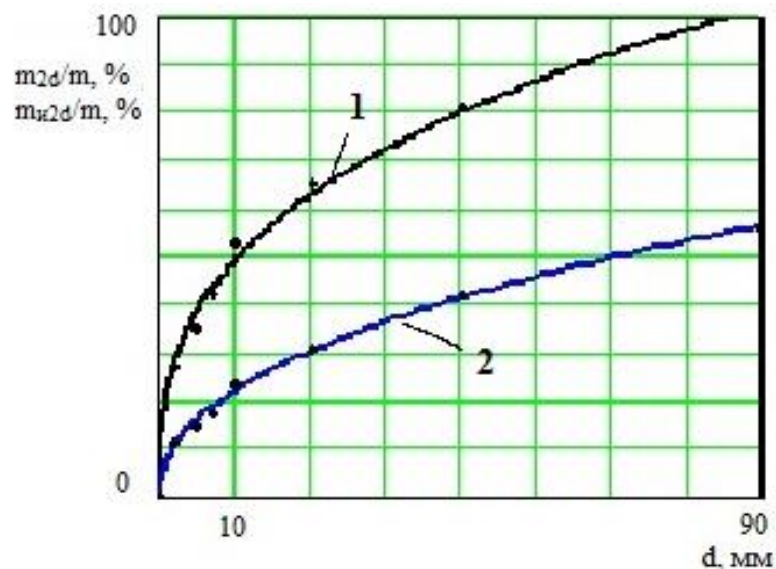


Рис. 2.3. Залежність маси матеріалу та чистого вапняку в ній від крупності часток:  $m_{2d}/m(d)$  – крива 1 та  $m_{ч2d}/m(d)$  – крива 2

Сформульований вище висновок підтверджується практичним збігом експериментальних точок, показаних на рисунку, і точок, розташованих на кривих 1, 2 рис. 2.3. Високі рівні кореляційних відношень дозволяють з певним

допущенням розглядати залежності (2.7) і (2.8) такими, що відображають функціональні зв'язки між параметрами і використовувати їх в моделі, що розробляється для розрахунку детермінованих значень показників ефективності збагачення. Незважаючи те, що ці залежності відповідають характеристикам сировини конкретного родовища, істотні значення  $\gamma$  дозволяють припустити наявність глибинних зв'язків між розглянутими параметрами, обумовлених геологічними умовами формування мінералів, і підтвердити прийнятність використання степеневих функцій в регресійних залежностях, що відображають характеристики сировини неоднорідних вапнякових родовищ.

З рівняння масового балансу [72] для вапняків отримаємо:

$$\frac{m_{и2d}}{m} + \frac{m_{и1d}}{m} = \frac{m_{и}}{m} = \alpha, \quad (2.9)$$

де  $m_{и1d}$  – маса кальциту у верхньому класі крупності вихідного матеріалу, г;

$m_{и}$  – маса кальциту в вихідному матеріалі, г.

Рівняння 2.9 дозволяє визначити залежність  $m_{и1d}/m$  (d) з урахуванням отриманої вище залежності  $m_{и2d}/m$  (d):

$$\frac{m_{и1d}}{m}(d) = \alpha - \frac{m_{и2d}}{m}(d). \quad (2.10)$$

З рівняння масового балансу [19] отримаємо:

$$m_{1d} + m_{2d} = m. \quad (2.11)$$

З урахуванням залежності  $m_{и2d}/m$  (d) отримаємо:

$$\frac{m_{1d}}{m}(d) = 1 - \frac{m_{2d}}{m}(d). \quad (2.12)$$

Перейдемо до розгляду процесу грохочення матеріалу. З огляду на те, що маса надрешітного продукту  $m_1$  складається із маси класу крупності вище межі розділення вихідного матеріалу  $m_{1d}$  і частково з маси матеріалу класу крупності нижче межі розділення  $m_{2d}$ , котрий також є в надрешітному продукті та безпосередньо пов'язаний з ефективністю грохочення  $E_2$ , отримаємо такий вираз:

$$m_1 = m_{1d} + m_{2d}(1 - E_2). \quad (2.13)$$

Тоді вихід надрешітного продукту  $\gamma_1$  можна отримати з формули:

$$\gamma_1 = \frac{m_1}{m} = \frac{m_{1d}}{m} + \frac{m_{2d}}{m}(1 - E_2). \quad (2.14)$$

Використання у рівняннях (2.13) і (2.14) змінної  $E_2$ , яка може змінюватися в межах  $0 \leq E_2 \leq 1$  в залежності від досягнутого рівня ефективності грохочення, дозволяє в подальшому аналізі розглядати залежність параметрів, що характеризують процес збагачення, не тільки від змінної  $d$ , а й від ступеня ефективності  $E_2$ . Так, наприклад, значення  $\beta_1$  отримаємо з формули:

$$\beta_1 = \frac{m_{и1}}{m_1} = \frac{m_{и1d} + m_{и2d}(1 - E_2)}{m_{1d} + m_{2d}(1 - E_2)} = \frac{m_{и1d} + (\alpha - \frac{m_{и1d}}{m})(1 - E_2)}{\gamma_1}. \quad (2.15)$$

Тут враховано, що маса кальциту в надрешітному продукті  $m_{и1}$  визначається не тільки наявністю кальциту у верхньому класі крупності вихідного матеріалу  $m_{и1d}$ , але і масою кальциту у нижньому класі крупності, що залишилася в надрешітному продукті і врахованій у формулі (2.15) показником ефективності  $E_2$ .

Аналогічним шляхом можна визначити масову частку кальциту  $\beta_2$  в підрешітному продукті:

$$\beta_2 = \frac{m_{и2}}{m_2} = \frac{\alpha - \left[ \frac{m_{и1}d}{m} + \left( \alpha - \frac{m_{и1}d}{m} \right) (1 - E_r) \right]}{1 - \gamma_1}, \quad (2.16)$$

де  $m_{и2}$  – маса кальциту в підрешітному продукті,  $m_2$  – маса підрешітного продукту.

Справедливі вирази, які враховують процес грохочення матеріалу:

$$\frac{m_{и1}}{m} + \frac{m_{и2}}{m} = \frac{m_{и}}{m} = \alpha; \quad (2.17)$$

$$\frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m} = 1. \quad (2.18)$$

З (2.18) випливає, що вихід підрешітного продукту  $\gamma_2$  можна розрахувати за формулою:

$$\gamma_2 = 1 - \gamma_1. \quad (2.19)$$

Залежності (2.14) і (2.15) дозволяють розрахувати вилучення кальциту в надрешітний продукт (концентрат)  $\varepsilon_1$ , а залежності (2.16) та (2.19) дають можливість оцінити ступінь вилучення кальциту в підрешітний продукт  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_2 = \frac{\gamma_2 \beta_2}{\alpha}. \quad (2.20)$$

У кінцевому підсумку, вирішуючи систему наведених вище рівнянь (2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.14 та 2.15), можна визначити залежність показника ефективності збагачення кальциту від двох змінних:  $d$  і  $E_2$ . Слід пам'ятати, що отримані залежності базуються на регресійному аналізі характеристик вихідної сировини і тому відображають особливості конкретного родовища неоднорідних вапнякових порід. У той же час зміна цих характеристик не призводить до зміни викладеного у цьому розділі порядку розрахунку ефективності збагачення. Дійсно, для вихідного матеріалу інших родовищ

залежності (2.7) і (2.8) можуть бути іншими, проте це не порушить послідовності дій в процесі розрахунку показника  $E$ . Тому наведені вище рівняння являють собою узагальнену математичну модель, що дозволяє розрахувати показники збагачення вапняків з урахуванням особливостей сировини конкретних родовищ.

Важливо також те, що отримані залежності відображають зв'язок, який існує між показниками ефективності збагачення  $E$  і грохочення  $E_2$ . Наявність такого зв'язку між параметрами пояснюється тим, що розглядається варіант збагачення вихідної сировини, що містить цільовий і нецільовий компоненти, шляхом її просіювання. У наведених вище рівняннях значення  $E_2$  розглядається як незалежний параметр. Відомі тільки його межі зміни  $0 \leq E_2 \leq 1$ . Насправді параметр  $E_2$  залежить від багатьох технологічних і конструктивних параметрів обладнання технологічного ланцюга. Однак, розгляд  $E_2$  в якості незалежного параметра дозволить встановити такі його значення, що задовольняють необхідним показникам збагачення, обґрунтувати раціональні режими грохочення. Аналізу розрахункових залежностей присвячено наступний підрозділ.

#### **2.4. Обґрунтування раціональних режимів грохочення, створення методики та алгоритму їх розрахунку**

Як приклад використання математичної моделі для прогнозу ефективності збагачення вапняків Західно-Тягинського неоднорідного вапнякового родовища виконаємо аналіз розрахункових залежностей. Отримана в підрозділі 2.3 математична модель дозволяє досліджувати залежності показника ефективності збагачення  $E$  від двох змінних:  $d$  і  $E_2$ . Розрахунок значень  $E$  передбачає також визначення ряду інших показників, що характеризують процес збагачення. Це значення  $\gamma_1, \beta_1, \varepsilon_1, \gamma_2, \beta_2, \varepsilon_2$ , які також залежать від двох змінних  $d$  і  $E_2$ . Будучи самостійними характеристиками процесу переробки сировини, вказані параметри відображають різні сторони

процесу класифікації. Значення  $\beta_1$  характеризує вміст цільового компоненту в надрешітному продукті (концентраті). У розглянутій технології збагачення вапняків значення цього показника особливо важливе, тому що масова частка  $\text{CaCO}_3$  в товарному продукті визначена ДСТУ [9,10]. Значення  $\beta_2$  визначає масову частку кальциту в підрешітному продукті. Зменшення  $\beta_2$  призводить до скорочення масової частки вапняку у відходах виробництва (хвостах), що сприяє поліпшенню і екологічній ситуації в регіоні видобутку. Значення  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  відображають масові частки надрешітного і підрешітного продуктів. Їх співвідношення характеризує ефективність переробки сировини, виходячи з масових часток збагаченого вапняку і збідненого продукту, що спрямовується у відходи. Показники вилучення  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  є узагальнюючими характеристиками, які враховують як якісні ( $\beta_1, \beta_2$ ), так і кількісні ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) характеристики надрешітного і підрешітного продуктів. Значення  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  залежать також від масової частки кальциту у вихідному продукті  $\alpha$ .

Побудова графічних залежностей зазначених параметрів від змінних  $d$  і  $E_2$  дозволить дослідити характер їх зміни, визначити прийнятні режими роботи грохоту, що забезпечують необхідні показники збагачення. Для побудови залежностей необхідно встановити граничні значення розглянутих параметрів. Для  $E_2$  такими значеннями є 0 і 1. Параметр  $d$  може змінюватися у межах від 0 до максимальної крупності вихідного матеріалу 80 мм. Відомо [72], що параметри  $E, \gamma_1, \beta_1, \varepsilon_1, \gamma_2, \beta_2, \varepsilon_2$  можуть бути розраховані в частках одиниці і мати значення, що знаходяться у межах від 0 до 1. Розрахунок залежностей здійснювався засобами обчислювальної техніки з використанням системи MathCAD і її можливостей для побудови графіків (див. Додаток Б). При цьому використовувалися як графічні побудови на площині, так і тривимірні графіки, де по осях відкладалися значення відповідних показників, а також значення змінних  $d$  і  $E_2$ . Сімейство кривих, що відображають залежність  $\beta_1(d)$  при різних значеннях параметра  $E_2$  наведено на рис. 2.4, а залежність  $\beta_2(d)$  – на рис. 2.5. Видно, що якість вапняку в надрешітній області залежить від ефективності грохочення. З ростом  $E_2$  значення  $\beta_1$  зростають.

Наведені на рис. 2.4 функціональні залежності мають точки екстремуму. Причому, максимальні значення  $\beta_1$  при зростанні  $E_c$  досягаються шляхом збільшення значення  $d$ . Однак, як впливає із рис. 2.4, збільшення  $d$  призводить до зростання концентрації вапняку в підрешітному продукті. Тому значення  $\beta_1$ , що досягаються при порівняно малих значеннях  $d$  (до 10 мм), представляються більш прийнятними як з точки зору стабільності  $\beta_1$  в процесі зміни  $E_c$ , так і порівняно низького вмісту вапняку в підрешітному продукті (хвостах).

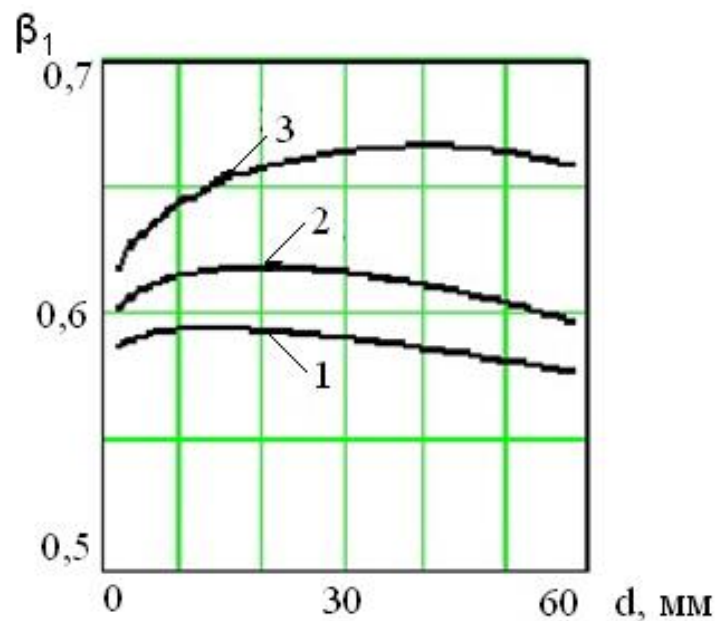


Рис. 2.4. Сімейство кривих залежностей вмісту  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в надрешітному класі крупності  $\beta_1(d)$ :  
 $E_c = 0,5$  – крива 1;  $E_c = 0,7$  – крива 2;  $E_c = 0,9$  – крива 3.

Рис. 2.6 та 2.7 ілюструють характер залежностей виходів  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  від змінних:  $d$  і  $E_c$ . Із малюнків випливає, що збільшення граничної крупності розділення  $d$  призводить до істотного зниження виходу надрешітного продукту і відповідного збільшення виходу підрешітного продукту.

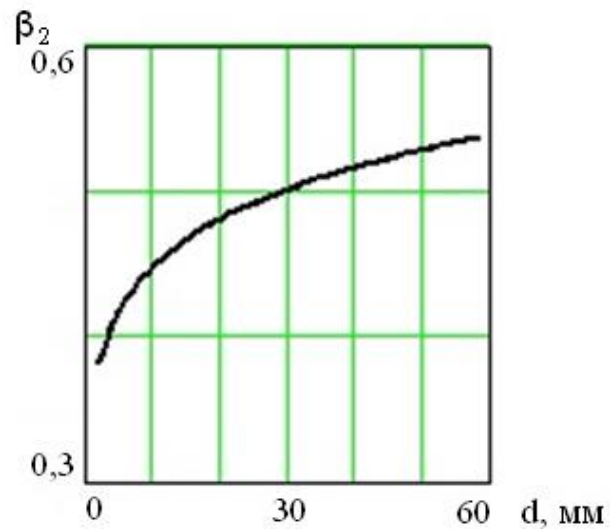


Рис. 2.5. Залежність вмісту  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в підрешітному класі крупності  $\beta_2(d)$ .

Причому, при великих значеннях  $E_2$  крутизна характеристик зростає, що відповідає режиму стрімкого переходу частинок з надрешітного продукту грохоту в підрешітний.

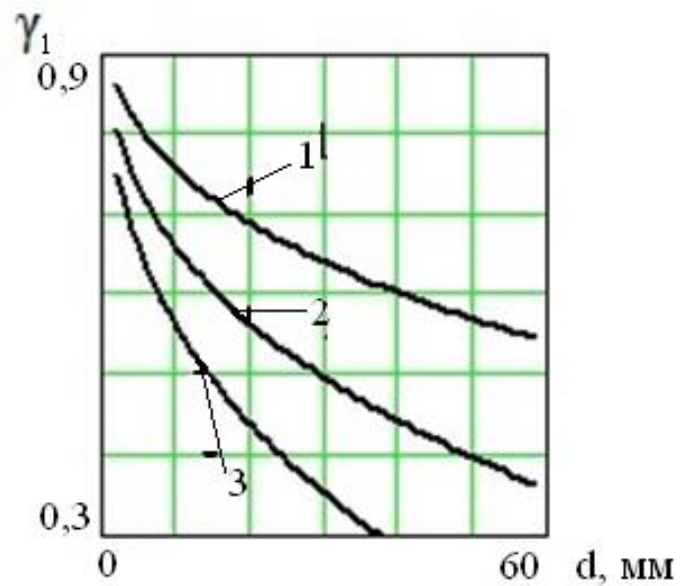


Рис. 2.6. Сімейство кривих залежностей виходу  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в надрешітному класі крупності  $\gamma_1(d)$ :

$E_r = 0,5$  – крива 1;  $E_r = 0,7$  – крива 2;  $E_r = 0,9$  – крива 3.



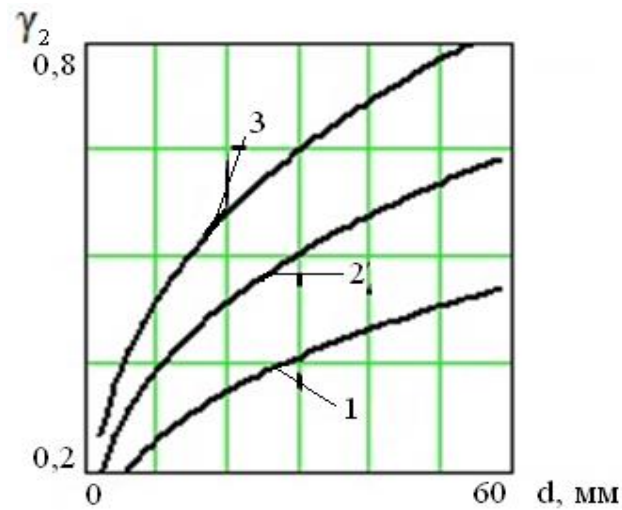


Рис. 2.7. Сімейство кривих залежностей виходу  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в підрешітному класі крупності  $\gamma_2$  (d):

$E_7 = 0,5$  – крива 1;  $E_7 = 0,7$  – крива 2;  $E_7 = 0,9$  – крива 3.

Криві, що характеризують вилучення вапняку в надрешітний продукт  $\varepsilon_1$  і підрешітний продукт  $\varepsilon_2$ , наведені на рис. 2.8 і 2.9.

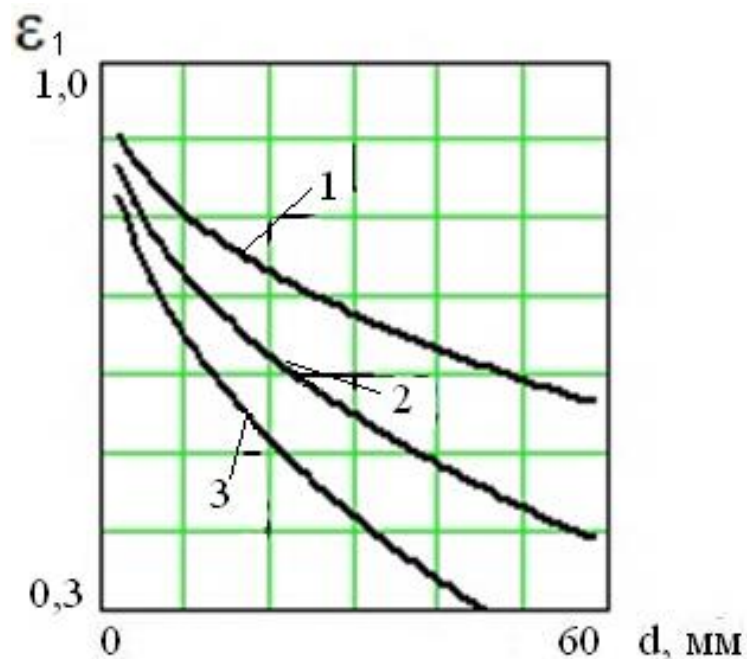


Рис. 2.8. Сімейство кривих залежностей вилучення  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в надрешітному класі крупності  $\varepsilon_1$  (d):

$E_7 = 0,5$  – крива 1;  $E_7 = 0,7$  – крива 2;  $E_7 = 0,9$  – крива 3.

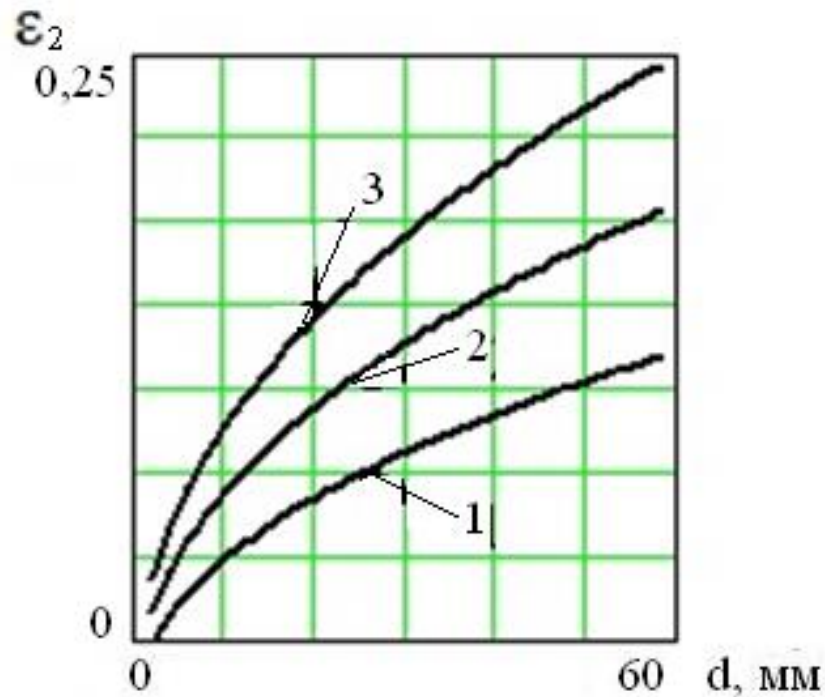


Рис. 2.9. Сімейство кривих залежностей вилучення  $\text{CaCO}_3$  від розміру часток вапняку в підрешітному класі крупності  $\varepsilon_2(d)$ :

$E_x = 0,5$  – крива 1;  $E_x = 0,7$  – крива 2;  $E_x = 0,9$  – крива 3.

Видно, що показники вилучення  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  значною мірою повторюють форму кривих, що характеризують виходи продуктів  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ . Високі показники витягу надрешітного продукту спостерігаються в області малих значень  $d$ , що перш за все пояснюється значним виходом цього продукту  $\gamma_1$ . Аналогічні криві (для аналогічних значень змінних  $d$  і  $E_x$ , наведених на рис. 2.4-2.9), отримані для показника ефективності збагачення  $E$  (рис. 2.10).

Аналіз сімейства кривих свідчить про те, що збільшення ефективності грохочення  $E_x$  призводить до істотного зростання ефективності збагачення  $E$ . Наведені криві мають екстремуми. Максимальні значення  $E$  для різних кривих (1, 2, 3) мають місце при одних і тих же значеннях крупності  $d$  (близько 7 мм). Вважаючи значення  $d = 7$  мм оптимальним ( $d_{opt}$ ), можна прийти до висновку про те, що  $d_{opt}$  не залежить від показника ефективності грохочення  $E_x$ . Тобто, для будь-яких значень  $E_x$  при граничній крупності розділення  $d = d_{opt} = 7$  мм буде спостерігатися максимальний рівень збагачення. Цей висновок важливий

для практичної реалізації пристрою грохочення, так як розмір отворів сита грохоту слід прийняти рівним  $d = d_{opt} = 7$  мм. Це дозволить забезпечити максимальний рівень збагачення  $E$  вихідної сировини при будь-якому досягнутому рівні ефективності грохочення  $E_g$ .

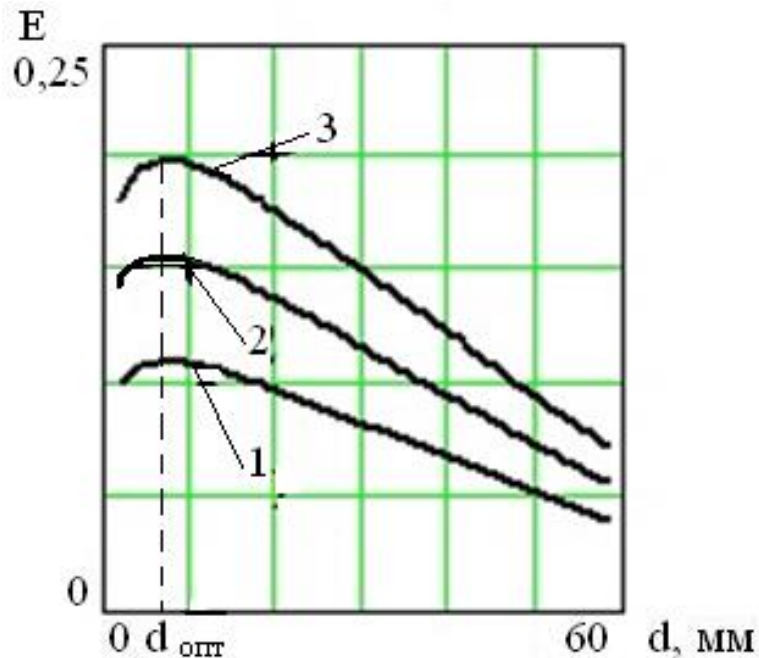


Рис. 2.10. Залежність показника ефективності збагачення  $E$  від граничної крупності розділення  $d$ :

$E_g = 0,5$  – крива 1;  $E_g = 0,7$  – крива 2;  $E_g = 0,9$  – крива 3.

Розглянемо режим  $d = d_{opt} = 7$  мм більш детально. Так як залежності на рис. 2.10 характеризують поведінку функції  $E(d)$  при дискретних значеннях  $E_g$ , то для підтвердження незалежності оптимального значення граничної крупності розділення  $d_{opt}$  від  $E_g$  необхідно дослідити характер зв'язку  $E$  з двома змінними:  $d$  і  $E_g$ . Для цього побудуємо тривимірну графічну залежність  $E(d, E_g)$  і покажемо на її поверхні лінію  $ab$ , що сполучає точки екстремуму функції при різних значеннях  $E_g$  (рис. 2.11). Видно, що всі точки цієї лінії мають однакову координату  $d = d_{opt}$ , що підтверджує правильність раніше зробленого висновку.

Відсутність залежності оптимального значення крупності розділення від ефективності грохочення можна обґрунтувати особливостями часткової

похідної. Існуюча залежність з урахуванням (2.4), (2.5), (2.7), (2.8), (2.10), (2.12), (2.14), (2.15) приведена до виду:

$$\frac{\partial E}{\partial d} = E_2 (L_1 d^{n-1} - L_2 d^{j-1}), \quad (2.21)$$

де  $L_1, L_2$  – коефіцієнти, які залежать від  $E_2$ ;

$n, j$  – показники ступеня в рівняннях (2.7) і (2.8) відповідно.

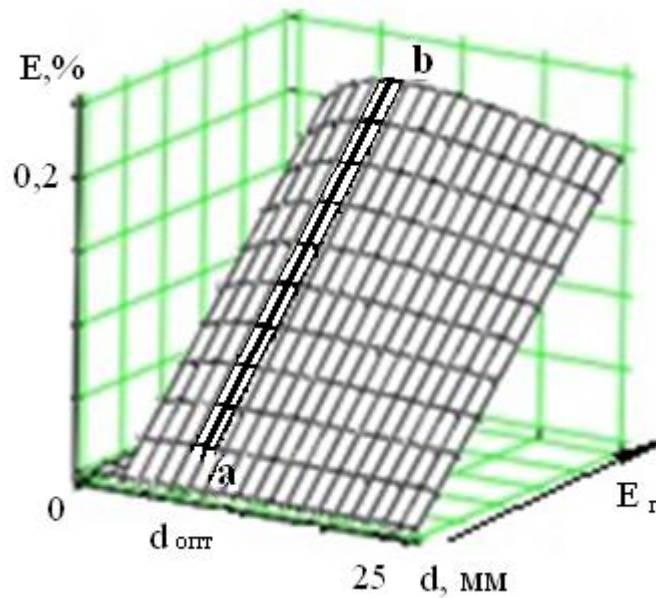


Рис. 2.11. Залежність ефективності збагачення  $E$  від двох параметрів ( $d, E_r$ ).

У точці екстремуму функції  $E(d)$  похідна  $\frac{\partial E}{\partial d} = 0$ . Так як в експлуатаційних режимах  $E_2 \neq 0$ , то значення  $d_{opt}$  отримують з рівняння:

$$L_1 d^{n-1} - L_2 d^{j-1} = 0. \quad (2.22)$$

Звідси ясно, що отримане оптимальне значення  $d_{opt}$  не залежить від  $E_2$ . Розрахунки свідчать про те, що наведений на рис. 2.10 характер залежностей  $E(d)$  для різних значень  $E_2$  зберігається при різному вмісті вапняку у вихідному матеріалі ( $\alpha$ ). Варіація  $\alpha$  призводить лише до зміни значення  $d_{opt}$ , при якому забезпечуються екстремуми сімейства функцій. Викладене підтверджує наявність оптимальних розмірів отворів сита грохоту, що визначаються характеристиками вихідної сировини. Їх застосування в практиці дозволить підвищити ефективність збагачення.

Аналізуючи залежність, показану на рис. 2.10, можна зробити висновок про те, що екстремуми функції, що спостерігаються, не є явно вираженими. Це означає, що незначні конструктивні неточності в реалізації необхідного значення  $d = d_{opt}$  не приведуть до істотного погіршення показника збагачення  $E$ . Так, наприклад, 10% відхилення  $d$  від значення  $d_{opt}$  не призводить до зниження розрахункового показника ефективності збагачення  $E$  (при  $E_2 = 0,5$  маємо  $E = 0,11$ ; а при  $E_2 = 1,0$  –  $E = 0,22$ , причому значення  $E$  при відхиленнях  $d$  не змінюються). Проаналізуємо режим  $d = d_{opt}$ , виходячи із значень інших параметрів збагачення, показаних на рис. 2.4-2.9. Якщо вважати найбільш ймовірними режимами грохочення зміну  $E_2$  у межах  $E_2 = 0,7-0,9$ , то при оптимальній граничній крупності розділення можна отримати значення  $\beta_1$  у межах 0,61-0,64, тобто у порівнянні із вмістом кальциту в вихідному продукті  $\alpha = 0,558$  його значення в надрешітному продукті зросло в середньому на 13%. Відповідно, виходи надрешітного і підрешітного продуктів знаходяться в межах:  $\gamma_1 = 0,697-0,61$ ;  $\gamma_2 = 0,303-0,39$ , а вилучення цільового компонента склали:  $\varepsilon_1 = 0,765-0,698$ ;  $\varepsilon_2 = 0,235-0,302$ .

Звернемо увагу на той факт, що концентрація кальциту в підрешітному продукті висока ( $\beta_2 = 0,433$ ), хоча вихід цього продукту  $\gamma_2$  порівняно низький.

Інший важливий висновок, який випливає з рис. 2.10, полягає в тому, що навіть ефективні режими грохочення (наприклад,  $E_2 = 0,9$ ) не в змозі забезпечити високі показники ефективності збагачення вихідної сировини

(максимальне значення  $E = 0,2$ ). Виходячи з того, що реальні значення  $E$  можуть досягати рівнів 0,15-0,2 (при реалізації режимів просівання  $E_r = 0,7-0,9$ ), ці значення слід вважати занадто низькими. Тому збагачення вапняку Західно-Тягинського родовища шляхом безпосереднього просівання вихідної сировини не можна вважати прийнятним рішенням, виходячи із низького рівня показника збагачення  $E$ . У той же час, не можна заперечувати той факт, що процес збагачення має місце і при наявності додаткових технічних рішень ці показники можуть бути поліпшені. Цьому буде сприяти запропонований в дисертаційній роботі підхід (концепція) до збагачення вапняків неоднорідних родовищ, що полягає у відділенні глини від кусків гірської породи і виведенні її в під решітний продукт (хвости). Ясно, що такий підхід змінить гранулометричний і хімічний склад сировини, що переробляється, і поліпшить показник збагачення  $E$ .

## **2.5. Розробка спрощеної методики прогнозування технологічних параметрів**

Важливим є те, що розроблена у цьому розділі математична модель для оцінки ефективності збагачення сировини шляхом класифікації, може бути застосована не тільки для аналізу вихідної (не переробленої) сировини родовища, а й для переробленого матеріалу відповідно до підходу (концепції), викладеного у дисертаційній роботі. З огляду на те, що використання узагальненої моделі передбачає виконання певної послідовності дій, доцільно цю послідовність викласти у вигляді методики розрахунку оптимального значення граничної крупності розділення матеріалу  $d_{opt}$  і відповідних цим значенням граничної крупності показників збагачення. Запропоновано виділити наступні дії:

1. Виконати гранулометричний і хімічний аналізи матеріалу, що підлягає класифікації.

2. Отримати регресійні залежності  $m_{2d}/m(d)$  та  $m_{u2d}/m(d)$  (див. формули 2.7 і 2.8).

3. Визначити значення  $d_{onn}$ , що відповідає максимальному значенню ефективності збагачення  $E$ .

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

Автор спростив процедуру використання запропонованої методики, розробивши алгоритм розрахунку показників, наведених в пунктах 2, 3, 4. Алгоритм реалізований в системі MathCAD і дозволяє отримати всебічну інформацію про характер зміни розглянутих параметрів при варіаціях  $d$  і  $E_z$ . Рис. 2.12 ілюструє схему розробленого алгоритму. Побудова графічних залежностей показників ефективності збагачення від параметрів  $d$ ,  $E_z$  дозволяє легко зіставляти результати їх розрахунків при варіаціях параметрів, оцінювати ефективність запропонованого режиму ( $d = d_{onn}$ ) в порівнянні з іншими, прийнятними для практичної реалізації, варіантами. Розрахунок забезпечує високу точність прогнозу показників. Це обумовлено тим, що створена модель базується на відомих аналітичних залежностях (2.4), (2.5), (2.6), (2.19), (2.20), що широко використовуються для розрахунків в області збагачення корисних копалин. Регресійний аналіз передбачає використання експериментальних даних, що сприяє підвищенню достовірності результатів.

Ступінь «функціональності» введених в модель рівнянь регресії залежить від розрахункового значення кореляційного відношення  $r$ .

Тому точність прогнозу залежить від значення  $r$ , що дозволяє досліднику самостійно оцінити точність результатів розрахунку і прийняти рішення щодо їх прийнятності. Слід врахувати, що точність результатів залежить також від достовірності вихідної інформації (результатів хімічного і гранулометричного аналізів). При цьому важливі як методики проведених аналізів, так і характеристики використаних засобів вимірювання.

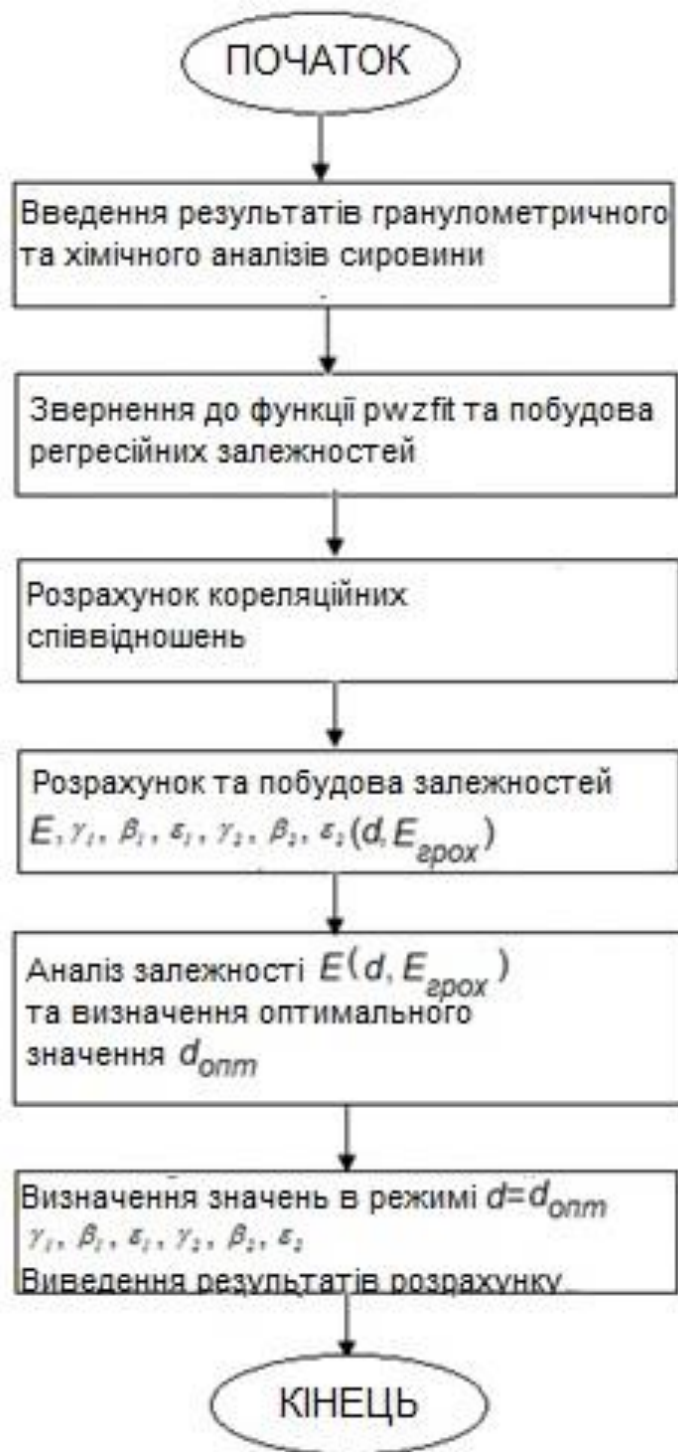


Рис. 2.12. Алгоритм розрахунку показників ефективності збагачення.

Для оцінки достовірності отриманих результатів розрахунку виконано зіставлення розрахункових і експериментальних даних, отриманих в лабораторних умовах (табл.2.1). Аналізу піддані значення параметрів  $E, \gamma, \beta$



при  $d = d_{opt}$ ,  $E_2 = 1$ ,  $\alpha = 0,558$ . Розбіжності в значеннях розрахункових і експериментальних даних не перевищили 7%.

Універсальність розробленої методики полягає в тому, що вона використовує створену математичну модель і може бути застосована до аналізу вихідної сировини будь-якого неоднорідного вапнякового родовища. Можливий варіант використання методики для аналізу сировини, отриманої з різних розроблюваних укосів одного і того ж родовища (в разі істотних відмінностей в її характеристиках). Методика може бути застосована також у випадку, коли вихідна сировина піддається попередній переробці з метою руйнування з'єднань глинистих добавок з кусками гірських порід, що містять вапняк. В останньому варіанті перероблену сировину доцільно піддавати грохоченню в режимі  $d = d_{opt}$ , що забезпечить підвищення показників збагачення [116, 120, 121].

Практична значимість запропонованої методики зумовлена тим, що на основі проведеного гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини конкретного родовища існує можливість прогнозування показників збагачення, що досягаються шляхом його грохочення. Аналіз прогнозованих показників дозволяє визначити оптимальні режими грохочення вихідної сировини, оцінити рівні показників ефективності збагачення вапняку, що досягаються, ступінь скорочення обсягів порожньої породи (хвостів). Визначення режиму  $d = d_{opt}$  дозволяє встановити на грохотах, що використовуються в технологічних лініях збагачення, сита з оптимальними розмірами отворів, а його реалізація в діючих лініях забезпечує рішення задачі збагачення сировини, поліпшення екологічної ситуації в регіоні.

Розглянемо особливості та переваги використання регресійного аналізу в розробленій методиці. Вони полягають у тому, що регресійний аналіз базується на результатах експериментів, виконаних з використанням сировини конкретного родовища (і навіть конкретного укосу). Це означає, що отримані регресійні залежності відображають властивості сировини в конкретних місцях, де планується установка технологічних ліній її переробки. Їх

використання дозволяє врахувати нестабільність характеристик сировини, підвищити достовірність прогнозного аналізу. Регресійний аналіз акумулює інформацію, отриману з результатів проведених експериментів, а використання методу найменших квадратів сприяє зменшенню розбіжностей між експериментальними даними та теоретичними (отриманими з регресійної залежності). Ясно, що питання достовірності отриманих результатів пов'язане також зі ступенем розсіювання даних експерименту по відношенню до регресійної залежності. На ступінь такого розсіювання впливає вид обраної регресійної залежності. Вище показано, що вдалим вибором є використання нелінійної ступеневої залежності. Цей вид залежності не суперечить сформульованій у цьому розділі закономірності збільшення вмісту вапна в крупних частках гірських порід. Для регресійної залежності цього виду кореляційне відношення близьке до одиниці. Це дозволило в розробленій методиці прогнозування відмовитися від розгляду стохастичних зв'язків між параметрами і перевести вирішення завдання в область функціональних залежностей. Отримання аналітичних (на відміну від стохастичних) залежностей дозволило розширити можливості виконаного аналізу, вирішити задачу оптимізації крупності розділення частинок. Таким чином, регресійний аналіз виявився вдалим інструментом, який дозволив розширити інформативність методики прогнозування, підвищити точність розрахунку завдяки аналізу функціональних залежностей, що пов'язують показник ефективності збагачення сировини з характеристиками цієї сировини.

У процесі дослідження характеристик вихідної сировини визначено прийнятний вид регресійних залежностей, що характеризують результати гранулометричного та хімічного аналізів (ступеневі залежності). Спираючись на високу ступінь їх «функціональності» (кореляційне відношення близьке до одиниці), будемо вважати ступеневу залежність прийнятною для дослідження характеристик сировини вапнякових родовищ. Нагадаємо, що висновок про прийнятність використання ступеневих залежностей отримано в результаті виконання серії експериментів. Якщо ж вважати, що в конкретній ситуації,

пов'язаній з використанням методики, вид залежності відомий спочатку(до проведення дослідів), то для її аналітичного визначення досить виконати два експерименти. Дійсно, якщо в рівняннях (2.7), (2.8), представлених у вигляді залежності (2.1), вважати значення  $b = 0$  (2.1), що впливає з фізичного сенсу розглянутих процесів (при  $d = 0$  справедливо  $m_{2d}/m = 0$ ,  $m_{u2d}/m = 0$ ), тоді невідомі коефіцієнти кожної ступеневої залежності (2.7) і (2.8), представленої у вигляді  $Y = aX^n$ , можуть бути отримані із двох рівнянь, що містять відомі з проведених двох експериментів значення  $Y_1, Y_2, X_1, X_2$ :

$$Y_1 = aX_1^n; \quad Y_2 = aX_2^n. \quad (2.23)$$

Звідси:

$$n = \frac{\log\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)}{\log\left(\frac{X_1}{X_2}\right)}; \quad a = \frac{Y_1}{X_1^n} = \frac{Y_2}{X_2^n}. \quad (2.24)$$

Ясно, що такий підхід до визначення невідомих коефіцієнтів  $n$  і  $a$  ступеневої залежності відрізняється від методу найменших квадратів, що використовується в регресійному аналізі. У запропонованому підході мова йде про інтерполяцію функції, тобто визначення її параметрів при відомих значеннях функції у двох вузлах інтерполяції ( $Y_1, X_1$  і  $X_2, Y_2$ ). Ясно, що такий підхід дає деяку похибку у визначенні значень  $n$  і  $a$  (в зіставленні з регресійним аналізом), проте вииграш полягає у значному зниженні кількості проведених експериментів, що важливо для поліпшення вихідних умов застосування методики прогнозування, пов'язаних зі скороченням трудомісткості і часу на проведення необхідних експериментів. Ступінь відмінності у значеннях коефіцієнтів  $n$  і  $a$  ступеневих залежностей, отриманих різними методами (найменших квадратів, інтерполяції) залежить від ступеня «розкиду» експериментальних точок відносно лінії регресії. Так, якщо ці точки практично збігаються з отриманою регресійною залежністю, то слід

очікувати, що застосування методу інтерполяції функції не призведе до значної похибки в розрахунках, пов'язаних із застосуванням запропонованої методики. Оцінимо таку похибку, виходячи з результатів проведених експериментів. У результаті застосування методу найменших квадратів отримані значення коефіцієнтів  $a = 7,96$  та  $n = 0,448$  (2.8). Якщо скористатися методом інтерполяції функції, то для двох точок, взятих з табл.2.3,  $Y_1 = 17,52$ ,  $X_1 = 7$  мм (точка відповідає оптимальному значенню крупності розділення частинок грохотом) і  $Y_2 = 55,85$ ,  $X_2 = 80$  мм (точка відповідає максимальному розміру частинок, що підлягають грохоченню), отримаємо  $a = 6,94$  і  $n = 0,476$ . Таким чином, відмінності в значеннях коефіцієнтів  $a$  склали 12%, а коефіцієнтів  $n$  – 6%. Похибки у розрахунках значень цих коефіцієнтів приведуть до зниження точності розрахунків показника ефективності збагачення, однак цей недолік не є визначальним при виконанні експрес-аналізу, де немає необхідності у високій точності розрахунку. Результати експрес-аналізу, що зацікавили споживача, можуть бути скориговані шляхом застосування регресійного аналізу із збільшеною кількістю виконаних експериментів.

## 2.6. Висновки до розділу 2

1. Використання ступеневих функцій в регресійних залежностях, що відображають результати хімічного та гранулометричного аналізів вихідної сировини неоднорідних вапнякових родовищ, є обґрунтованим. Кореляційні відношення для запропонованих залежностей близькі до одиниці. Високі рівні кореляційних відношень дозволяють розглядати ступеневі залежності такими, що відображають функціональні зв'язки між параметрами. Ці ознаки важливі при створенні математичної моделі.

2. Існує суттєва залежність вмісту вапняку від крупності частинок сировини, що дозволяє змінювати ефективність збагачення вапнякової багатокомпонентної сировини шляхом зміни крупності її розділення в

процесі класифікації. Це важливо для практичної реалізації вибраного автором підходу до підвищення ефективності збагачення.

3. Визначення функціональних зв'язків показника ефективності збагачення вапнякової сировини з результатами її гранулометричного і хімічного аналізів та ефективністю класифікації дозволило розробити на цій основі математичну модель для прогнозування показника ефективності збагачення та обґрунтувати раціональні режими технологічного процесу.

4. Залежність показника ефективності збагачення вапнякової сировини від крупності її розділення в процесі класифікації має екстремум. Доведено, що значення крупності, яке відповідає максимальному значенню показника ефективності, не залежить від ефективності класифікації сировини. Тому це значення крупності розділення доцільно використовувати в діючих технологічних лініях.

5. Обґрунтування послідовності та змісту дій в процесі визначення раціонального режиму грохочення сировини склало основу для реалізації відповідної методики і алгоритму розрахунку. Виконана оцінка достовірності результатів розрахунку за розробленою методикою. Розбіжності в значеннях розрахункових і експериментальних даних не перевищили 7%. Методику та алгоритм використано для прогнозування показників ефективності збагачення в кар'єрах (акти впровадження роботи) та при створенні експериментального зразка валково-пальцевого грохота (розд.5).

Таким чином, можна сформулювати перше наукове положення: «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».

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях автора [116, 119–121].

## РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРОХОТА ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ НЕОДНОРІДНИХ ВАПНЯКІВ

### 3.1. Аналіз передумов використання валково-пальцевого грохота

Дослідження, результати яких викладені в розд.2, складають основу для виконання наступних дій з підвищення показника ефективності збагачення вапняку. Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати рівні показників збагачення, що досягаються, на основі аналізу характеристик вихідної сировини та режимів роботи пристроїв класифікації. Використання моделі дозволяє отримати усесторонню інформацію про можливі режими переробки сировини і показники, які при цьому досягаються. Це створює сприятливу ситуацію для зіставлення показників збагачення в різних режимах, обґрунтування доцільності переведення обладнання з одного режиму роботи в інший (більш ефективний, виходячи з розглянутих показників і умов роботи). Для демонстрації таких можливостей розробленої моделі проаналізуємо результати розрахунку показників збагачення, отримані для сировини Західно-Тягинського родовища (див. розд. 2) і зв'яжемо їх з реальними режимами роботи грохотів, що реалізуються в практиці. Раніше наголошувалося (див. розд. 1), що використання для класифікації вапняків звичайних грохотів з поверхнями, що просівають, не забезпечує стабільності результатів збагачення внаслідок налипання дрібних частинок сировини, що переробляється, при підвищеній вологості. Саме тому процес класифікації сировини переводять в режим роботи грохоту, де налипання цих частинок незначне. Практичний досвід переробки сировини свідчить про те, що цей режим (з низьким ступенем налипання частинок) характерний для значень граничної крупності розділення  $d \geq 20$  мм. У практиці зазвичай реалізують нижню межу ( $d = 20$  мм), яка забезпечує порівняно високі показники ефективності збагачення  $E$ .

Проаналізуємо цей режим переробки сировини, виходи із розрахованих залежностей ( $E, \beta, \gamma_1, \gamma_2(d)$ ), наведених в розд. 2. Будемо вважати, що відсутність налипання дрібних частинок на просівальну поверхню, дозволить забезпечити високу ефективність грохочення ( $E_2 = 0,9$ ). Тоді, при  $d = 20$  мм із рис. 2.10 отримаємо  $E = 0,175$ , а із рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 визначимо  $\beta_1 = 0,652$ ;  $\beta_2 = 0,48$ ;  $\gamma_1 = 0,44$ ;  $\gamma_2 = 0,57$ . Видно, що внаслідок збільшення крупності частинок у надрешітній частині переробленого продукту, спостерігається збільшення якості продукту ( $\beta_1$ ), проте його вихід ( $\gamma_1$ ) незначний. У підрешітному просторі маємо матеріал із досить високим вмістом вапняку ( $\beta_2$ ), вихід якого ( $\gamma_2$ ) можна порівняти з виходом надрешітного продукту. Зрозуміло, що значні обсяги переробленої сировини з високим вмістом вапняку спрямовуються в хвості. Цим пояснюється досить низький показник ефективності збагачення ( $E = 0,175$ ). Накопичення матеріалу в хвостосховищі призводить до виникнення екологічних проблем.

У такій ситуації доцільно змінити режим роботи пристрою класифікації. Звернемо увагу на те, що криві  $E(d)$  (рис. 2.10) мають екстремум. Максимальні значення спостерігаються при значеннях граничної крупності розділення  $d = 7$  мм. Відмінності в значеннях, що використовуються в практиці ( $d = 20$  мм), і оптимальних значеннях ( $d = 7$  мм) істотні. Що ж перешкоджає використанню режиму з оптимальним значенням  $d = 7$  мм? Такою перешкодою є те, що в цьому режимі важко реалізувати високу ступінь ефективності грохочення  $E_2$ . У грохотах із поверхнями, що просівають, спостерігається налипання дрібних часток при високій вологості вихідного продукту. З огляду на той факт, що режими переробки з високою вологістю продукту спостерігаються часто і їх тривалість значна, підвищення ефективності грохочення в цих умовах є надзвичайно важливим. Дійсно, якщо використовувати режим переробки вихідної сировини при  $d = d_{\text{опт}}$  і забезпечити ефективність грохочення на рівні  $E_2 = 0,9$ , то з рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.10 отримаємо:  $E = 0,2$ ;  $\beta_1 = 0,64$ ;  $\beta_2 = 0,43$ ;  $\gamma_1 = 0,6$ ;  $\gamma_2 = 0,38$ . Видно, що

в цьому режимі підвищується ефективність збагачення завдяки збільшенню виходу надрешітного продукту. Якість надрешітного продукту знижується незначно. Зменшуються викиди матеріалу в хвостосховище.

У ситуації, що склалася, доцільно використовувати грохоти, що забезпечують високу ефективність роботи в умовах підвищеної вологості. Їх застосування дозволить змінити режими класифікації і на цій основі досягти високої ефективності збагачення вапняку.

Аналіз літературних джерел [68, 73, 74, 83, 107] свідчить про те, що такі характеристики мають валкові грохоти. Якщо в грохотах з поверхнями, що просівають, поділ матеріалу за крупністю відбувається під дією сили тяжіння, то у валкових грохотах такий поділ здійснюється під дією зовнішніх сил. Це забезпечується наявністю дисків на валах грохоту. Обертання дисків призводить до того, що отвори класифікатора безперервно очищаються від налипаючих частинок матеріалу, що забезпечує незмінність площі отворів.

Характерною особливістю сировини неоднорідних вапнякових родовищ є наявність на кусках гірської породи (вапняку) глинистих включень. В умовах підвищеної вологості слід очікувати зниження міцності глинистих покриттів, що покривають куски гірської породи. Виникають передумови для відділення цих покриттів шляхом застосування незначних зусиль. Ці зусилля у валкових грохотах можуть бути створені шляхом конструктивного використання дисків у вигляді пальців, тобто реалізацією валково-пальцевих грохотів. Важливо відзначити той факт, що у валково-пальцевому грохоті можуть бути реалізовані дві функції: функція відділення (сепарації) глинистих покриттів від кусків гірської породи, а також функція розділення частинок за крупністю (із забезпеченням стабільності характеристик в умовах підвищеної вологості). Таким чином, в умовах переробки сировини вапнякового родовища валково-пальцевий грохот є комбінованим пристроєм, який виконує кілька функцій.

Слід зазначити, що запропонований в розд.1 підхід (концепція) до збагачення сировини повністю відповідає перерахованим вище функціям, реалізація яких передбачається в грохоті даної конструкції. Ясно, що



внаслідок відділення глинистих включень від кусків гірської породи, яке відбувається під дією пальців валкового грохоту, збільшиться вміст дрібної фракції в над решітній частині грохоту. Подальша класифікація частинок цим же грохотом призведе до підвищення ефективності збагачення вапняку завдяки збільшенню маси підрешітного продукту зі значним вмістом глинистих включень. Наступні параграфи цього розділу присвячені запропонованому конструктивному виконанню валково-пальцевого грохоту для вирішення завдань класифікації вапняків.

### **3.2. Визначення раціонального конструктивного виконання грохота**

Валкові грохоти набули широкого поширення завдяки унікальним властивостям, які вони мають. Для них характерна висока продуктивність, широкий спектр руд, нерудних матеріалів, вугілля, які підлягають переробці. Можлива переробка вологої, липкої сировини, матеріалів складної геометричної форми [74]. Важливим є те, що вдається досягти порівняно невеликих питомих витрат електроенергії на переробку сировини. У зарубіжній практиці валкові грохоти часто використовують для вирішення проблемних завдань класифікації, пов'язаних, перш за все, з класифікацією дрібних матеріалів підвищеної вологості [81]. Різні конструктивні рішення валкових грохотів запропоновані компаніями Zomag, Krupp Förderstechnik, Kleemann, Sandvik, Bakers, August Müller GmbH, Neuenhauser і іншими. У Дніпропетровському гірничому інституті були розроблені нові конструкції валкових грохотів з дисками у вигляді тороїдальних елементів. За участю фахівців Кіровоградського національного технічного університету був спроектований, виготовлений і випробуваний на Полтавському ГЗК оригінальний валковий грохот [73]. Проведені випробування показали, що два валкові грохоти з площею поверхні, що просіює, 6 м<sup>2</sup> здатні замінити два вібраційних грохоти ГТ-51 з площею поверхні, що просіює, 15 м<sup>2</sup> при забезпеченні тієї ж продуктивності. Інститут геотехнічної механіки НАН

України провів масштабні дослідження основних конструктивних показників валкових та інерційних грохотів. Доведено перспективність використання перших в умовах класифікації вологої, липкої і волокнистої гірської маси [74].

Підприємства України випускають валкові грохоти різного конструктивного виконання. При їх виготовленні зазвичай ураховують особливості конкретної технології переробки, необхідну продуктивність установки. Часто конструктивні параметри класифікатора визначають виходячи із характеристик суміжного обладнання, що використовується у діючій технологічній лінії. Теоретична база, напрацьована в процесі проектування валкових грохотів, призначена для визначення раціональних конструктивних параметрів грохотів і обґрунтування прийнятних режимів роботи. Виникає актуальне завдання її розширення, поглиблення в частині встановлення невідомих раніше закономірностей розвитку процесів класифікації. Це складе основу для вирішення оптимізаційних завдань і обґрунтування на цій основі раціональних параметрів. Складність рішення такого роду завдань полягає в їх багатofакторності, одночасності впливу багатьох чинників на перебіг протікаючих процесів. Тому важливо виділення основних, найбільш істотних факторів. Саме такий підхід прийнятий в роботі [76]. Результати, отримані в [76], визначають загальні підходи до вирішення практичних завдань, що виникають. Однак вони не претендують на остаточне рішення, яке може враховувати особливості конкретної технології переробки сировини. Саме із особливостей технології переробки сировини неоднорідних вапнякових родовищ виходить автор дисертації при формулюванні теоретичних і практичних завдань, що виникають. Очевидно, що характеристики грохоту значною мірою залежать від конструктивного виконання робочого органу валків класифікатора. Розглянемо можливі варіанти такого виконання. Вони наведені на рис. 3.1.

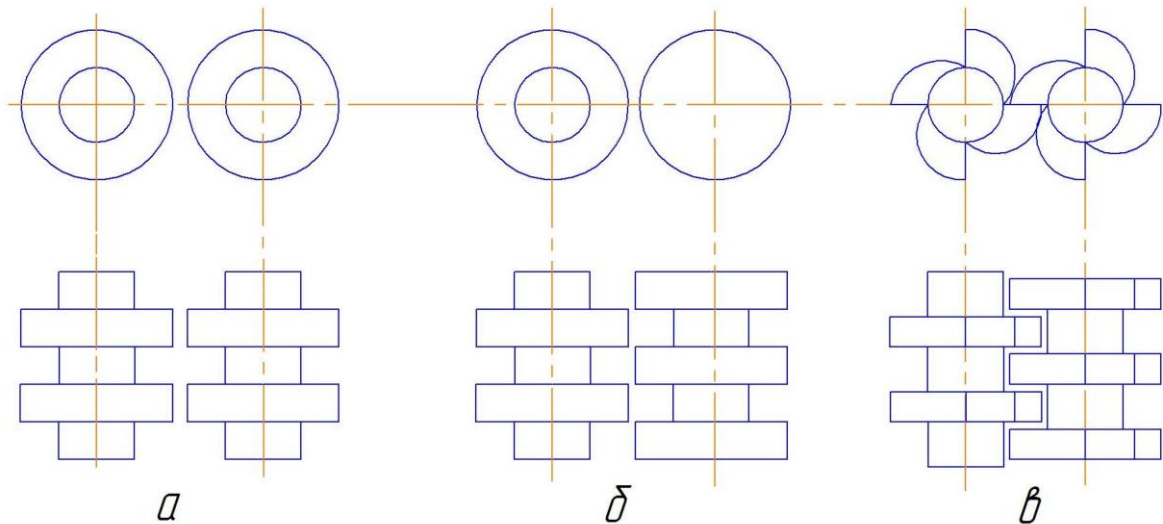


Рис.3.1. Взаємне розташування валків грохоту.

Зазвичай на циліндричному валу розташовують фігурні диски, які формують отвори валкового грохоту. При цьому у наведених на рис.3.1 варіантах взаємного розташування валків варіант «а» забезпечує найбільшу площу отворів для просіювання матеріалу в підрешітну область класифікатора, а варіант «в» – найменшу. Однак слід зазначити, що ступінь очищення отворів від налипання дрібних часток вологого продукту найбільша при використанні розташування валків у варіанті «в». Цей варіант розташування валків [122], узятий за основу подальшого дослідження, виходячи із необхідності ретельного очищення отворів при наявних у вихідній сировині значних обсягів глинистих добавок. Диски валкового грохоту в перерізі часто мають форму поверхні, обмежену еліпсом, де більш довга частина утворює палець, висота якого  $h = d$  визначає розмір отвору, що періодично виникає при обертанні сусідніх валків грохоту (рис.3.2). Валки обертаються в одну сторону із однаковою кутовою частотою  $\omega$ .

Видно, що пальці грохоту в процесі обертання валу забезпечують очищення отворів розміром  $d$  від налипання частинок і створюють додаткові зусилля (що доповнюють силу тяжіння) по переміщенню частинок з надрешітної області в підрешітну.

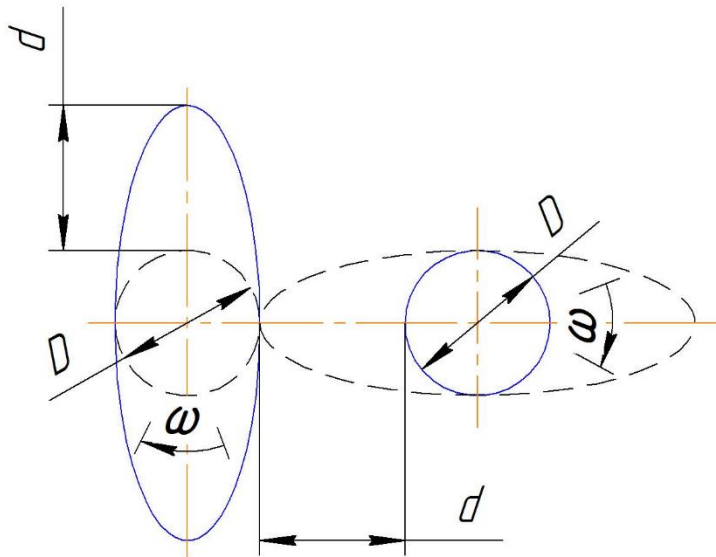


Рис. 3.2. Форма диска валково-пальцевого грохоту.

Таким чином, у валково-пальцевому грохоті можуть бути реалізовані три важливі функції:

- відділення (обдирання) глинистих покриттів від кусків гірської породи (що важливо для сировини вапнякових родовищ);
- функція розподілу потоку матеріалу на зони за крупністю (частки, що мають розміри, які не перевищують висоту пальця, переміщуються в зоні дії валків, а більші частки переміщуються в шарі, розташованому над пальцем);
- функція розподілу частинок матеріалу за крупністю із забезпеченням високих показників ефективності грохочення при підвищеній вологості продукту. При зміні вологості продукту спостерігаються більш стабільні показники ефективності грохочення.

Перераховані вище функції валково-пальцевого грохоту збігаються із завданнями, які повинні бути вирішені в процесі класифікації вапняків у рамках сформульованої раніше концепції.

Валково-пальцеві грохоти можуть мати різне конструктивне виконання. Так, наприклад, вони розрізняються за кількістю використаних пальців на кожному диску. На рис.3.3 показані варіанти виконання багатопальцевих дисків. Ясно, що таке виконання дисків істотно впливає на характер формування отворів для переміщення частинок в підрешітну область.



Рис. 3.3. Багатопальцеві диски валкового грохоту.

Численні дослідження щодо конструктивного виконання валкових грохотів, вибору режимів їх роботи [79] дозволили визначити прийнятні характеристики грохотів для різних умов їх експлуатації з урахуванням продуктивності, цільового призначення та інших факторів. Це дає підставу стверджувати, що проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють здійснювати розрахунки основних елементів таких пристроїв, технологічних показників їх роботи. Основне завдання подальших досліджень полягає у вивченні особливостей роботи грохотів в умовах конкретних технологічних процесів переробки сировини. У даному випадку мова йде про збагачення сировини неоднорідних вапнякових родовищ.

### **3.3. Дослідження динаміки руху частинок матеріалу**

Необхідність вивчення динаміки частинок у валково-пальцевому грохоті обумовлена тим, що внаслідок конструктивного виконання дисків грохоту можливий варіант затиснення частки матеріалу між футерувальним

валом і пальцем грохоту. Такий режим в процесі роботи грохоту не повинен виникати, тому що його поява призводить до припинення обертального руху валків і переривання режиму грохочення. Визначення умов виникнення такого режиму важливо, тому що мова йде про працездатність установки.

Певний вплив на динаміку частинок у грохоті має форма обертових дисків. Форма дисків, виконаних у вигляді еліпса, сприяє виключенню затиснення частинок, проте для повного виключення цього явища необхідний додатковий аналіз сил, які діють на частинку, з урахуванням властивостей матеріалу, що підлягає грохоченню. Такому аналізу присвячений цей підрозділ дисертаційної роботи.

Рис. 3.4 ілюструє загальну картину розташування пальця 1 відносно футерувального валу 2, а також частинки гірської породи (вапняку) 3, що має форму кулі діаметром  $d$ . При верхньому розташуванні пальця 1 (на рисунку поз.1) між валками утворюється отвір розміром  $d$ , що дозволяє частинці матеріалу проникнути в підрешітну область грохоту. Після повороту пальця (поз.2) частинка матеріалу виявляється розташованою між пальцем 1 і футерувальним валом 2. Ясно, що рух частинок діаметром  $d$  у напрямку отвору не є можливим, так як розмір отвору при повороті зменшувався і став меншим значення  $d$ . Очевидно, що для виключення заклинювання частинки її рух має здійснюватися у протилежному напрямку (частинка повинна бути повернута в надрешітну область). Визначимо умову, за якої це реалізується. Розглянемо сили, що діють на частинку гірської породи, розташовану між валками грохоту.

Побудуємо перпендикуляри до поверхонь пальця і валу в точках їхнього дотику до частинки матеріалу. Очевидно, що у цих напрямках на частинку діють сили  $P_1$  і  $P_2$ , прикладені як з боку пальця, так і валу. Ці сили безпосередньо пов'язані з діючою на частинку силою тяжіння  $G$ .

$$P_1 = G \cos \beta, \quad (3.1)$$

$$P_2 = G \cos \gamma.$$



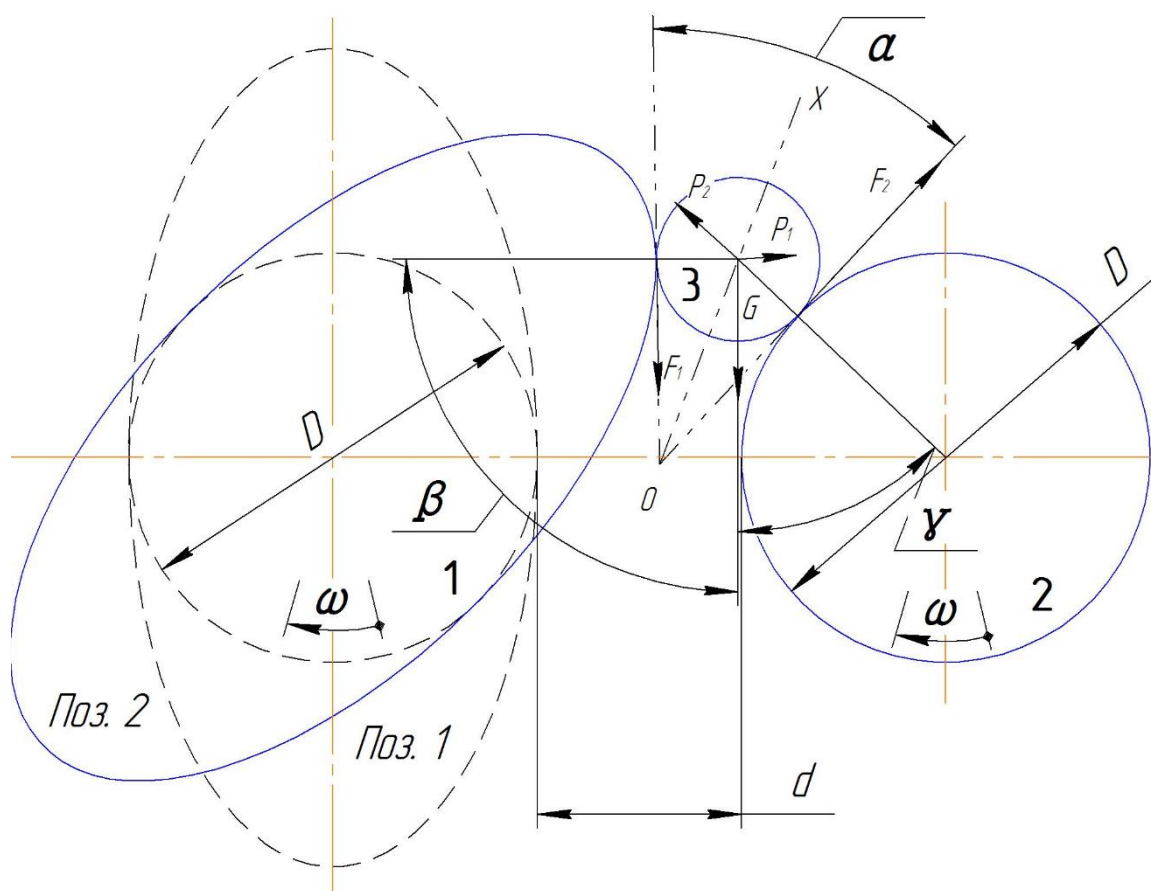


Рис.3.4. Сили, що діють на частинку матеріалу.

Дія цих сил визначає виникнення сил тертя, прикладених до частинки:

$$F_1 = fP_1, \quad (3.2)$$

$$F_2 = fP_2,$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом частинки, пальцем і валом грохоту (вважаємо, що палець і вал виконані з одного і того ж матеріалу). Для повернення частинки в надрешітну область необхідно, щоб рівнодіюча всіх сил, що діють на частинку, була спрямована у бік, протилежний розташуванню отвору, що закривається. Визначивши проекції

сил на вісь  $OX$ , отримаємо умову виштовхування частинки в надрешітну область (умова виключення затиснення частинки):

$$P_1 \sin \frac{\alpha}{2} + P_2 \sin \frac{\alpha}{2} + F_1 \cos \frac{\alpha}{2} > F_1 \cos \frac{\alpha}{2} + G \cos \left[ \beta - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad (3.3)$$

де  $\alpha$  – кут захоплення, утворений дотичними до поверхонь пальця і валу в точках їх дотику до куска матеріалу.

Звернемо увагу на той факт, що використаний в літературі [118] термін «кут захоплення» стосується задачі втягування частинки матеріалу в зазор між валками. У розглянутій задачі використання цього терміну набуває іншого змісту, так як він пов'язаний з виштовхуванням частинки із зазору між пальцем і валом.

З урахуванням (3.1) і (3.2) отримаємо:

$$\frac{\cos \beta \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \gamma \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - \cos \left[ \beta - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{\cos \beta \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \cos \gamma \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} > f. \quad (3.4)$$

Можна виразити кут  $\gamma$  через кути  $\beta$  і  $\alpha$ :

$$\gamma = \pi - \beta - \alpha. \quad (3.5)$$

Тоді ліва частина нерівності (3.4) може бути представлена в функції двох кутів ( $\alpha$  і  $\beta$ ). Видно, що на відміну від відомих співвідношень між коефіцієнтом тертя  $f$  і кутом захоплення  $\alpha$ , застосовуваних при дробленні матеріалів, отримана залежність (3.4) містить додатковий кут  $\beta$ , який характеризує положення точки дотику частинки матеріалу до пальця. Кут  $\beta$  – це кут, утворений перпендикуляром до поверхні пальця в точці його дотику до частинки і вектором сили тяжіння  $G$ . Видно також, що нерівність (3.4) не



містить значень діючих зусиль, а включає тільки тригонометричні функції кутів і значення  $f$ . Це важливий висновок, так як умова викидання частки залежить тільки від положення частинки і коефіцієнта тертя. Нерівність (3.4) важлива для проектувальників валково-пальцевих грохотів з точки зору перевірки запропонованої конструкції з конкретними розмірами робочих елементів на виключення режиму затиснення частинок. При цьому необхідно розглянути кілька можливих положень частинки і переконатися у виконанні нерівності (3.4). Для попередньої оцінки результатів зіставлення автором отримана розрахункова залежність значення лівої частини нерівності (3.4) (параметр  $F_b$ ) від кутів  $\alpha$  і  $\beta$ . Залежність приведена на рис.3.5. Ясно, що у варіантах  $F_b > f$  спостерігається виштовхування частинок. В іншому випадку можливо їх затискання. Значення  $f$  має враховувати характеристики дотичних матеріалів. Зазвичай робочі органи грохотів виготовляють зі сталі. Для більшості руд і гірських порід коефіцієнт тертя ковзання коливається в межах 0,3-0,45 [44].

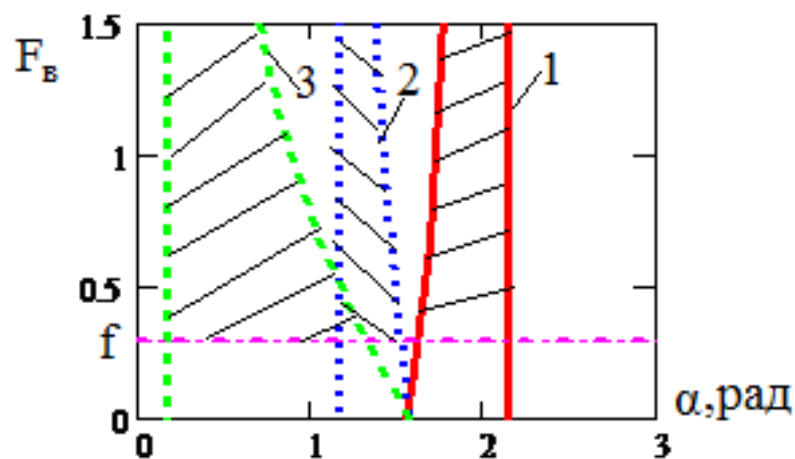


Рис. 3.5. Залежність  $F_b$  ( $\alpha$  і  $\beta$ ) ( $1 - \beta = 0,5$  рад;  $2 - \beta = 1$  рад;  $3 - \beta = 1,5$  рад).

У технології переробки вапняку має місце тертя частинок зі сталевими поверхнями пальця і футерувального валу. Можливий варіант, що характеризується наявністю на поверхні вапняку глинистого покриття.

На рис.3.5 горизонтальною лінією показано значення коефіцієнта  $f$  для дотичних поверхонь. Зазвичай в довідковій літературі приводять можливі межі зміни  $f$ , тому на рис. 3.5 необхідно зафіксувати його максимальне значення. Розглянемо значення  $F_b$ , що перевищують заданий рівень  $f$ . Видно, що для кожного із наведених значень кута  $\beta$  існує область зміни кута захвату, де  $F_b > f$ . Причому при збільшенні кута  $\beta$  ця область зміщується в зону із меншими значеннями  $\alpha$ . Заштриховані області на рис.3.5 ілюструють це зміщення і відповідають режиму виштовхування частинок. З рис. 3.5 видно також, що зміна коефіцієнта тертя в невеликих межах (наприклад, від 0,3-0,45) не призводить до істотної зміни областей, які відповідають режиму виштовхування частинок, що важливо для забезпечення стабільної роботи грохоту. Якщо в процесі зіставлення  $F_b$  та  $f$  виявилось, що затискання частки матеріалу можливо, то прийнятне рішення слід шукати у зміні конструктивних параметрів диска або футерувального вала. Так як висота пальця безпосередньо пов'язана із розміром розділення частинок ( $d$ ) і не може бути довільно змінена, то параметром, що змінює кути  $\alpha$ ,  $\beta$ , є діаметр вала  $D$ .

У розд.2 було показано, що забезпечення максимальної ефективності збагачення сировини можливо при оптимальній крупності розділення часток матеріалу  $d = d_{opt}$ . Очевидно, що запропонована конструкція валково-пальцевого грохоту повинна бути орієнтована на забезпечення оптимальної крупності розділення, яка може бути отримана із методики її визначення, запропонованої в розд.2. Значення  $d_{opt}$  залежить від характеристик вихідної сировини. Її значення для сировини Західно-Тягинського родовища (як показано в розд. 2) склало  $d_{opt} = 7$  мм. Дослідження характеристик сировини інших родовищ дозволить отримати відповідні їх умовам значення  $d_{opt}$ . Ясно, що отримані значення можуть відрізнятися. Звідси зрозуміло, що в загальному випадку грохоти, запропоновані для класифікації сировини в умовах різних родовищ, можуть мати різні крупності розділення, значення яких визначається властивостями матеріалу. Таким чином, розглядаючи питання

конструктивного виконання валково-пальцевих грохотів для класифікації сировини вапнякових родовищ, необхідно звернути увагу на реалізовану крупність розділення частинок, значення якої істотно залежить від конструктивних параметрів робочих органів грохоту.

У попередньому підрозділі розглянута динаміка частинок валково-пальцевого грохоту. Розглядається варіант диска з двома пальцями (рис. 3.4). Для забезпечення функції очищення поверхні просіювання частинок від налипання дрібних фракцій матеріалу висоту зуба обрано рівною крупності розділення частинок  $d$  ( $h=d$ ). При цьому розмір вікна, що періодично виникає при обертанні диска, дорівнює  $d$ . У цьому варіанті відстань між двома валками, на яких розташовані диски, дорівнює  $D+d$  ( $D$  – діаметр валу). Очевидно, що значення  $d$  доцільно вибирати з умови  $d = d_{onm}$  відповідно до методики, запропонованої в розд.2.

Практика створення дисків для грохотів свідчить про те, що їх конструктивні виконання можуть істотно відрізнитися. Широко використовують багатопальцеві диски. Таке виконання обумовлено функціями, які виконують пальці в грохоті. Кількість пальців визначає кінематику руху частинок матеріалу, ступінь силового впливу на частинки. Виходячи з того, що при переробці вапнякової сировини на валково-пальцевий грохот покладено додаткову функцію обдирання глинистих покриттів із кусків гірської породи, прийнятний варіант реалізації багатопальцевої конструкції [122,123] При цьому кількість силових впливів пальців на частки матеріалу зростає, що сприяє зростанню інтенсивності процесу обдирання. З огляду на цей факт, автор дисертаційної роботи реалізував макет установки (див. розд. 5) з чотирма пальцями на кожному диску. Очевидно, що при чотирипальцевій структурі диска умови проникнення частинок матеріалу, що не перевищують розмір  $d \leq d_{onm}$ , із надрешітної області в підрешітну, будуть відрізнитися від раніше розглянутого варіанту (рис.3.4) з двома пальцями. Це обумовлено взаємним розташуванням сусідніх пальців. Звідси виникає завдання визначення умов проникнення частинок розміром  $d \leq d_{onm}$  в підрешітну область

при заданих конструктивних параметрах багатопальцевого диска. Розглянемо один із можливих варіантів виконання диска грохоту, де пальці мають форму еліпса. Висота пальців –  $h$ , а діаметр вала –  $D$  (рис. 3.6).

Розташуємо диск у декартовій системі координат в положенні, показаному на рис. 3.6. Таке розташування дозволяє записати рівняння еліпсів, що відповідають профілям пальців, у вигляді:

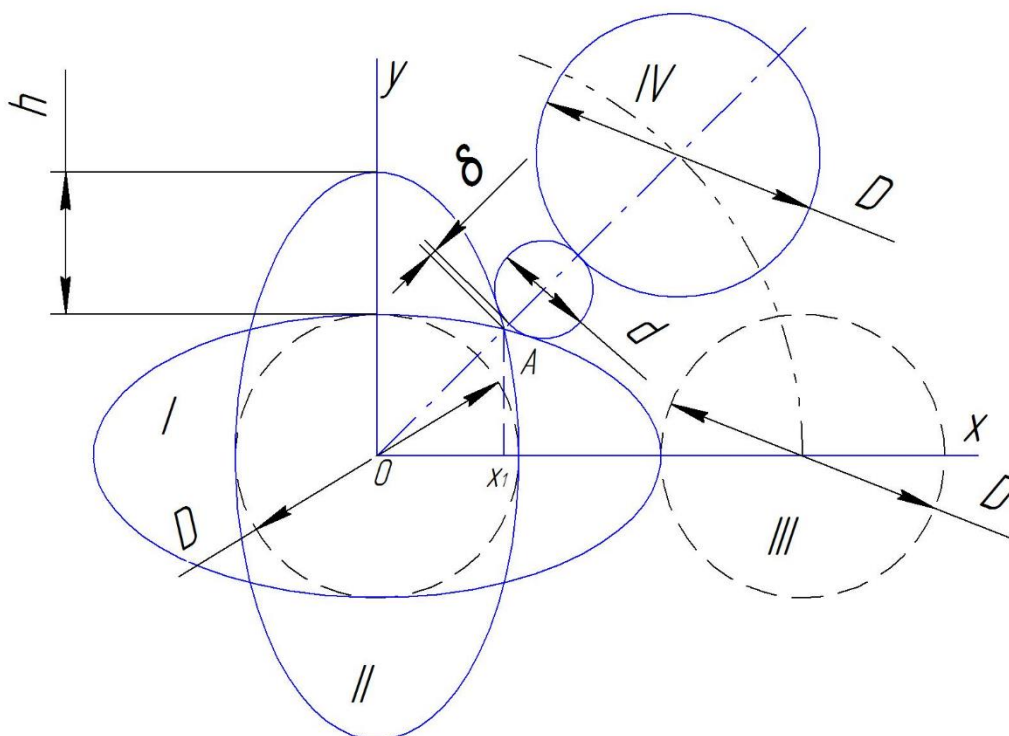


Рис.3.6. Чотирипальцевий диск грохоту.

- для еліпса I 
$$\frac{x^2}{\left(\frac{D}{2} + h\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} = 1; \quad (3.6)$$

- для еліпса II 
$$\frac{x^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{D}{2} + h\right)^2} = 1 \quad (3.7)$$

В процесі роботи грохоту диск обертається. Відповідно переміщуються пальці диска. Такий рух диска у прийнятій системі координат може бути представлений еквівалентним переміщенням футерувального валу із положення III в положення IV. Очевидно, що положення IV футерувального валу визначає розмір вікна, який повинен бути забезпечений для попадання частинок розміром  $d$  із надрешітної частини грохоту в підрешітну. Видно, що цей розмір перевищує значення  $d$  і становить  $\Delta + d$ . Значення  $\Delta$  можна отримати, зв'язавши цю змінну з конструктивними параметрами диска ( $D$ ,  $h$ ) і значенням  $d$ . Для цього визначимо координату точки перетину двох еліпсів (еліпсів I та II). Отримаємо:

$$x_1 = \frac{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{\left(\frac{D}{2} + h\right)^2}}}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} - \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{\left(\frac{D}{2} + h\right)^4}}}. \quad (3.8)$$

З урахуванням (3.7) справедливо:

$$\Delta = \frac{D}{2} + h - d - \sqrt{2}x_1. \quad (3.9)$$

Видно, що розмір вікна  $\Delta + d$  залежить від конструктивних параметрів диска ( $D$  і  $h$ ). Цей розмір перевищує аналогічний розмір вікна у варіанті із двома пальцями, де його значення дорівнює  $d$  (рис.3.4). Отримані співвідношення слід враховувати при виконанні робіт із проектування дисків і розташування валків грохоту [124].

Слід зазначити, що висновки підрозд. 3.3 і 3.4 відображають умови працездатності грохотів, пов'язуючи їх конструктивні параметри з параметрами матеріалу, що підлягає грохоченню. При цьому аналізуються

режими, що виключають затискання частинок дисками грохоту, а також режими, що забезпечують задану крупність розділення.

### 3.4. Висновки до розділу 3

1. Показано, що використання валково-пальцевого грохоту є прийнятним варіантом для реалізації комбінованого пристрою, що здійснює як відділення глинистих покриттів від кусків гірської породи (вапняку), так і розділення частинок по крупності (включаючи умови підвищеної вологості сировини, що переробляється). Це обґрунтовує доцільність застосування валково-пальцевої конструкції грохоту для переробки сировини неоднорідних вапняків.

2. В запропонованій конструкції валково-пальцевого грохоту висота його пальця визначається раціональним значенням крупності розділення матеріалу, обґрунтованим в розд. 2, та умовою безперервного очищення поверхні просівання від налипання частинок вапняку мілких фракцій.

3. Завдяки особливостям конструктивного виконання дисків валково-пальцевого грохоту можливий варіант затиснення частинки матеріалу між футерувальним валом і пальцем грохоту, що призводить до порушення режиму грохочення. Для виключення таких режимів досліджена динаміка руху частинок матеріалу вапняку.

4. Доведено, що умова виключення режиму затиснення частинки матеріалу не залежить від рівнів сил, що діють на цю частинку, а визначається значеннями кута захоплення  $\alpha$  і кута  $\beta$ , що характеризують положення точки дотику частинки з пальцем. Визначення аналітичної залежності, яка визначає умову виключення режиму затиснення частинок вапняку, дозволяє проектувальникам грохотів здійснювати перевірку запропонованої конструкції на її працездатність.

5. Аналіз отриманої аналітичної залежності показує, що при збільшенні кута  $\beta$  область прийнятних (з точки зору виключення затиснення частинок

вапняку) значень  $\alpha$  зміщується в зону зменшення чисельних значень  $\alpha$ . Зміна коефіцієнта тертя в невеликих межах не приводить до істотної зміни областей, що відповідають режиму виштовхування частинок вапняку.

6. При чотирипальцевому виконанні диска грохоту розмір отвору, що забезпечує задану крупність розділення частинок вапняку, перевищує аналогічний розмір для двопальцевого виконання, що обумовлено взаємним розташуванням пальців. Значення цього перевищення залежить від конструктивних параметрів диска і має бути враховано при проектуванні грохотів.

Таким чином можна сформулювати друге наукове положення: «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».

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях автора [122, 123, 124].

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕГРЕСІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ ВАПНЯКУ

### 4.1. Обґрунтування доцільності застосування регресійного аналізу для розробки моделей

У розділі 2 було показано, що показники ефективності збагачення  $E$  і класифікації  $E_2$  вихідної сировини вапнякового родовища значною мірою залежать від її характеристик (гранулометричного та хімічного складу). Отримання таких характеристик для сировини різних родовищ, а також при її переробці в умовах одного родовища здійснюється експериментальним шляхом. Експеримент складається із ряду спостережень, при яких фактори впливу на об'єкт набувають різних значень і викликають певні відгуки на ці дії. Експеримент повинен бути заздалегідь спланований, бо тільки при такому підході можна отримати необхідні характеристики об'єкта. Саме із цих позицій виходив автор при підготовці і проведенні експериментальних досліджень, результати яких викладені в табл. 2.1. У таблицях експериментальних даних зв'язок між факторами, що впливають, і відгуками задається в табличному вигляді (у вигляді дискретних значень змінних). Якщо рішення задач моделювання процесів, що протікають в об'єкті, пов'язане з використанням аналітичних залежностей, то застосування табличних даних, які характеризують зв'язки між параметрами, не є прийнятним. Виникає необхідність отримання аналітичних залежностей виходячи із таблиці експериментальних даних. Обробка експериментальних даних здійснюється різними методами. Одним з найбільш поширених методів є регресійний аналіз. У такому аналізі зв'язок між змінними задають алгебраїчними ступеневими поліномами (рівняннями регресії). Ясно, що рівняння регресії повинні



відображати зв'язки, що існують між змінними, заданими в табличному вигляді. Незважаючи на те, що рівняння регресії характеризують стохастичні зв'язки між змінними (одному і тому ж значенню аргументу (фактора) можуть відповідати різні значення функції, що виникають з відповідними ймовірностями), їх використання в подальшому аналізі дає певні переваги. Так, наприклад, залежність концентрації вапняку від крупності частинок (рис. 2.1) дозволяє оцінити можливості збагачення сировини шляхом його класифікації, що є передумовою формування прийнятого в дисертаційній роботі підходу до збагачення. Виходячи з того, що характеристики, наведені на рис. 2.2, носять якісний характер, можна прийти до висновку про те, що підвищена точність регресійної моделі (2.2) не є обов'язковою, проте перевірка її на адекватність необхідна.

У розділі 2 дисертаційної роботи використання регресійних рівнянь  $\frac{m_{2d}}{m}(d)$  і  $\frac{m_{u2d}}{m}(d)$  дозволило отримати аналітичні залежності для розрахунку показників ефективності збагачення  $E$ . Аналіз  $E(d)$  дозволив визначити значення  $d_{opt}$ , яке відповідає максимальному рівню  $E$ . У той же час, слід пам'ятати, значення  $\frac{m_{2d}}{m}$  (2.7) і  $\frac{m_{u2d}}{m}$  (2.8) є оцінками математичних очікувань цих параметрів, виходячи їх вибірки, що відповідає умовам проведення експерименту. З цієї причини значення  $E$  в (2.4), отримане з урахуванням (2.7) і (2.8) також є випадковою величиною з відповідними характеристиками (оцінкою математичного очікування, дисперсії). У розд.2 було показано, що ступінь відхилення експериментальних точок від точок, розташованих на регресійних залежностях  $\frac{m_{2d}}{m}(d)$  і  $\frac{m_{u2d}}{m}(d)$ , незначна і визначається значенням  $F_{opt}$ . У той же час не була доведена адекватність цих регресійних моделей і не була дана оцінка ступеня «функціональності» зв'язків між змінними, які вони відображають. Розгляду цих питань присвячено підрозділ 4.2 дисертації.

Розглянемо ще одну задачу, рішення якої передбачається в рамках дисертації. Дослідження в розд. 2, 3 свідчать про те, що підвищення ефективності збагачення і класифікації сировини може бути досягнуто шляхом введення у технологічну лінію переробки матеріалу нового елемента, який здійснює відділення глини від кусків гірської породи і знижує вплив вологості сировини на досліджувані показники ефективності. Ясно, що конструктивні та технологічні параметри розробленого в розд. 3 нового елемента значною мірою визначають досягнуті показники збагачення і класифікації. Досягнутий ефект може бути зафіксований шляхом проведення серії експериментальних досліджень. Однак, внаслідок складності проведення експериментів, їх трудомісткості, кількість спостережень обмежена. Крім того, в складних технологічних лініях переробки сировини показники ефективності процесу залежать від безлічі факторів. В даному випадку це конструктивні і технологічні параметри нового введеного елемента, а також інших елементів, які містить технологічна лінія. Тому в математичних моделях враховують найбільш важливі фактори, що мають істотний вплив на функцію відгуку. Саме цей підхід до моделювання використовується в багатофакторному регресійному аналізі. Застосування теорії планування експерименту [104,105] дозволяє зменшити кількість дослідів, необхідних для побудови регресійної залежності. Якщо регресійні залежності, що зв'язують показники ефективності збагачення і класифікації процесу з факторами, які їх визначають, побудувати для двох варіантів: існуючої технологічної лінії і лінії, що містить розроблений елемент (валково-пальцевий грохот), то існує можливість зіставлення розрахункових характеристик. На основі їх зіставлення може бути дана оцінка ефективності розробленого пристрою, причому ця оцінка буде здійснена по відношенню до найбільш важливих (загальновизнаних) показників. Вирішення цього завдання буде викладено у цьому розділі.

## 4.2. Аналіз адекватності нелінійних однофакторних моделей

У розд.2 дисертаційної роботи отримані три регресійні залежності (2.2), (2.7), (2.8). Всі залежності мають нелінійний (ступеневі функції) характер і відображають зв'язок функції відгуку з одним фактором (однофакторні моделі). Завдання полягає у визначенні адекватності регресійних моделей і оцінці ступеня «функціональності» стохастичних зв'язків. Порядок перевірки адекватності моделі (оцінки її точності) здійснюють шляхом розрахунку і зіставлення ряду параметрів.

Залишкову дисперсію  $S_{ocm}^2$  (дисперсію адекватності) отримують із формули [104]:

$$S_{ocm}^2 = \frac{nF_{ocm}}{N - (K + 1)}, \quad (4.1)$$

де  $F_{ocm}$  – сума квадратів відхилень функції відгуку;

$N$  – кількість спостережень;

$K$  – кількість факторів, що враховуються моделлю;

$n$  – кількість паралельних дослідів.

У табл. 4.1 наведені розрахункові значення  $S_{ocm}^2$  для розглянутих регресійних моделей. Тут  $\hat{Y}$  – оцінка математичного очікування функції відгуку.

При розрахунку  $S_{ocm}^2$  враховано, що кількість виконаних спостережень при формуванні моделей різна, а кількість факторів у кожній моделі  $K = 1$ .

Таблиця 4.1

Розрахункові значення  $S_{ост}^2$ 

Рівняння регресії	Формула в дисертації	$n \cdot F_{ост}$	$N$	Значення $S_{ост}^2$
$\hat{Y} = 35 + 5,84 x^{0,469}$ (модель 1)	(2.2)	3·105	8	52,5
$\hat{Y} = -0,223 + 7,971 x^{0,443}$ (модель 2)	(2.8)	3·6,5	7	3,9
$\hat{Y} = -0,675 + 22,403 x^{0,347}$ (модель 3)	(2.7)	3·39	6	29,25

Визначимо дисперсію відтворюваності експерименту  $S_{вос}^2$ . Для цього використаємо залежності [41]:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{ij}; \quad S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad (4.2)$$

де  $n$  – число паралельних спостережень;

$i$  – номер спостереження.

Вирахуємо значення критерію Кохрена [104]:

$$G = \frac{S_{i.\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (4.3)$$

Порівнюємо табличне  $G_T$  і розрахункове  $G_p$  значення  $G$ . Якщо  $G_p < G_T$ , то однорідність дисперсій забезпечується, тобто в різних дослідах дисперсії відрізняються незначно [105].

Дисперсія відтворюваності:

$$S_{\text{вс}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (4.4)$$

Проведення паралельних дослідів у рамках  $i$ -го спостереження (при одних і тих же значеннях  $X$ ) дозволяє зменшити похибку у визначенні  $\bar{Y}_i$ . При заповненні табл.2.1 для кожного спостереження було проведено три паралельних досліди ( $n=3$ ). Таким чином, змінна  $j$  приймає значення  $j=1,2,3$ .

Табл.4.2 ілюструє значення змінних  $\bar{Y}_i$ ,  $Y_{i1}$ ,  $Y_{i2}$ ,  $Y_{i3}$ ,  $S_i^2$  для моделі 1 з табл. 4.1. Зіставлення розрахункового значення  $G_p$  із табличним  $G_T$  підтвердило гіпотезу про однорідність дисперсій  $s_i^2$  ( $0,13 < 0,515$ ). Усереднюючи значення  $S_i^2$  в проведених спостереженнях, отримаємо  $S_{\text{вс}}^2 = 20,16$ .

Таблиця 4.2

Табличні значення параметрів для розрахунку  $S_{\text{вс}}^2$  (модель 1)

Номер спостереження $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
$Y_{i1}$	74,2	68,8	54	50,4	44,6	42	33,9	46,6
$Y_{i2}$	76,7	60,5	61	49,1	43	41,6	39,9	39,5
$Y_{i3}$	68	68	61,9	57,5	51,5	49,7	31	47,5
$\bar{Y}_i$	72,96	65,76	58,96	52,32	46,36	44,43	34,95	44,55
$S_i^2$	20	20,96	18,7	20,44	20,4	20,84	20,6	19,26

Аналогічні таблиці 4.3, 4.4 складемо для моделей 2 і 3.

Із табл. 4.3 отримаємо  $S_{\text{ооc}}^2 = 1,326$ . Однорідність дисперсії  $S_i^2$  підтверджена ( $0,38 < 0,561$ ).

Таблиця 4.3

Табличні дані для розрахунку  $S_{\text{ооc}}^2$  (модель 2).

Номер спостереження $i$	1	2	3	4	5	6	7
$Y_{i1}$	10,75	13,91	16,87	22,17	29,73	39,36	53,93
$Y_{i2}$	11,23	14,42	17,49	22,93	29,62	40,56	54,66
$Y_{i3}$	11,06	14,83	18,38	24,59	32,26	43,07	55,99
$\bar{Y}_i$	11,01	14,38	17,58	23,23	30,53	41	54,86
$S_i^2$	0,059	0,212	0,576	1,532	2,23	3,58	1,09

Так само, як і для даних табл.4.3, однорідність значень  $S_i^2$  (табл. 4.4) підтверджується ( $0,194 < 0,616$ ), тобто експерименти виконувалися в однакових умовах. Тут значення  $S_{\text{ооc}}^2 = 11,93$ .

Таблиця 4.4.

Табличні значення параметрів для розрахунку  $S_{\text{ооc}}^2$  (модель 3)

Номер спостереження $i$	1	2	3	4	5	6
$Y_{i1}$	23,8	31,1	37,7	50,1	61,1	77,6
$Y_{i2}$	27,2	35,3	43,8	51,3	65,6	81,4
$Y_{i3}$	30,6	38	43,8	56,5	68,5	83,9
$\bar{Y}_i$	27,19	34,81	41,75	52,63	65,06	80,97
$S_i^2$	11,56	12,09	12,4	11,57	13,9	10,06

Наступний етап дослідження полягає у визначенні відношення  $F_p$  [104]:

$$F_p = \frac{S_{ocm}^2}{S_{\epsilon oc}^2}. \quad (4.5)$$

Розрахункове значення  $F_p$  зіставляється з табличним значенням  $F$  – критерію Фішера ( $F_T$ ). Табличне значення  $F_T$  при 5% -му рівні значущості наведені, наприклад, в [103] з урахуванням ступенів свободи для чисельника і знаменника виразу (4.5). Розрахункові  $F_p$  і табличні  $F_T$  значення критерію Фішера для розглянутих регресійних моделей наведені в табл. 4.5. Суть оцінки адекватності моделі полягає у зіставленні значень  $S_{ocm}^2$  і  $S_{\epsilon oc}^2$ . Дисперсія відтворюваності  $S_{\epsilon oc}^2$  характеризує помилку, пов'язану із проведенням експериментів. Залишкова дисперсія  $S_{ocm}^2$  обумовлена як точністю обраної моделі, так і помилкою, відображеною в дисперсії  $S_{\epsilon oc}^2$ . Для «ідеальної» моделі, яка не вносить похибки в розрахунок  $S_{ocm}^2$ , значення  $S_{ocm}^2 = S_{\epsilon oc}^2$ .

Таблиця 4.5

Розрахункові і табличні значення критерію Фішера

Найменування	Значення параметрів			
	$F_p$	ступінь свободи для чисельника	ступінь свободи для знаменника	$F_T$
Модель 1	2,6	6	16	2,7
Модель 2	2,9	5	14	3
Модель 3	2,45	4	12	3,3

Таким чином, відношення (4.5), розраховане для використаної моделі, характеризує ступінь її відмінності від «ідеальної моделі» зі значенням  $F_p = 1$ . Табличне значення критерію Фішера обмежує гранично допустиме значення

відношення (4.5), обмежуючи тим самим граничний рівень похибки, пов'язаної з вибором рівняння регресії. Аналізуючи з цих позицій результати розрахунку, представленого в табл. 4.5, можна прийти до висновку про те, що всі представлені моделі адекватні.

Важливим моментом розглянутого аналізу регресійних моделей є оцінка ступеня їх «функціональності», тобто оцінка ступеня відмінності моделі, що характеризує стохастичний зв'язок, від функціональної залежності. Для виконання такої оцінки при використанні нелінійної регресійної моделі розраховують кореляційне відношення  $\rho$  [103]:

$$\rho = \frac{S_Y^*}{S_Y}, \quad (4.6)$$

де  $S_Y$  – дисперсія вихідного параметра;  $S_Y^*$  – дисперсія точок лінії регресії.

Значення  $S_Y$  характеризує розкид експериментальних точок  $Y_i$  відносно середнього значення вихідного параметра  $\bar{Y}$  [103]:

$$S_Y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2; \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i. \quad (4.7)$$

Дисперсію точок лінії регресії отримаємо з формули [103]:

$$S_Y^{*2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\hat{Y}(X_i) - \bar{Y}]^2. \quad (4.8)$$

У тому випадку, якщо зв'язок між  $X_i$  і  $Y_i$  не стохастичний, а функціональний, значення  $\rho = 1$ . Ступінь наближення розрахункового значення  $\rho$  до 1 характеризує ступінь «функціональності» моделі. У разі, якщо  $\rho = 1$ , експериментальні точки розташовані на лінії регресії. Значення



кореляційних відношень, розраховані для розглянутих нелінійних моделей, наведені в табл.4.6.

Таблиця 4.6

## Значення кореляційних відношень

	Значення параметрів			
	$S_Y$	$S_Y^*$	$\rho$	$\rho^2$
Модель 1	13,445	12,311	0,916	0,838
Модель 2	17,97	17,938	0,998	0,996
Модель 3	31,648	31,56	0,997	0,994

Видно, що значення кореляційних відношень для моделей 2, 3 близькі до 1, що підтверджує практично функціональний зв'язок між аргументом  $X$  і функцією відгуку  $Y$  в наведених формулах. Цей важливий висновок дозволяє з певним допущенням розглядати залежності (2.7) і (2.8), що використовуються в узагальненій математичній моделі для розрахунку показника  $E$ , як функціональні зв'язки між параметрами. Прийнятність введених допущень визначена незначними відмінностями розрахункового значення  $\rho$  від 1 (для моделі 2 – 0,2%, для моделі 3 – 0,3%), тобто ступінь «функціональності» моделі 2 становить 99,8%, а моделі 3 – 99,7%.

У моделі 1 ступінь «функціональності» залежності, що існує між змінними, є нижчою. Це підтверджується також деякою віддаленістю експериментальних точок від лінії регресії на рис.2.1. Чи прийнятна досягнута точність реалізації моделі 1? Відповідь на це питання пов'язана з аналізом подальшого використання цієї залежності в дисертаційній роботі. Залежність (2.2) використовується на рис. 2.2 для відображення якісного зв'язку вмісту вапняку з розміром його частинок. На її основі розроблено загальний підхід до збагачення мінеральної сировини. Очевидно, що для вирішення цих завдань досягнута точність моделі слід вважати прийнятною.

### 4.3. Побудова та аналіз багатофакторних математичних моделей для розрахунку ефективностей збагачення та класифікації

Необхідність застосування багатофакторних регресійних моделей була обґрунтована в підрозділі 4.1 виходячи із завдань, що вирішуються в дисертаційній роботі. Зупинимось на допущеннях, що вводяться при моделюванні процесів:

- значення факторів вимірюються з малою похибкою. Поява помилки в функції відгуку зумовлена наявністю в процесі моделювання невиявлених змінних, які не фігурують в рівнянні регресії;

- результати спостережень є нормально розподіленими випадковими величинами;

- при проведенні експерименту з об'ємом вибірки  $N$  за умови, що кожен дослід повторюється  $n$  раз, вибіркові дисперсії  $S_1^2, S_2^2 \dots S_N^2$  повинні бути однорідними.

Завдання багатофакторної регресії полягає в отриманні регресійної моделі, де відхилення результатів спостережень від лінії регресії будуть мінімальні, а їх розрахунок передбачає використання методу найменших квадратів. Регресійну залежність задають степеневим поліномом. При збільшенні ступеня полінома кількість необхідних спостережень істотно зростає. Якщо апріорі ступінь полінома невідома, то цей ступінь послідовно збільшують до тих пір, поки рівняння регресії не стане адекватним [102]. Так, наприклад, в [103] показано, що для вирішення оптимізаційних задач доцільно застосовувати поліноми другого ступеня. Завдання, сформульоване в дисертаційній роботі, не вимагає пошуку екстремуму функції, заданої регресійним рівнянням. Йдеться про зіставлення показників ефективності збагачення і класифікації в двох варіантах: в існуючій технологічній лінії і технологічної лінії, що містить новий елемент (валково-пальцевий грохот).

Тому тут прийнятне використання полінома першого ступеня, тобто рівняння регресії виду [104]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j. \quad (4.9)$$

Тут,  $b_0$ ,  $b_j$  – коефіцієнти лінійного рівняння регресії;  $X_j$  – чинники, що впливають на функцію відгуку;  $k$  – кількість факторів, уведених в регресійну модель.

Виходячи з трудомісткості виконуваних експериментів, їх складності будемо прагнути до скорочення кількості факторів. Перший крок у цьому напрямку полягає у використанні при моделюванні лінійної залежності (4.9). Застосування більш складної моделі передбачається в тому випадку, якщо адекватність лінійної моделі (4.9) в розглянутих умовах не буде підтверджена. Використання моделі (4.9) передбачає визначення переліку тих параметрів, лінійний зв'язок яких задано рівнянням регресії. Важливою характеристикою процесу збагачення вапняку, як було показано в розд.2, є його ефективність  $E$ . Значення  $E$  залежить від безлічі керованих і некерованих факторів: характеристик використаної сировини, конструктивних параметрів пристроїв, що здійснюють переробку сировини, режимів їх роботи. У розд. 2 отримано аналітичні залежності, що дозволяють розрахувати значення  $E$ . Однак розраховані значення показника  $E$  отримані для усереднених характеристик вихідної сировини (див. табл. 2.1). Ясно, що в процесі переробки сировини у виробничих умовах кар'єрів характеристики вихідної сировини будуть змінюватися. На різних уступах вони будуть різні. Значною мірою може змінитися концентрація вапняку  $\alpha$ , яка докорінно вплине на показник збагачення. В аналітичних залежностях, отриманих в розд. 2, враховано зв'язок показника  $E$  з ефективністю процесу класифікації  $E_2$ . Однак  $E_2$  розглядається як незалежна змінна. Не розкритий зв'язок  $E_2$  з вологістю вихідної сировини, хоча цей зв'язок очевидний і її вплив на  $E_2$  істотний.

Іншим важливим показником, що характеризує процес переробки вапнякової сировини, є ефективність класифікації (грохочення) сировини  $E_2$ . Показник значною мірою визначає ефективність збагачення і тому дослідження факторів, що визначають його рівень, меж їх зміни, оцінка ступеня впливу цих факторів на  $E_2$  дозволяє не тільки розкрити особливості процесу грохочення, але і зв'язати його показники з ефективністю збагачення  $E$ . Так само, як і показник  $E_2$ , значення  $E$  залежить від безлічі факторів. Істотний вплив, наприклад, параметрів конструктивних елементів валкового грохоту, запропонованого в розд.3. Зміна кута нахилу, продуктивності грохоту, кількості обертів вала і інших параметрів призводить до варіації значення  $E_2$ . Тому особливу увагу слід приділити вибору переліку чинників, що вводяться у створювані регресійні моделі. Обмеження кількості трудомістких дослідів передбачає зменшення загальної чисельності уведених чинників.

Фактори, що мають істотний вплив на  $E$  і  $E_2$ , можна розділити на керовані і некеровані [102]. Керовані фактори дозволяють експериментатору встановлювати в процесі проведення дослідів їх необхідні значення і підтримувати (в разі необхідності) їх постійними протягом експерименту. Задати необхідний рівень некерованого чинника в кожному досліді неможливо. Рівень факторів у проведених дослідях повинен вимірюватися з необхідною точністю. Їх значення вважають детермінованими величинами. Похибки, пов'язані з неточністю вимірювання факторів, враховує дисперсія випадкової величини функції відгуку.

При дослідженні процесу необхідно враховувати всі суттєві чинники. Якщо їх кількість значна, то деякі фактори повинні бути стабілізовані на певних рівнях протягом усього експерименту [103]. Це дозволить виключити їх вплив на варіацію функції відгуку, тобто ці фактори можуть бути вилучені з регресійної моделі, що зменшить загальну кількість факторів. До таких факторів, наприклад, можуть бути віднесені конструктивні параметри розробленого грохоту (кут нахилу, швидкість обертання вала, розміри

елементів і інші), а також технологічні (продуктивність установки, тривалість обробки матеріалу і т.п.). Тому запропоновано протягом виконання дослідів стабілізувати рівні цих керованих параметрів, що дозволило обмежити кількість факторів у створюваних лінійних регресійних моделях.

Некеровані фактори не можуть бути стабілізовані. У виробничих умовах, пов'язаних із видобутком вапняків кар'єрним способом, до таких факторів, що мають істотний вплив на показники  $E$  і  $E_2$ , слід віднести:  $X_1$  – процентний вміст вапняку в вихідному продукті;  $X_2$  – вологість вихідного продукту;  $X_3$  – крупність частинок. Дійсно, вміст вапняку залежить від розроблюваного ухилу, вологість вихідного продукту визначається погодними умовами, крупність частинок вихідної сировини також залежить від умов видобутку і може змінюватися в широких межах. Із наведеного переліку некерованих чинників слід звернути увагу на чинники  $X_1$  і  $X_3$ . Раніше (підрозд. 2.1) було показано, що між процентним вмістом вапняку і розміром частинок існує стохастичний зв'язок, обумовлений регресійною залежністю (2.2). Цей зв'язок нелінійний і представлений ступеневою залежністю. Визначимо ступінь лінійності цього зв'язку. Для цього використаємо функцію *line* в системі MathCAD і на основі даних табл. 2.2 отримаємо регресійну залежність:

$$\hat{Y} = 44,132 + 0,579X . \quad (4.10)$$

Коефіцієнт кореляції між фактором  $X_1$  і фактором  $X_3$  склав 0.876. Видно, що ступінь лінійності зв'язку, що існує між факторами  $X_3$  і  $X_1$ , висока. В [40], наприклад, показано, що при значенні коефіцієнта кореляції, що перевищує рівень 0.6, одну з змінних можна виключити з рівняння регресії. У даному випадку прийнято рішення не включати в регресійну модель, що формується, фактор  $X_3$ . Виходячи із викладеного вище, ставиться завдання формування чотирьох регресійних залежностей:

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{EC} &= b_{01} + b_{11}X_1 + b_{21}X_2, \\
\hat{Y}_{EH} &= b_{02} + b_{12}X_1 + b_{22}X_2, \\
\hat{Y}_{EFC} &= b_{03} + b_{13}X_1 + b_{23}X_2, \\
\hat{Y}_{EIH} &= b_{04} + b_{14}X_1 + b_{24}X_2.
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Тут,  $\hat{Y}_{EC}$ ,  $\hat{Y}_{EH}$ ,  $\hat{Y}_{EFC}$ ,  $\hat{Y}_{EIH}$  – оцінки математичних очікувань параметрів:

$\hat{Y}_{EC}$  – параметра  $E$  для технологічної лінії без валково-пальцевого грохоту,

$\hat{Y}_{EH}$  – параметра  $E$  для технологічної лінії з валково-пальцевим грохотом,

$\hat{Y}_{EFC}$  – параметра  $E_2$  для технологічної лінії без валково-пальцевого грохоту,

$\hat{Y}_{EIH}$  – параметра  $E_2$  для технологічної лінії з валково-пальцевим грохотом;

$b_{01}$ ,  $b_{02}$ ,  $b_{03}$ ,  $b_{04}$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{14}$ ,  $b_{21}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{24}$  – коефіцієнти регресійних залежностей.

Із (4.11) випливає, що у рівняннях задіяні одні і ті ж змінні (фактори  $X_1$  і  $X_2$ ), що мають істотний вплив як на ефективність збагачення  $E$ , так і на ефективність процесу грохочення  $E_2$ . Ці фактори в кар'єрних умовах роботи технологічної лінії відносяться до розряду некерованих (вірніше, важкокерованих, так як в принципі можливе створення умов для переробки сировини, що забезпечують задану концентрацію вапняку і задану вологість вихідного матеріалу. Однак створення таких «особливих» умов досить затратно). У лабораторних експериментах, де використовують обмежену масу вихідної сировини, управління параметрами  $X_1$  і  $X_2$  можливе, тобто їх слід розглядати як керовані параметри, що створює умови для проведення «активного» експерименту. У такому експерименті дослідник забезпечує

цілком конкретні розрахункові значення факторів, що впливають на функцію відгуку. У виконуваному дослідженні передбачається використання «активного» експерименту. Рівняння (4.11) не містять інших факторів (крім  $X_1$  і  $X_2$ ), що впливають на функцію відгуку. Передбачається, що в процесі проведення експериментів невраховані фактори будуть мати незмінні рівні (тобто будуть стабільними). Ця умова може бути здійснена, так як експеримент проводиться на макеті валково-пальцевого грохота, що має цілком певні (і незмінні при проведенні експерименту) конструктивні параметри. Важливо, щоб застосовані в лабораторних умовах режими переробки вихідної сировини могли бути реалізовані в технологічних лініях, що працюють у виробничих умовах.

Значення коефіцієнтів  $b_{ij}$  в регресійних залежностях (4.11) підлягають розрахунку. Визначення коефіцієнтів дозволить встановити зв'язок між факторами  $X_1$  і  $X_2$  та перерахованими функціями відгуку. Аналіз цих зв'язків дозволить оцінити рівні  $E$  і  $E_2$ , що досягаються в режимах роботи, характерних для некерованих у виробничих умовах чинників. Встановимо граничні значення можливих змін факторів  $X_1$  і  $X_2$ . Досвід видобутку сировини з різних укосів неоднорідних вапнякових родовищ свідчить про те, що процентний вміст вапняку у вихідній сировині коливається в межах  $\alpha = 50...80\%$ . При проведенні експериментальних досліджень отримані цифри, близькі до вказаних. Їх будемо вважати граничними значеннями варіації фактора  $\alpha = (51,43...78,73\%)$ . Вологість  $W$  (фактор  $X_2$ ) характеризує кліматичні умови переробки сировини. Низька вологість (6...7%) характерна для зовнішніх шарів при сонячній погоді. Внутрішні шари матеріалу розробляється скелі мають велику вологість. Уже при вологості 12% ефективність грохочення вапняку істотно знижується (часто до 30%), що загрожує зупинкою технологічної лінії. Таким чином, граничними значеннями фактора  $X_2$  будемо вважати вологості 6% і 12%. Ці значення збігаються з

лінійною частиною характеристики, наведеної на рис. 1.5, що також підтверджує прийнятність використання лінійних залежностей (4.11).

При визначенні в рівняннях регресії (4.11) коефіцієнтів  $b_{0j}$ ,  $b_{1j}$ ,  $b_{2j}$  може виявитися, що їх значення статистично залежні [105]. В результаті виникає невизначеність в оцінці цих коефіцієнтів, яка ускладнює фізичну інтерпретацію ступеня впливу незалежних факторів ( $X_1, X_2$ ) на функцію відгуку. Для виключення такої ситуації використовують ортогональне планування експерименту [104]. Використовуючи ортогональне планування, складемо план експерименту (табл.4.7).

Таблиця 4.7

План експерименту

№ дослідю	$X_0^*$	$X_1^*$	$X_2^*$	$Y_{EC}$	$Y_{EH}$	$Y_{EGC}$	$Y_{EGH}$
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	+	+	+	$Y_{EC4}$	$Y_{EH4}$	$Y_{EGC4}$	$Y_{EGH4}$

Обробку експериментальних даних будемо здійснювати в форматі, що використовує відносні значення чинників, величини яких обчислюють за формулами [102]:

$$X_1^* = \frac{X_1 - X_1^0}{\xi_1}, \quad X_2^* = \frac{X_2 - X_2^0}{\xi_2}. \quad (4.12)$$

Тут  $X_1^0$ ,  $X_2^0$  – значення факторів  $X_1, X_2$  на основному (нульовому) рівні;  $\xi_1, \xi_2$  – інтервали варіювання факторів  $X_1$  і  $X_2$ . Таким чином, верхні граничні



рівні факторів  $X_{1B}^* = X_{2B}^* = +1$ , а нижні  $X_{1H}^* = X_{2H}^* = -1$ , на нульовому рівні значення  $X_{10}^* = X_{20}^* = 0$ . Отримаємо:

$$\xi_1 = \left( \frac{78,73 - 51,43}{2} \right) = 13,65\% , \quad \xi_2 = \left( \frac{12 - 6}{2} \right) = 3\% , \quad X_1^0 = 65,08\% , \quad X_2^0 = 9\% .$$

Введення в формули (4.11) нових змінних ( $X_1^*$  і  $X_2^*$ ) призведе до відповідних змін коефіцієнтів рівнянь регресії  $b_{ij}$ . У плані експерименту відносні значення чинників  $X_1^*$  і  $X_2^*$  приймають граничні рівні (+1, -1). У табл.4.7 ці рівні позначені відповідно (+, -). План експерименту повинен включати також функції відгуку. Так як передбачається формування чотирьох регресійних залежностей, таблиця плану експерименту містить чотири стовпці, кожен із яких містить інформацію про відповідну змінну. Така форма представлення плану обумовлена тим, що одні й ті ж фактори ( $X_1^*$  і  $X_2^*$ ) використовуються в кожному із наведених рівнянь (4.11). Завдання спрощується тим, що межі варіювання факторів  $X_1^*$  і  $X_2^*$  в процесі моделювання також залишаються незмінними. Таким чином, виконується повний факторний експеримент типу « $2^2$ ». Кількість спостережень, необхідних для формування одного регресійного рівняння, дорівнює 4 (без урахування паралельних дослідів). Слід звернути увагу на те, що в кожному досліді можлива (технічно здійсненна) реєстрація двох функцій відгуку, що відповідають параметрам  $E$  і  $E_c$ . Тому загальна кількість спостережень скорочується в 2 рази і дорівнює 8 (без урахування паралельних дослідів).

Напишемо  $X$  – матрицю умов експерименту [104]:

$$X = \begin{bmatrix} + | & - | & - | \\ + | & + | & - | \\ + | & - | & + | \\ + | & + | & + | \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Кожний рядок цієї матриці задає умови проведеного експерименту. Матриця (4.13) є ортодоксальною, так як сума створкових добутків елементів будь-яких двох стовпців дорівнює нулю. Матриці значень функцій відгуку:

$$Y_{EC} = \begin{bmatrix} Y_{EC1} \\ Y_{EC2} \\ Y_{EC3} \\ Y_{EC4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 26,8 \\ 43 \\ 6,8 \\ 32,7 \end{bmatrix}, \quad Y_N = \begin{bmatrix} Y_{EH1} \\ Y_{EH2} \\ Y_{EH3} \\ Y_{EH4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31,35 \\ 52,2 \\ 18,9 \\ 51,9 \end{bmatrix},$$

$$Y_{EGC} = \begin{bmatrix} Y_{EGC1} \\ Y_{EGC2} \\ Y_{EGC3} \\ Y_{EGC4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 81,9 \\ 81,3 \\ 37 \\ 38,2 \end{bmatrix}, \quad Y_{EGH} = \begin{bmatrix} Y_{EGH1} \\ Y_{EGH2} \\ Y_{EGH3} \\ Y_{EGH4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 86 \\ 89,9 \\ 63 \\ 75,8 \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Матриці (4.14) складені зі значень функцій відгуку для кожної змінної рівнянь регресії (4.11). Чисельні значення змінних для матриць (4.14) отримані із табл. 4.8 в результаті усереднення значень функцій відгуку. Для отримання значень функцій відгуку (на макеті валково-пальцевого грохоту, описаному в розд.5) проведена серія експериментів відповідно до розглянутої методики їх планування. Використано матричний метод розрахунку коефіцієнтів регресійних залежностей.

Оцінки значень коефіцієнтів  $b_{ij}$  для кожного рівняння регресії (4.11) отримаємо з формул:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \begin{bmatrix} b_{01} \\ b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y_{EC}; & B_2 &= \begin{bmatrix} b_{02} \\ b_{12} \\ b_{22} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y_{EN}; \\
 B_3 &= \begin{bmatrix} b_{03} \\ b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y_{EGC}; & B_4 &= \begin{bmatrix} b_{04} \\ b_{14} \\ b_{24} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y_{EGH}. \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

В [40] показано, що для матриці  $X$ , заданої залежністю (4.13), матриця плану  $(X'X)^{-1}$  є діагональною матрицею і має вигляд:

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Елементи цієї матриці, які дорівнюють нулю, свідчать про статистичну незалежність коефіцієнтів  $b_{ij}$  у матрицях  $B_1, B_2, B_3, B_4$ , що дозволяє оцінювати вплив кожної незалежної змінної ( $X_1, X_2$ ) на значення функцій в рівняннях (4.11).

В результаті рішення матричних рівнянь (4.15) з урахуванням (4.14) на ЕОМ (див. додаток В) отримані наступні чисельні значення елементів матриць  $B_1, B_2, B_3, B_4$ :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 27,3 \\ 10,5 \\ -7,37 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 38,6 \\ 13,5 \\ -3,2 \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} 59,6 \\ 0,15 \\ -22 \end{bmatrix}, \quad B_4 = \begin{bmatrix} 78,8 \\ 4,05 \\ -9,15 \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Залишкові дисперсії для рівнянь (4.10) отримаємо з формул [104]:

$$S_{ocm1}^2 = n \left( \sum_{u=1}^4 Y_{ECu}^2 - 4 \sum_{i=0}^2 b_{i1}^2 \right), \quad S_{ocm2}^2 = n \left( \sum_{u=1}^4 Y_{ENu}^2 - 4 \sum_{i=0}^2 b_{i2}^2 \right),$$

$$S_{ocm3}^2 = n \left( \sum_{u=1}^4 Y_{EGCu}^2 - 4 \sum_{i=0}^2 b_{i3}^2 \right), \quad S_{ocm4}^2 = n \left( \sum_{u=1}^4 Y_{EGHu}^2 - 4 \sum_{i=0}^2 b_{i4}^2 \right). \quad (4.18)$$

Отримані наступні чисельні значення залишкових дисперсій (дисперсій адекватності):

$$S_{ocm1}^2 = 70,6; \quad S_{ocm2}^2 = 110,7; \quad S_{ocm3}^2 = 2,43; \quad S_{ocm4}^2 = 52,9.$$

Для оцінки дисперсій відтворюваності експериментів  $S_{\epsilon oc}^2$ , заданих планом їх виконання (табл.4.7), були проведені паралельні досліди в кількості  $n=3$ . Результати вимірювань відповідних функцій відгуку наведені в табл. 4.8.

У табл. 4.8 наведені також результати зіставлення розрахункових і табличних значень критерію Кохрена. Видно, що однорідність дисперсії виконується. Значення  $G_T$  отримано для кількості дослідів  $N = 4$  при виконанні паралельних дослідів  $n = 3$  ( $G_T = 0,77$ ).

Виходячи зі значень функції відгуку в паралельних дослідах [105] отримані наступні значення дисперсій відтворюваності для кожного з чотирьох рівнянь регресії (4.11):  $S_{\epsilon oc1}^2 = 16,45$ ;  $S_{\epsilon oc2}^2 = 21,1$ ;  $S_{\epsilon oc3}^2 = 0,928$ ;  $S_{\epsilon oc4}^2 = 10,82$ . При розрахунку цих параметрів використані залежності (4.2), (4.4).

Оцінимо значимість коефіцієнтів регресійних рівнянь (4.11). Для цього розрахуємо похибку визначення кожного коефіцієнта регресії [102]:

$$\begin{aligned} S(b_{01}) = S(b_{11}) = S(b_{21}) &= \sqrt{\frac{S_{\epsilon oc1}^2}{4n}} = 1,17; \\ S(b_{02}) = S(b_{12}) = S(b_{22}) &= \sqrt{\frac{S_{\epsilon oc2}^2}{4n}} = 1,33; \\ S(b_{03}) = S(b_{13}) = S(b_{23}) &= \sqrt{\frac{S_{\epsilon oc3}^2}{4n}} = 0,27; \\ S(b_{04}) = S(b_{14}) = S(b_{24}) &= \sqrt{\frac{S_{\epsilon oc4}^2}{4n}} = 0,949. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Таблиця 4.8

## Значення функцій відгуку в паралельних дослідах

Функції відгуку та їх значення в паралельних дослідах							
$Y_{EC1}$	23	$Y_{EN1}$	27,8	$Y_{EGC1}$	81	$Y_{EIH1}$	84
	29		29,9		81,9		88
	28,5		36,4		82,8		86
$Y_{EC2}$	39	$Y_{EN1}$	48	$Y_{EGC2}$	80	$Y_{EIH2}$	86
	47,7		55,6		81,7		93
	42,3		53		82,2		90,7
$Y_{EC3}$	4,8	$Y_{En1}$	17,9	$Y_{EGC3}$	35,8	$Y_{EIH3}$	61,5
	5,6		17,8		37,3		67
	10		21		38		62
$Y_{EC4}$	27,3		47,3	$Y_{EGC4}$	38,3	$Y_{EIH4}$	72,3
	37,8		48,7		38,7		74,7
	32,9		59,7		37,6		80,4
$G_P < G_T$		$G_P < G_T$		$G_P < G_T$		$G_P < G_T$	
0,419 < 0,77		0,54 < 0,77		0,35 < 0,77		0,39 < 0,77	

Знаходимо розрахункові значення  $t_p$  – критерію Стьюдента і зіставляємо його з табличними  $t_T = 2,3$  (при числі ступенів свободи  $S_{oc} - f = 8$  і 5% -му рівні значущості [102]):

$$\begin{aligned}
 t_{pi1} &= |b_{i1}| / S(b_{01}); & t_{pi2} &= |b_{i2}| / S(b_{02}); \\
 t_{pi3} &= |b_{i3}| / S(b_{03}); & t_{pi4} &= |b_{i4}| / S(b_{04}).
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Розрахункові значення критерію Стьюдента наведені в табл.4.9.

Видно, що для більшості значень  $t_p$  виконується умова  $t_p > t_T$ , тобто відповідні коефіцієнти  $b_{i1}$ ,  $b_{i2}$ ,  $b_{i3}$ ,  $b_{i4}$  у рівняннях (4.10) значимі. Виняток становить значення  $t_p = 0,55$ , отримане для коефіцієнта  $b_{13}$ .

Таблиця 4.9

Розрахункові значення  $t_p$ 

Коефіцієнт рівняння регресії	$b_{01}$	$b_{11}$	$b_{21}$	$b_{02}$	$b_{12}$	$b_{22}$
Значення $t_p$	23,3	8,97	6,3	29	10,15	2,4
Коефіцієнт рівняння регресії	$b_{03}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{04}$	$b_{14}$	$b_{24}$
Значення $t_p$	220	0,55	81,5	82,94	4,2	9,6

Тут  $t_p < t_T$ , тобто коефіцієнт  $b_{13}$  незначний і його можна виключити з рівняння регресії. З огляду на ортогональність матриці планування експерименту таке виключення коефіцієнта  $b_{13}$  із рівняння (4.10) не призведе до необхідності перерахунку інших коефіцієнтів.

Перевіримо гіпотезу адекватності отриманих рівнянь регресії (4.11). Знаходимо розрахункові значення  $F$  – критерію Фішера для кожного рівняння:

$$F_{p1} = \frac{S_{ocm1}^2}{S_{oc1}^2}; \quad F_{p2} = \frac{S_{ocm2}^2}{S_{oc2}^2}; \quad F_{p3} = \frac{S_{ocm3}^2}{S_{oc3}^2}; \quad F_{p4} = \frac{S_{ocm4}^2}{S_{oc4}^2}. \quad (4.21)$$

Табличне значення  $t_T$  – критерію при 5% рівні значущості і рівнях ступенів свободи для чисельників рівнянь (4.21) –  $f = 1$ , знаменників –  $f = 8$

склало  $F_T = 5,3$ . Результати зіставлення розрахункових значень із табличним наведені в табл.4.10.

Таким чином, адекватність лінійних рівнянь регресії (4.11) підтверджується.

Таблиця 4.10

## Перевірка адекватності рівнянь регресії

Розрахункові значення $F_p$	4,2	5,24	2,62	4,88
Табличне значення $F_T$	5,3	5,3	5,3	5,3
Результати зіставлення $F_p$ і $F_T$	4,2<5,3	5,24<5,3	2,62<5,3	4,88<5,3

Так як при розрахунку коефіцієнтів  $b_{ij}$  в рівнянні (4.11) використовувалися відносні значення змінних  $X_1$  і  $X_2$  (4.12), то в результаті переходу до їх реальних значень отримаємо наступні регресійні залежності:

$$\hat{Y}_{EC} = 27,3 + 10,5 \frac{X_1 - 65,08}{13,65} - 7,37 \frac{X_2 - 9}{3},$$

$$\hat{Y}_{EH} = 38,6 + 13,5 \frac{X_1 - 65,08}{13,65} - 3,2 \frac{X_2 - 9}{3},$$

$$\hat{Y}_{EGC} = 59,6 + 0,15 \frac{X_1 - 65,08}{13,65} - 22 \frac{X_2 - 9}{3},$$

(4.22)

$$\hat{Y}_{EHC} = 78,8 + 4,05 \frac{X_1 - 65,08}{13,65} - 9,15 \frac{X_2 - 9}{3}.$$

Виходячи з того, що коефіцієнти  $b_{ij}$  в рівняннях (4.11) визначалися із використанням ортогонального планування і є незалежними параметрами,

існує можливість оцінки впливу кожного з факторів ( $X_1$ ,  $X_2$ ) на відповідну функцію відгуку. Нагадаємо, що в процесі виконання експериментів досліджувані параметри вимірювалися в процентах. Будемо вважати, що значення  $X_1$  і  $X_2$  знаходяться на нульових рівнях  $X_1^0 = 65,08\%$ ,  $X_2^0 = 9\%$ . Цим значенням факторів відповідають числові значення функцій відгуку ( $\hat{Y}_{ECO}$ ,  $\hat{Y}_{EHO}$ ,  $\hat{Y}_{EGCO}$ ,  $\hat{Y}_{EGHO}$ ). При незмінному значенні  $X_2^0 = 9\%$  збільшимо значення  $X_1$  на 1% ( $X_1 = 66,08\%$ ) і розрахуємо відповідні значення функцій відгуку ( $\hat{Y}_{EC+}$ ,  $\hat{Y}_{EH+}$ ,  $\hat{Y}_{EGC+}$ ,  $\hat{Y}_{EGH+}$ ). Потім збільшимо значення  $X_2$  на 1% ( $X_2 = 10\%$ ) при незмінному значенні  $X_1^0 = 65,08\%$ . Отримаємо відповідні значення  $\hat{Y}_{EC++}$ ,  $\hat{Y}_{EH++}$ ,  $\hat{Y}_{EGC++}$ ,  $\hat{Y}_{EGH++}$ . Визначимо приріст функцій відгуку, пов'язаний з 1% -ою зміною факторів  $X_1$  і  $X_2$ . Результати розрахунків [%] представлені в табл. 4.11.

Таблиця 4.11

## Оцінка впливу факторів на функції відгуку

$\hat{Y}_{ECO}$	$\hat{Y}_{EC+}$	$\hat{Y}_{EC++}$	$(\hat{Y}_{EC+} - \hat{Y}_{ECO})$	$(\hat{Y}_{EC++} - \hat{Y}_{ECO})$
27,3	28,07	24,84	0,77	-2,46
$\hat{Y}_{EHO}$	$\hat{Y}_{EH+}$	$\hat{Y}_{EH++}$	$(\hat{Y}_{EH+} - \hat{Y}_{EHO})$	$(\hat{Y}_{EH++} - \hat{Y}_{EHO})$
38,6	39,59	37,5	0,99	-1,1
$\hat{Y}_{EGCO}$	$\hat{Y}_{EGC+}$	$\hat{Y}_{EGC++}$	$(\hat{Y}_{EGC+} - \hat{Y}_{EGCO})$	$(\hat{Y}_{EGC++} - \hat{Y}_{EGCO})$
59,6	59,61	52,26	0,01	-7,34
$\hat{Y}_{EGHO}$	$\hat{Y}_{EGH+}$	$\hat{Y}_{EGH++}$	$(\hat{Y}_{EGH+} - \hat{Y}_{EGHO})$	$(\hat{Y}_{EGH++} - \hat{Y}_{EGHO})$
78,8	79,1	75,75	0,3	-3,05

Із табл. 4.11 випливає, що 1% -ве збільшення вмісту вапняку у вихідному продукті  $\alpha$  призводить до збільшення показника ефективності збагачення  $E$ :

- в технологічній лінії без валково-пальцевого грохоту на 0,77%;
- в технологічній лінії з валково-пальцевим грохотом на 0,99%.

Аналогічне (1% -ве) збільшення вологості  $W$  вихідної сировини призводить до зниження показника  $E$ :



- в технологічній лінії без валково-пальцевого грохоту на 2,46%;
- в технологічній лінії з валково-пальцевим грохотом на 1,1%.

Одновідсоткове варіювання параметрів  $X_1$  і  $X_2$  призвело до наступних результатів зміни показника ефективності грохочення  $E_2$ . При збільшенні вмісту вапняку  $\alpha$  показник  $E_2$  збільшився:

- в технологічній лінії без валково-пальцевого грохоту на 0,01%;
- в технологічній лінії з валково-пальцевим грохотом на 0,3%.

Збільшення вологості  $W$  вихідної сировини супроводжується зниженням  $E_2$ :

- в технологічній лінії без валково-пальцевого грохоту на 7,34%;
- в технологічній лінії з валково-пальцевим грохотом на 3,05%.

Наведені цифри підтверджують той факт, що включення валково-пальцевого грохоту в технологічну лінію збагачення вапняку призводить до збільшення ефективності грохочення  $E_2$  і збагачення  $E$  (в зіставленні з аналогічними умовами переробки сировини в технологічній лінії, яка не містить цього пристрою).

Із табл. 4.11 видно, що ступінь впливу розглянутих факторів на показники  $E$ ,  $E_2$  різні. Більш виражений вплив має зміна вологості вапняку. Це особливо відчутно на варіації показника ефективності грохочення.

У табл. 4.12 наведені результати розрахунків функцій відгуку, що відповідають граничним значенням  $X_1$  і  $X_2$ . Виходячи їх того, що граничні значення факторів  $X_1$  і  $X_2$  були обрані з умови їх відповідності можливим рівням концентрації вапняку у вихідному продукті і його вологості, пов'язаної зі зміною погодних умов, відповідні значення функцій відгуку відображають можливі межі зміни відповідних параметрів ( $E_2$  та  $E$ ) в регресійних моделях (4.22). Із табл.4.12 видно, що при низькій вологості ефективність збагачення в технологічній лінії з валково-пальцевим грохотом може досягати 55%, що перевищує показник існуючої лінії.

Особливо відчутно це перевищення при підвищеній вологості ( $E$  досягає 50%). Це пояснюється тим, що якість надрешітного продукту

валкового грохоту підвищується внаслідок ряду факторів, зокрема відшарування глини від кусків гірської породи. При низькій вологості сировини ефективність грохочення існуючої і новоствореної (з валково-пальцевим грохотом) технологічних ліній відрізняються незначно.

Таблиця 4.12.

Функції відгуку при граничних значеннях факторів  $X_1$  і  $X_2$

Значення факторів $X_1$ и $X_2$	$X_1=51,43\%$ $X_2=6\%$		$X_1=51,43\%$ $X_2=12\%$		$X_1=78,73\%$ $X_2=6\%$		$X_1=78,73\%$ $X_2=12\%$			
	Значення функцій відгуку, %	$\hat{Y}_{EC}$	24,17	9,43	45,17	30,43	$\hat{Y}_{EH}$	28,3	21,9	55,3
	$\hat{Y}_{EIC}$	81,45	37,45	81,75	37,75	$\hat{Y}_{EIH}$	83,9	65,6	92	73,7

Підвищення вологості до її граничного значення призводить до істотного погіршення показника ефективності грохочення  $E_2$  і відповідного зменшення показника ефективності збагачення  $E$ . При цьому показник  $E_2$  у разі використання валково-пальцевого грохоту знижується в набагато меншому ступені, ніж в існуючій лінії. Це означає, що валково-пальцевий грохот здійснює стабілізуючу дію на показник ефективності  $E_2$ , що є важливим висновком, так як суттєво розширюються можливості використання технологічної лінії в умовах підвищеної вологості. Стабілізуюча дія валково-пальцевого грохоту пояснюється його конструктивними особливостями, що дозволяють здійснювати класифікацію сировини, використовуючи додатковий силовий вплив на частинки, що підлягають класифікації. Результати розрахунку, наведені в табл. 4.12, дозволяють оцінити граничні

значення  $E$ ,  $E_2$ , які можуть бути досягнуті в діючих технологічних лініях в умовах варіації некерованих параметрів, пов'язаних зі зміною умов видобутку вихідної сировини. Важливою перевагою створених регресійних моделей (4.22) є можливість отримання розрахункових показників  $E_2$ ,  $E$ , для довільних значень  $\alpha$  і вологості вихідної сировини  $W$  в межах їх граничних значень ( $X_1 = 51,43 \dots 78,73\%$ ;  $X_2 = 6 \dots 12\%$ ). На рис 4.1 показані залежності  $E$  ( $\alpha$ ,  $W$ ) для варіанта класифікації без валково-пальцевого грохоту 1 і з грохотом 2. Рис. 4.2 ілюструє залежності  $E_2$  ( $\alpha$ ,  $W$ ) для варіантів грохочення, що зіставляються. Графічні залежності спрощують процедуру розрахунку, створюють можливості для зіставлення отриманих показників ефективності.

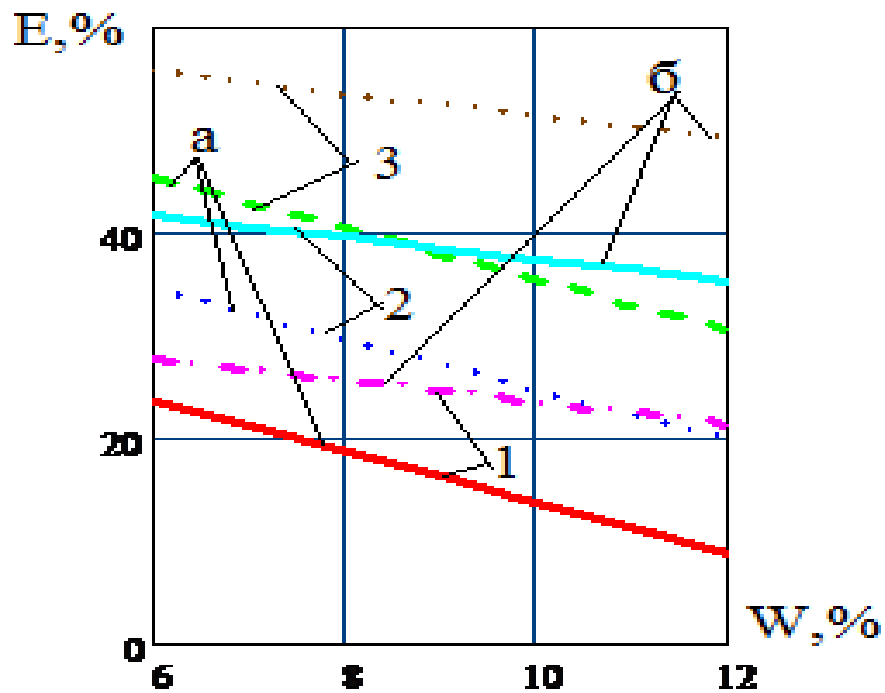


Рис. 4.1. Залежність ефективності збагачення  $E$  від змісту вапняку  $\alpha$  і вологості  $W$  (а – без валково-пальцевого грохоту; б – з грохотом; 1 –  $\alpha = 51\%$ , 2 –  $\alpha = 65\%$ , 3 –  $\alpha = 79\%$ ) вихідної сировини.

Із рис. 4.1 видно, що підвищення вологості у варіанті без використання валково-пальцевого грохоту призводить до більш значного зниження ефективності збагачення. Причому круте падіння показника  $E$  відбувається при різних вмістах вапняку у вихідній сировині.

Рис 4.2 підтверджує практичну відсутність залежності ефективності грохочення  $E_z$  від параметра  $\alpha$  в традиційному варіанті грохочення. При використанні валково-пальцевого грохоту така залежність спостерігається. Однак, ступінь відмінності розглянутих значень  $E_z$  невелика.

Слід врахувати, що отримані регресійні залежності відображають характер зв'язків, що існують між параметрами, для сировини Західно-Тягинського родовища. Зміна вихідних даних при формуванні моделей дозволить врахувати особливості конкретного родовища і відіб'ється на значеннях коефіцієнтів, що входять в рівняння (4.22).

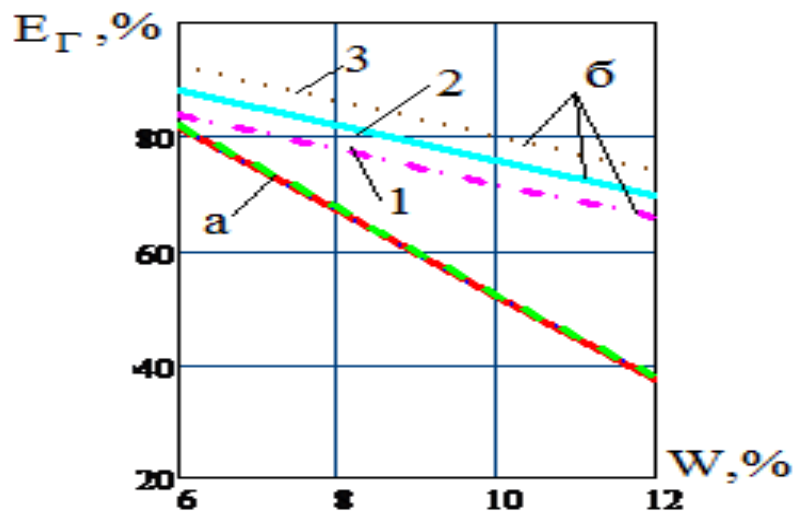


Рис. 4.2. Залежність  $E_z$  ( $\alpha$ ,  $W$ ) (а – без валково-пальцевого грохоту; б – з грохотом; 1 –  $\alpha = 51\%$ , 2 –  $\alpha = 65\%$ , 3 –  $\alpha = 79\%$ ).

#### 4.4. Висновки до розділу 4

1. Складність формування функціональних залежностей між змінними, що відображають ефективність процесів класифікації та збагачення, і факторами, які їх визначають, полягає в багатofакторності залежностей, складності їх математичного подання. Це ускладнює завдання аналізу, вносить невизначеність в процедуру формування вихідних даних. З цієї причини доцільне дослідження стохастичних зв'язків між змінними, зокрема, використання для цього регресійного аналізу.

2. Підтверджено гіпотезу про адекватність розроблених нелінійних однофакторних моделей, проте ступінь їх наближення до «ідеальної» моделі різна, що підтверджується також розташуванням експериментальних точок відносно значень змінних в рівняннях регресії. Розрахункові значення кореляційних відношень для моделей 1, 2, 3 склали відповідно  $\rho = 0,916$ ;  $0,998$ ;  $0,9970$ , що дозволяє зробити допущення про функціональність зв'язків між параметрами в регресійних залежностях 2, 3. Це спростило процедуру їх використання в узагальненій математичній моделі для розрахунку показника ефективності збагачення  $E$ .

3. В якості факторів створених лінійних регресійних моделей використані значення вмістів вапняку і вологості вихідного продукту, а в якості функцій відгуку – значення показників ефективності збагачення і грохочення сировини. Новизна запропонованих регресійних моделей полягає в обґрунтуванні введених в моделі змінних, меж їх зміни, що відповідають умовам експлуатації діючих технологічних ліній. Створення моделей і моделювання процесів класифікації дозволило підтвердити переваги валково-пальцевого грохоту.

4. Результати моделювання свідчать про те, що зміна вологості на 1% сировини  $W$  призводить до більшої зміни показників ефективності  $E$ ,  $E_2$ , ніж зміна змісту вапняку  $\alpha$  на 1% у вихідній сировині, тобто ступінь впливу факторів моделей на функції відгуку різна.

5. При збільшенні вологості сировини до 12% ефективність грохочення валково-пальцевого грохоту перевищує показник  $E_T$  для технологічної лінії без класифікатора цього типу на 30-35% (тобто збільшилася практично в 2 рази). Наявність валково-пальцевого грохоту сприяє стабілізації процесу класифікації вапняку, що супроводжується також підвищенням ефективності збагачення вапняку (на 10-20%).

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [114].

## **РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗМІСТУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ТА ГРОХОЧЕННЯ ВАПНЯКОВОЇ СИРОВИНИ**

### **5.1. Визначення особливостей проведення гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини**

Дослідження розд. 2 базуються на результатах гранулометричного та хімічного аналізів сировини Західно-Тягинського вапнякових родовища (табл.2.1). Ці аналізи виконані в лабораторних умовах кафедри збагачення НТУ «Дніпровська політехніка». Для їх проведення здійснено відбір проб сировини, визначено методику проведення експериментальних досліджень, виконана серія експериментів. Мета цього підрозділу роботи полягає в розкритті особливостей проведених експериментальних досліджень, обґрунтуванні їх змісту, оцінці достовірності отриманих результатів.

Родовища Херсонської області, а також ряд родовищ Західної України, характеризуються горизонтальним і пологим падінням пластів (2-6°), змінюваністю вапняків різних структур, високою неоднорідністю сировини за міцністю зі значними коливаннями її в межах від 6-7 МПа до 100-120 МПа, відносно невеликою потужністю пластів 10-30 м. Часто прошарки глини зустрічаються між шарами вапняку. Кількість слабких порід з міцністю на стискання меншою 20 МПа коливається від 5-20% до 30-40%. Неоднорідність родовищ, що пов'язана з міцністю сировини, обумовлена наявністю прошарків слабких вапняків і мергелистих порід, вивітрених порід у верхніх шарах, а також матеріалів, покриваючих окремі шари міцних порід [17]. Західно-Тягинське родовище є типовим представником таких неоднорідних вапнякових родовищ. На діючій ділянці кар'єра представлені осадові породи

неогенового і четвертинного віку. Корисна копалина представлена вапняками понтічного, меотічного, верхньосарматського віку. Загальна потужність уступів коливається від 3 до 5 м. Прошарки глинистих вапняків і глин, що залягають у верхній частині розрізу верхньосарматських покладів, віднесені до проміжного розкриття. Розкривні породи представлені ґрунтово-рослинним шаром, суглинками, глинами, плитчастими і зруйнованими раковино-детрітовими вапняками потужністю від 0,6 до 18,7 м, при середній потужності 4,97 м. Відбір сировини цього родовища для проведення експериментальних досліджень виконано наступним чином. У період відбору сировини на території кар'єру здійснювалася переробка вапняку технологічною лінією, схема якої була приведена в розд.1 (рис. 1.1). Проби відібрані з конвеєра, що змішує продукти дроблення щічної дробарки і колосникового грохоту з розміром колосників 80 мм. Ставилося завдання отримання представницької проби 0-80 мм. Мінімальна маса проби (320 кг) розрахована за формулою Г.О. Чечотта [99]:

$$M = k\theta^\lambda, \quad (5.1)$$

де  $\theta$  – максимальний розмір зерен, що входять у пробу, мм;  $k$  – коефіцієнт, що залежить від характеристики матеріалу і допустимого ступеня похибки;  $\lambda$  – показник ступеня, що відображає вплив на масу проби її гранулометричної характеристики.

Виходячи із загальної маси проби в різний час доби і з різних робочих горизонтів були взяті три її складові масою по 120 кг. Це забезпечило необхідну наочність загальної проби. Надалі із загальної маси 360 кг шляхом її послідовного скорочення отримана усереднена проба  $Q = 120$  кг з класом крупності 0-80 мм. Більші частинки були відпрацьовані вручну. Основна мета відбору усередненої проби полягала в подальшому визначенні класів

крупності вихідного матеріалу, оцінці вмісту цільового компонента – кальциту і супутніх нецільових компонентів. Клас крупності 0-80 мм додатково усереднювався, скорочувався і ділився пробовідділювачем на дві однакові за масою проби для проведення наступних випробувань. Відбір вапнякової маси проводився відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-71 (ГОСТ 8269.0):

- мінімальна проба 1 масою  $Q = 20$  кг призначена для гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини родовища (див. розд.2);

- мінімальна проба 2 масою  $Q = 20$  кг призначена для аналогічних аналізів сировини, переробленої валково-пальцевим грохотом (підрозд. 5.2).

Гранулометричний аналіз передбачає виділення певних класів крупності частинок. Необхідність його проведення пов'язана з тим, що в кожному класі крупності міститься різна кількість вапняку. Так як завдання дослідження (в розд.2) полягало у встановленні залежності між розміром частинок і вмістом  $\text{CaCO}_3$ , результати гранулометричного аналізу необхідно було доповнити результатами хімічного аналізу. Суть проведеного хімічного аналізу складалася у відділенні вапняку від глини. В лабораторних умовах гранулометричний аналіз був здійснений ситовим аналізом досліджуваного матеріалу, а хімічний аналіз здійснювався промиванням матеріалу (відділенням глинистих частинок від кусків вапняку в різних класах крупності).

Зупинимося на методиці проведення гранулометричного аналізу вихідної сировини. Для підвищення достовірності результатів аналізу виконано кілька паралельних дослідів ( $n = 3$ ). З цією метою з мінімальної проби 1 шляхом квантування і подальшого усереднення були отримані три проби вагою 2,2 кг. Кожна проба просіювалась на лабораторних ситах з розмірами отворів сита – 40,0 мм, 20,0 мм, 10,0 мм, 7,0 мм, 5,0 мм, 2,0 мм і 0,8 мм. Просіювання здійснювалося при природній вологості  $W = 6-8\%$ . Усі вузькі класи крупності були зважені на аналітичних вагах.



Для цього використані:

- настільні гирьові та циферблатні ваги (ГОСТ 24104) [88] з точністю вимірювання 0,5 г;
- ваги аналітичні (точність зважування 0,0005 г).

Результати зважування в паралельних дослідах були усереднені і занесені в стовпець «Вага навіски» (табл.2.1). Звідси отримані значення  $\gamma_i$  і  $\sum \gamma_i$ . Проведення хімічного аналізу полягало в промиванні кожного вузького класу крупності частинок за класом 0,05 мм з виділенням супутніх компонентів (переважно глинистих частинок і частинок піску), розмір яких був меншим 50 мкм. Після відмулювання підрешітного класу і зневоднення надрешітного класу обидва отримані продукти були висушені в духовці типу СНОЛ при температурі 110 ° С протягом 2 годин. Після просушування всі класи перебували в приміщенні протягом доби при природній вологості 6%. Результати зважування складових паралельних дослідів були усереднені і занесені в табл. 2.1. Таким чином, табл. 2.1 об'єднала результати гранулометричного та хімічного аналізів вихідної сировини. Вона стала основою для проведення регресійного аналізу зв'язку між розміром частинок і вмістом вапняку, обґрунтування подальших дій зі збагачення вихідної сировини. Наглядне уявлення про результати гранулометричного та хімічного аналізів дає рис. 5.1. Із діаграми видно, що вагові показники більших класів крупності мають перевагу. Із ростом крупності частинок зростає процентний вміст вапняку. Вміст супутніх компонентів  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  дещо зростає в дрібних класах крупності.

Важливим моментом дослідження є вимірювання вологості продукту. Це обумовлено тим, що значення вологості  $W$  значною мірою визначає властивості матеріалу, що підлягає переробці. Вона суттєво впливає на ефективність грохочення. Зупинимось на загальній методиці вимірювання вологості, яку автор використовував у процесі проведення експериментальних досліджень.

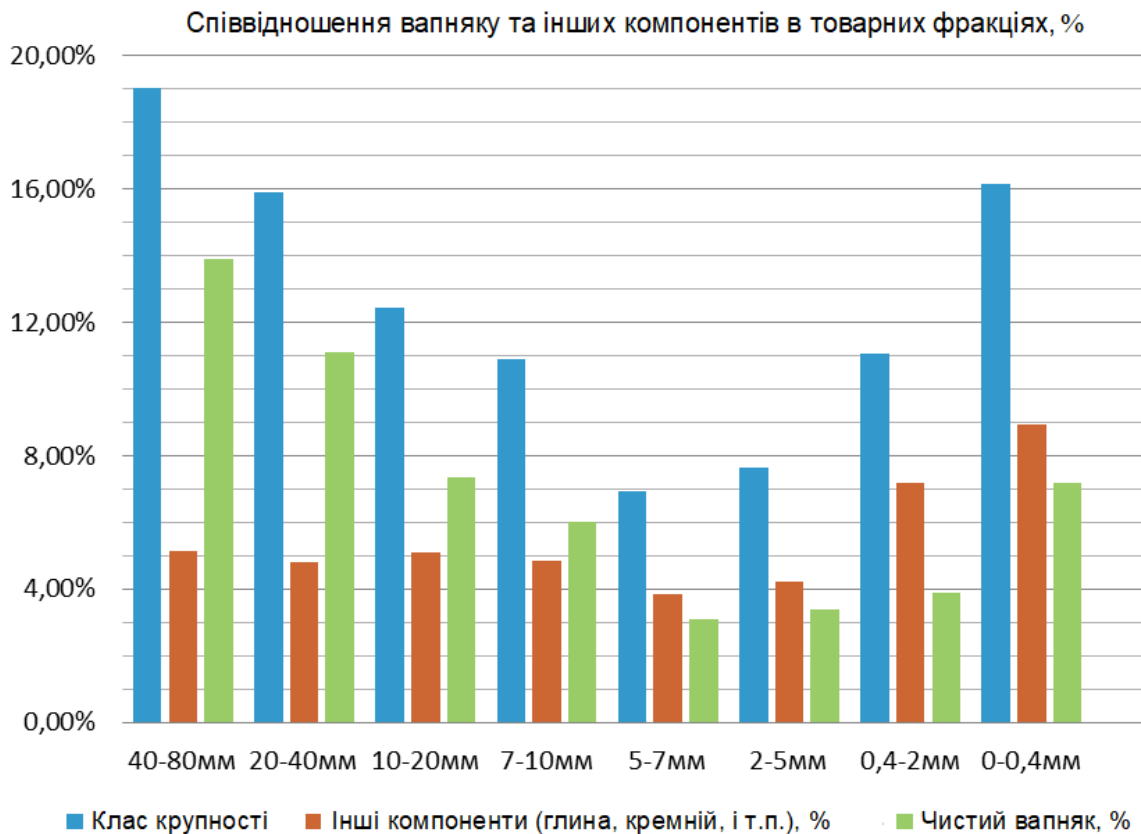


Рис.5.1. Діаграма, що відображає співвідношення кальциту і супутніх компонентів у типових товарних класах крупності.

Для вимірювання вологості згідно ДСТУ Б.В.2.7-109-2001 відбиралися дві проби масою по 0,5 кг. Відбір проб здійснювався вручну таким чином, щоб була можливість аналізувати окремо вологість вапняку і супутніх компонентів. У процесі відбору проб були виявлені тріщинуваті частинки – «зростки», які при виконанні цієї операції були зруйновані. Після зважування відібрані проби матеріалу на піддонах переміщалися в піч і витримувалися там при температурі  $t_1 = 110\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1 години, а потім проби охолоджувалися до температури  $t_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$  в проміжку часу 30 хвилин. Розрахунок вологості здійснюється за формулою [87]:

$$W = \frac{G - G_1}{G_1}, \quad (5.2)$$

де  $G$  – маса проби в стані природної вологості, г;

$G_1$  – маса проби у висушеному стані, г.

Усереднені (з двох проб) результати вимірювання мас окремих класів крупності матеріалу для визначення його вологості представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

## Маси вапняку і супутніх компонентів

Клас крупності, мм	Маса, вихідного продукту, г			Маса після сушки при $t_1 = 110^\circ\text{C}$ , г			Маса після охолодження при $t_2 = 15^\circ\text{C}$ , г		
	чистий вапняк	глин. комп.	зростки	чистий вапняк	глин. комп.	зростки	чистий вапняк	глин. комп.	зростки
10-20	70,61	60,62	0,00	63,61	50,87	0,00	63,67	50,99	0,00
7-10	32,69	27,94	0,00	30,38	23,88	0,00	30,45	23,97	0,00
5-7	11,15	16,96	0,00	10,11	13,99	0,00	10,15	14,04	0,00
2-5	4,44	6,32	0,00	4,11	5,46	0,00	4,12	5,48	0,00
0,4-2	0,00	0,00	126,07	0,00	0,00	112,18	0,00	0,00	112,43
0-0,4	0,00	0,00	52,01	0,00	0,00	47,11	0,00	0,00	47,21
Разом	408,79			361,68			362,50		

Застосовуючи залежність (5.2), отримані наступні значення вологості:  $W_1$  – вологість матеріалу без витримки часу після нагрівання і  $W_2$  – вологість з 30-хвилинною витримкою на охолодження. Результати розрахунків наведені в табл.5.2. З табл. 5.2 видно, що супутні компоненти при рівних умовах охолодження втрачають вологу повільніше, ніж це відбувається з вапняком. Це означає, що втрата вологи матеріалом при сонячній погоді відбувається швидше у варіанті з мінімальною кількістю глинистих частинок. Цим

підтверджується доцільність виключення глинистих компонентів зі складу сировини, що переробляється, на ранній стадії процесу збагачення.

Дослідження, результати яких викладені в розд. 3, свідчать про доцільність використання валково-пальцевих грохотів у технологічних лініях збагачення вапняку.

Таблиця 5.2

Вологість складових вапнякової сировини в окремих класах крупності

Клас крупності, мм	Вологість $W_1, \%$			Вологість $W_2$ , при $t_2=15^\circ\text{C}, \%$		
	чистий вапняк	глин. комп	зростки	чистий вапняк	глин. комп	зростки
10-20	11,00	19,17	0,00	0,09	0,24	0,00
7-10	7,58	17,00	0,00	0,23	0,38	0,00
5-7	10,29	21,27	0,00	0,38	0,37	0,00
2-5	8,08	15,76	0,00%	0,29	0,37	0,00
0,4-2	0,00	0,00	12,3	0,00	0,00	0,23
0-0,4	0,00	0,00	10,40	0,00	0,00	0,21

## 5.2. Розробка експериментального зразка валково-пальцевого грохота

Проведені теоретичні дослідження склали основу для реалізації експериментального зразка грохота для наступного проведення серії експериментів, що підтверджують його ефективність при грохоченні вихідної сировини Західно-Тягинського родовища. Цей підрозділ роботи відображає особливості конструктивного виконання експериментального зразка, режими його роботи при проведенні експериментів. З огляду на факт, що експерименти проводилися в лабораторних умовах, наведені в цьому підрозділі дані дозволять оцінити прийнятність використаних тут режимів

роботи установки в промислових умовах, можливість реалізації близьких до отриманих значень показників ефективності збагачення та грохочення в діючих технологічних лініях.

Конструктивно (рис.5.2) експериментальний зразок валково-пальцевого грохоту складається із короба 1, в якому горизонтально розташовані валки 2. На сталевих валках 2 закріплені чотирьопальцеві фігурні диски 3, виконані з поліуретану. Між ними розташовані поліуретанові циліндричні елементи футерування валків 4. Діаметр валків – 20 мм, відстань між ними – 28 мм, висота зубів  $h = 7$  мм, загальна кількість валків в грохоті – 4 одиниці.

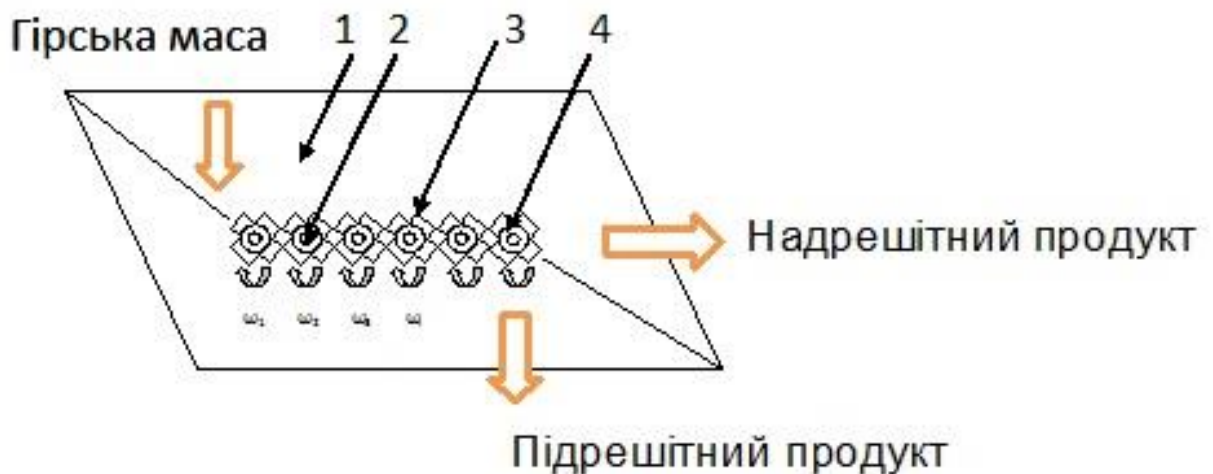


Рис.5.2. Експериментальний зразок грохоту.

У перетині поліуретанові кільця дисків мають форму еліпса. Наведені вище елементи конструктивного виконання грохоту реалізують отриману в розд.2 оптимальну крупність розділення частинок  $d_{opt} = 7$  мм, еліптичну форму пальців диска, кількість яких відповідає дослідженням і рекомендаціям, отриманим в розд.3. Це створює сприятливі умови для перевірки достовірності результатів теоретичних досліджень безпосередньо в процесі проведення експериментів.

Диски грохоту обертаються в одну сторону із постійною швидкістю обертання  $\omega = 240$  об./хв. При виборі швидкості автор орієнтувався на її

значення, близьке до використовуваного в грохотах промислового виконання [79]. Узгодження кількості обертів використаного двигуна постійного струму (Dynamo (Sliven) mod. РІК12-3/10-3) зі швидкістю обертання валків грохоту здійснювалося шляхом зміни коефіцієнта перетворення використаної пасової передачі. Двигун постійного струму отримував живлення від випрямляча, увімкненого в мережу змінного струму. Потужність двигуна ( $P=30$  Вт) виявилася достатньою для приведення механізмів грохоту в дію. Ширина грохоту дорівнює 120 мм, а довжина його активної частини склала 400 мм. Ясно, що такі розміри грохоту далекі від реалізованих варіантів промислового виконання. Тому при виконанні експериментів процедура грохочення проб матеріалу полягала в періодичному багаторазовому грохоченні одного і того ж навішування. Загальна кількість повторень процесу прийнята рівною 10, що за характером впливу відповідає дії на матеріал грохоту, який має довжину 4 м. Тривалість процесу грохочення проби масою 2,2 кг склала 6,5 секунд, що відповідає середньому часу грохочення матеріалу у валкових грохотах промислового виконання. З огляду на той факт, що висота пальців диска становить 7 мм, а крупність матеріалу, що підлягає грохоченню дорівнює 0-80 мм, активному впливу пальців піддалися нижні шари матеріалу. Верхні шари з більш крупними частинками вапняку і порівняно низьким вмістом глинистих включень переміщалися по поверхні насипання і практично не піддавалися додатковій переробці. Цей факт знижує витрати енергії на грохочення матеріалу, зосереджуючи вплив пальців на зону максимальної концентрації глиномістких частинок. Вплив сприяє інтенсивному відділенню глинистих покриттів і переведенню дрібної фракції, яка утворилася, в підгратний простір грохоту, що підтверджується результатами аналізів, викладеними в наступному підрозділі. Нахил короба грохота при проведенні експериментів залишався незмінним і рівним  $\alpha_{\text{прох}} = 0$ . Переміщення шарів матеріалу здійснювалося як під дією сили тяжіння, так і завдяки односторонньому обертальному руху пальців грохоту.

При виконанні експериментів автор прагнув забезпечити режими роботи установки, прийнятні для їх використання в діючих технологічних лініях збагачення вапняку. При цьому важливо забезпечити продуктивність установки, що поєднується з продуктивністю технологічної лінії. Оскільки в діючих лініях продуктивність обчислюється десятками тон, то аналогічні цифри продуктивності повинні бути забезпечені і при грохочені сировини. Якщо довжина грохоту у варіанті промислового використання складе 4 м, а його ширина буде рівною 1200 мм, то реалізація вище викладених режимів переробки сировини забезпечить продуктивність грохоту  $G = 218,5$  т/год. Фото експериментального зразка валково-пальцевого грохота наведено на рис.5.3.



Рис.5.3. Фотографії експериментального зразка грохота.

Проведення експериментальних досліджень передбачає їх планування. Таке планування здійснено в розд.4 дисертаційної роботи. Автор вважає за необхідне розкрити особливості проведення цих досліджень з використанням розробленого зразка грохоту, викласти механізм отримання вихідних даних, які були застосовані в багатофакторних регресійних моделях (розд.4). Цьому присвячені наступні підрозділи роботи.

### 5.3. Отримання та аналіз експериментальних даних для побудови багатофакторних регресійних моделей

Регресійний аналіз базується на результатах експериментальних досліджень. Метод планування експерименту, реалізований в розд. 4 дисертації, передбачає визначення чисельних значень факторів  $X_1$  і  $X_2$ , що мають істотний вплив на значення функцій відгуку  $Y_{EC}$ ,  $Y_{EN}$ ,  $Y_{EGC}$ ,  $Y_{EGN}$ . Такими факторами прийняті значення вмісту вапняку  $\alpha$  в матеріалі, що переробляється (параметр  $X_1$ ) і значення вологості матеріалу  $W$  (параметр  $X_2$ ). Визначено межі зміни цих параметрів. Так як підхід до визначення вмісту вапняку в пробі передбачає виконання ряду дій, пов'язаних з його відділенням від глинистих добавок, то створення проби з наперед заданими значеннями  $\alpha$  практично неможливо. З огляду на існуючу залежність між розміром частинок і вмістом в них вапняку, для проведення експериментів були використані укрупнені та замільчені навішування. Ясно, що укрупнене навішування мало матеріал з підвищеним  $\alpha$ , а замільчене – із заниженим значенням. Таким чином, обидва навішування представляли собою матеріали, що мають граничні (максимальне і мінімальне) значення, реалізовані в регресійних моделях. Бажано, щоб укрупнене і замільчене навішування відбивали можливі граничні рівні зміни  $\alpha$  у вихідній сировині конкретного родовища. Це дозволить у створених регресійних моделях здійснювати аналіз показників збагачення, грохочення при проміжних значеннях  $\alpha$ , що знаходяться між мінімальним і максимальним рівнями.

Зміна вологості продукту здійснювалася додаванням води у висушену пробу. Після додавання води навішування ретельно перемішувалося до однорідного характеру гірської маси. Кількість води, що додається, визначала процентний вміст вологи в матеріалі. Таким чином, були реалізовані граничні значення показників вологості, прийняті в задачі регресійного аналізу (6% і



12%). Так як значення вологості матеріалу залежить від маси води, що додається у навішування, то реалізація наперед заданих значень вологості в лабораторних умовах досягалася із досить високою точністю.

Для розрахунку значень функцій відгуку в табл.4.7 виникла необхідність проведення гранулометричного та хімічного аналізів проб матеріалу. Прийнятий підхід до проведення аналізів нічим не відрізнявся від викладеного в розділі 5.1. При цьому аналізувався вміст вапняку в надрешітному і підрешітному продуктах ( $\beta, \%$ ), відповідні виходи цих продуктів ( $\gamma, \%$ ), вилучення ( $\epsilon, \%$ ). Розраховувався вміст вапняку у вихідному продукті ( $\alpha, \%$ ). Розрахунок цих показників виходячи із результатів зважування дозволив розрахунковим шляхом визначати значення ефективності збагачення  $E$  (значення  $Y_{EC}, Y_{EN}$  в табл. 4.7). Визначення у процесі проведення дослідів маси підрешітного продукту, а також маси частинок цього класу у вихідному продукті дозволило розрахувати значення показників ефективності грохочення  $E_2$  (значення  $Y_{EGC}, Y_{EGN}$ ) в табл. 4.7. Для підвищення достовірності результатів моделювання були виконані паралельні досліди ( $n = 3$ ). Відповідні значення функцій відгуку, наведені в табл. 4.7, являють собою результат усереднення даних в трьох паралельних дослідах.

Необхідність створення декількох багатофакторних регресійних моделей (4.11) була визначена постановкою завдання дослідження, яка передбачала зіставлення результатів збагачення і грохочення матеріалу в двох режимах: без валково-пальцевого грохоту і в разі його застосування. Отримані в результаті рішення цієї задачі регресійні залежності (4.11) дозволили виконати запланований порівняльний аналіз. Це стало можливим завдяки тому, що при проведенні експериментів значення факторів  $X_1$  і  $X_2$  при реєстрації значень функцій відгуку  $Y_{EC}, Y_{EN}, Y_{EGC}, Y_{EGN}$ , повторювалися в різних дослідах і це виключало різне трактування отриманих результатів. План проведення експериментів представлений в табл. 4.7. Видно, що при їх

проведенні розглядалися різні комбінації чинників  $X_1$  і  $X_2$ . У правій частині табл.4.7 реєструвалися значення функцій відгуку, що відповідають варіантам відсутності або наявності валково-пальцевого грохоту. Експериментальні дослідження проводилися в наступній послідовності:

- були підготовлені «закрупнені» навішування зі значним вмістом вапняку. Для цього вручну відбиралися більші куски гірської породи;

- були підготовлені «замільчені» навішування, що містять дрібні фракції вихідної сировини із порівняно низьким вмістом вапняку. Відбір навішувань також здійснювався вручну. При цьому прагнули забезпечити близький гранулометричний склад окремих проб;

- шляхом додавання води в необхідній кількості забезпечувалася задана планом експерименту вологість вихідного продукту (6% і 12%);

- у варіанті випробувань без використання валково-пальцевого грохоту навішування просівали через сито із розміром отворів 7 мм. Результати класифікації вихідної сировини за класами 0-7 мм і 7-80 мм зважувалися;

- випробування «з використанням валково-пальцевого грохоту» проводилися аналогічно варіанту «без грохоту», однак класифікація частинок зазначених вище крупностей здійснювалася експериментальним зразком валково-пальцевого грохоту. Процедура класифікації матеріалів проб викладена в підрозд.5.2. Отримані надрешітний і підрешітний продукти грохочення зважувалися;

- виконувався аналіз вмісту вапняку у виділених класах 0-7 мм і 7-80 мм, а також у вихідній сировині ( $\alpha$ ). Використана методика проведення хімічного аналізу раніше викладена в підрозд.5.1. Результати відділення вапняку від супутніх частинок зважувалися;

- виходячи із результатів гранулометричного і хімічного аналізів здійснювався розрахунок показників ефективності збагачення і грохочення з використанням залежностей (2.4) і (2.6). Результати проведених експериментальних досліджень із крупненими навішеннями представлені в

табл.5.3. Із табл. 5.3 видно, що при використанні валково-пальцевого грохоту спостерігається збільшення маси підрешітного продукту (в зіставленні з варіантом без грохоту). Збільшення відбувається за рахунок зростання маси глинистих добавок і дрібних частинок вапняку. Причому у варіанті із підвищеною вологістю вихідного продукту таке збільшення більш відчутно (в два рази). Це підтверджує той факт, що обдирання нашарувань з частинок гірської породи завдяки впливу пальців грохота відбувається і що дрібні частинки глини, вапняку, які утворилися, переходять в подрешітну область грохоту.

Дані табл.5.4 свідчать про те, що при низькій вологості замільченого навішування ефект збільшення маси підрешітного продукту при використанні грохоту виражений несуттєво. Це обумовлено зокрема тим, що в «сухому» стані обдирання нашарувань з частинок гірської породи утруднено внаслідок їх підвищеної міцності. Збільшення вологості навішування до 12% призводить до зниження цієї міцності, що супроводжується збільшенням маси дрібних частинок у підрешітному продукті. Збільшення маси, виходячи із комплексної дії ряду позитивних факторів, склало 1,75 рази (за даними табл.5.4).

Прояв ефекту сепарації частинок у запропонованій конструкції валково-пальцевого грохоту є важливим аргументом його використання в технологічних лініях збагачення вапняків. Із табл.5.3 і 5.4 слідує, що показники процентного вмісту вапняку як закрупнених, так і замільчених навішувань дещо відрізняються.

Це обумовлено викладеною вище процедурою формування цих навішувань, яка не дозволяє в практиці отримати однакові значення  $\alpha$  в різних пробах. Однак, із таблиць видно, що вдалося отримати близькі значення параметра  $\alpha$  (79,26% і 77,21% – в табл.5.4; 51,91% і 50,96% – в табл.5.5).

Тому при формуванні граничних значень параметра  $X_1$  в підрозд. 4.3 були використані середні значення параметра  $\alpha$ , отримані із цих таблиць. Наведені в таблицях значення  $E$  і  $E_r$  були використані як вихідні дані для

побудови регресійних моделей (4.11). Аналіз результатів моделювання виконано в розд.4.

Таблиця 5.3

## Дослідження із закрупненими навісками

Закрупнена навіска					V		в				
Інерційний грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід γ, %	Сумм. вихід γ, %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність E <sub>г</sub> , %	Ефективність E, %	
		7-80 мм	762	56	93	58,47%	100,00%	89,79%	68,00%	81,28%	43,00%
	0-7 мм	385	0	262	41,53%	41,53%	59,51%	32,00%			
Вологість W=6%		1147	56	355	1558			100,00%			
Загальний вміст вапняку, %		77,21%									
Валково-пальцевий грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід γ, %	Сумм. вихід γ, %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність E <sub>г</sub> , %	Ефективність E, %	
		7-80 мм	950	36	41	59,99%	100,00%	96,01%	72,66%	89,90%	52,20%
	0-7 мм	371	0	314	40,01%	40,01%	54,16%	27,34%			
Вологість W=6%		1321	36	355	1712			100,00%			
Загальний вміст вапняку, %		79,26%									
Інерційний грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід γ, %	Сумм. вихід γ, %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність E <sub>г</sub> , %	Ефективність E, %	
		7-80 мм	955	256	212	83,12%	100,00%	85,10%	89,24%	38,18%	32,70%
	0-7 мм	146	0	143	16,88%	16,88%	50,52%	10,76%			
Вологість W=12%		1101	256	355	1712			100,00%			
Загальний вміст вапняку, %		79,26%									
Валково-пальцевий грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід γ, %	Сумм. вихід γ, %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність E <sub>г</sub> , %	Ефективність E, %	
		7-80 мм	950	96	88	66,24%	100,00%	92,24%	77,08%	75,85%	51,90%
	0-7 мм	311	0	267	33,76%	33,76%	53,81%	22,92%			
Вологість W=12%		1261	96	355	1712			100,00%			
Загальний вміст вапняку, %		79,26%									

Результати досліджень із замільченими навісками наведені в табл.5.4.

Результати експериментальних досліджень, що наведені у табл.5.3 та 5.4 свідчать про достатньо високу ефективність роботи валково-пальцевого грохоту.

Ці результати зумовлені дією цілого комплексу факторів і пов'язані із особливостями конструктивного виконання грохоту. При комплексній дії окремих чинників важливо визначити вплив на результати класифікації

фактора, що пов'язаний із відокремленням глинистих покриттів від кусків гірської породи. Дія цього чинника визначена в прийнятій у дисертаційній роботі концепції збагачення. Автором запропоновано підхід до визначення ефективності такої дії. Підхід полягає у тому, щоб зафіксувати втрату маси частинками матеріалу в процесі обробки сировини валково-пальцевим грохотом. Ця втрата зумовлена відокремленням глинистих покриттів від куска гірської породи. Для реалізації підходу із загальної маси сировини вологістю 6%, що полягає переробці, відібрано 10 частинок. Крупність частинок – біля 10 мм (рис.5.4).

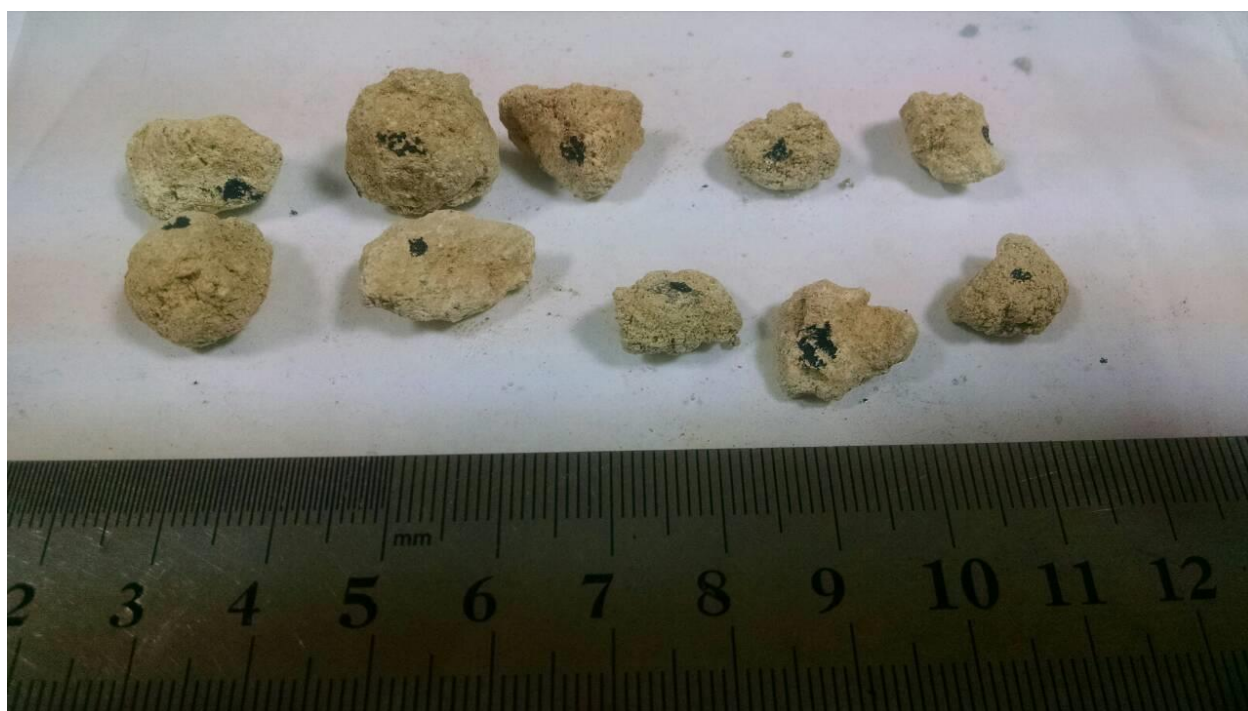


Рис.5.4. Відібрані частинки матеріалу.

Частинки такої крупності підпадають під активну дію пальців грохоту і, відповідно, повинні мати виражений ефект відокремлення глинистих покриттів. Частинки отримали мітки у вигляді точок, виконаних фарбою, та була зафіксована вага кожної із них.

Частинки були змішані з матеріалом проби вологістю 6%, що має масу 1,2 кг. Далі здійснювалася переробка проби сировини у валково-пальцевому грохоті у відповідності до методики, викладеної вище у підрозділі 5.1.

Таблиця 5.4

## Результати досліджень із замільченими навісками

Замільчена навіска					V		В			
Інерційний грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід $\gamma$ , %	Сумм. вихід $\gamma$ , %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність Е <sub>г</sub> , %	Ефективність Е, %
		7-80 мм	348	23	165	38,64%	100,00%	69,22%	51,53%	81,91%
0-7 мм	349	0	502	61,36%	61,36%	41,01%	48,47%			
Вологість W=6%		697	23	667	1387			100,00%		
Загальний вміст вапняку, %		51,91%								
Валково-пальцевий грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід $\gamma$ , %	Сумм. вихід $\gamma$ , %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність Е <sub>г</sub> , %	Ефективність Е, %
		7-80 мм	342	19	130	34,90%	100,00%	73,52%	50,35%	86,01%
0-7 мм	356	0	560	65,10%	65,10%	38,86%	49,65%			
Вологість W=6%		698	19	690	1407			100,00%		
Загальний вміст вапняку, %		50,96%								
Інерційний грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід $\gamma$ , %	Сумм. вихід $\gamma$ , %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність Е <sub>г</sub> , %	Ефективність Е, %
		7-80 мм	348	196	458	72,24%	100,00%	54,29%	75,56%	37,05%
0-7 мм	176	0	209	27,76%	27,76%	45,71%	24,44%			
Вологість W=12%		524	196	667	1387			100,00%		
Загальний вміст вапняку, %		51,91%								
Валково-пальцевий грохіт		Вапняк більше 7 мм, г	Вапняк менше 7 мм, г	Глина - 0,04 мм	Част. вихід $\gamma$ , %	Сумм. вихід $\gamma$ , %	Вміст вапняку, %	Вилучення, %	Ефективність Е <sub>г</sub> , %	Ефективність Е, %
		7-80 мм	342	97	292	51,95%	100,00%	60,05%	61,23%	63,47%
0-7 мм	278	0	398	48,05%	48,05%	41,12%	38,77%			
Вологість W=12%		620	97	690	1407			100,00%		
Загальний вміст вапняку, %		50,96%								

Потім частинки були відокремлені від матеріалу проби і звішувалися. Фіксувалася зміна маси кожної частинки, яка зумовлена процесом переробки сировини вологістю  $W = 6\%$ . Так як відібрані частинки мали різну масу, то абсолютні значення зміни маси ( $\Gamma$ ) були віднесені до маси частинки і результати (відносні значення) виражені у відсотках (%). Далі частинки знову були змішані з матеріалом проби і вологість цього матеріалу була доведена до

12%. Здійснювалась наступна переробка проби у валково-пальцевому грохоті при вологості матеріалу 12%. Процес зважування частинок повторювався. Фіксувалися абсолютні та відносні значення зміни їх маси. Результати виконаних дослідів представлено у табл.5.5. та 5.6.

Таблиця 5.5

## Зміна маси частинок при вологості сировини 6%

П/номер частинки	Маса частинки матеріалу, г	Маса частинки після грохочення, г	Відносне значення зміни маси (%)
1	0,9828	0,8934	9,10
2	0,9424	0,8670	8,00
3	1,5748	1,4834	5,80
4	1,0315	0,9500	7,90
5	1,1495	1,0725	6,70
6	1,9218	1,8065	6,00
7	2,1720	1,9114	12,00
8	2,5113	2,1095	16,00
9	2,1023	1,9026	9,50
10	1,9654	1,6706	15,00

Таблиця 5.6

## Зміна маси частинок при вологості сировини 12%

П/номер частинки	Маса частинки матеріалу, г	Маса частинки після грохочення, г	Відносне значення зміни маси (%)
1	0,9828	0,8586	12,65
2	0,9424	0,7465	20,79
3	1,5748	1,4093	10,51
4	1,0315	0,9129	11,49
5	1,1495	0,9899	13,88

6	1,9218	1,7252	10,23
7	2,1720	1,7202	20,80
8	2,5113	1,9049	24,15
9	2,1023	1,7713	15,74
10	1,9654	1,5186	22,74

Користуючись даними табл. 5.5 та 5.6, визначимо оцінки математичних очікувань  $M_n$  та середньоквадратичних відхилень  $\delta_n$  [104] відносних значень зміни маси частинок (%). При вологості сировини 6% їх значення  $M_n \pm \delta_n$  склали  $9,6(+/-)3,4\%$ , а при вологості 12% відповідно  $16,3(+/-)5\%$ . Видно, що при меншій вологості сировини відокремлення глинистих покриттів від частинок матеріалу відбувається менш інтенсивно, ніж це спостерігається при більшій вологості матеріалу. Це пояснюється зменшенням міцності покриття при збільшенні вологості.

#### **5.4. Обґрунтування структурної побудови технологічної лінії з валково-пальцевим грохотом**

Дослідження, виконані в підрозділі 3.4, розкривають особливості класифікації вихідної сировини із застосуванням валково-пальцевих грохотів. Розкрито їх переваги виходячи із результатів експериментальних досліджень, виконаних на макеті установки (розд.5). Це дозволило зробити висновок про доцільність застосування грохотів такого виконання в технологічних лініях збагачення сировини вапнякових родовищ.

Важливий момент дослідження полягає у виборі раціонального місця розміщення грохоту в технологічній лінії. При цьому слід виходити із можливостей валково-пальцевих грохотів у забезпеченні необхідного рівня продуктивності процесу переробки сировини, забезпеченні режимів їх



функціонування, які повною мірою розкривають переваги грохотів такого типу.

Природно, що одним із варіантів, які розглядатимуться, є введення нової конструкції в існуючу технологічну лінію переробки сировини. Цей варіант найбільш простий у виконанні, так як передбачає використання більшої частини обладнання існуючої лінії, що значною мірою знижує її вартість. Таке рішення запропоновано в патенті на корисну модель [117]. Суть запропонованого рішення полягає в тому, щоб на ранній стадії процесу переробки неоднорідних вапняків увести додаткову операцію сепарації (механічного обдирання глинистих покриттів із кусків гірської породи) з одночасним грохоченням отриманого продукту, що забезпечує відділення глиномістких частинок від вапняку. Ця функція покладена на валково-пальцевий грохот. Запропоноване рішення дозволяє на ранній стадії процесу збагачення збільшити ступінь очищення сировини, що переробляється, і істотно поліпшити умови роботи товарних грохотів, підвищити якість виробленого товарного щебеню. Запропонована технологічна схема збагачення приведена на рис.5.5.

Слід звернути увагу на той факт, що (як було показано в розд. 4) валково-пальцевий грохот має високу ефективність грохочення при підвищеній вологості вихідної сировини. Це дозволяє в умовах зі змінними погодними умовами забезпечити ефективне грохочення, направляючи глиномісткі частки у відходи і виключаючи їх подальше проходження на наступні стадії грохочення. Це сприяє зменшенню налипання дрібних частинок на робочі поверхні сит товарного грохочення (операції грохочення IV, V, VI).

Показана на рис.5.5 крупність розділення частинок валково-пальцевим грохотом ( $d = 7$  мм) є параметром, який може змінюватися в залежності від результату розрахунку за методикою, запропонованою в розд.2. Поряд із перевагами запропонованого місця установки валкового-пальцевого грохоту на початковій стадії грохочення слід зазначити можливість прояву недоліків.

На стадію сепарації II надходить матеріал крупністю 0-80 мм, що передбачає роботу валково-пальцевого грохоту зі значними обсягами крупних фракцій.

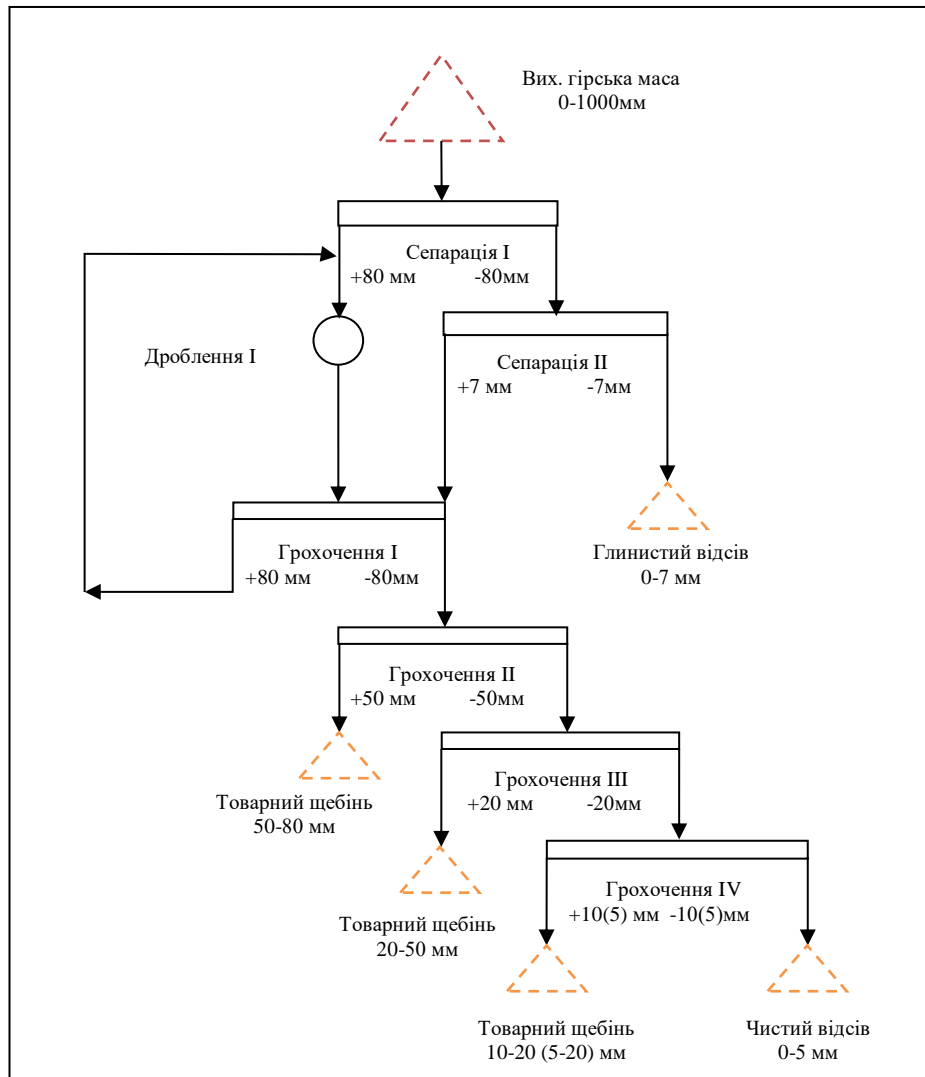


Рис.5. Технологічна схема збагачення з використанням валково-пальцевого грохоту (сепарації I та II).

З огляду на те, що висота зубів диска грохоту при малій крупності розділення продукту невелика, слід очікувати ослаблення функції сепарації глинистих покриттів на крупних частинках. Для виключення цієї проблеми можлива організація грохочення валково-пальцевими грохотами в кілька стадій із різними крупностями розділення частинок (від більшої крупності до меншої). У кінцевому варіанті можлива відмова від звичайних грохотів для отримання товарного щебеню і перехід до технологічних ліній, які

використовують валково-пальцеві грохоти на різних стадіях процесу грохочення.

Ясно, що широке використання валково-пальцевих грохотів передбачає вдосконалення їх конструктивного виконання. Перш за все слід звернути увагу на надійність робочих органів грохоту (валів і дисків). Їх працездатність і надійність досягаються особливим виконанням валів і дисків. Так, в патенті [122] запропоновано кріпити диски на валу за допомогою циліндричних маточин, до яких при обертанні сусідніх валів поперемінно примикають кінці пальців. Взаємодія дисків і валів здійснюється таким чином, що можливість затиснення частинок матеріалу істотно знижується.

При цьому реалізується ефект «киплячого шару» з переміщенням крупної фракції на кінець короба грохоту, а дрібної – в проміжок між пальцями і маточинами і потім в підрешітний простір грохоту. Запропонована в патенті конструкція виконання диска (чотирипальцева) і вала (кріплення дисків за допомогою маточин) повністю збігається із конструктивним виконанням елементів грохоту, розглянутим в розд.3.

Експлуатаційна надійність грохоту значною мірою залежить від складності конструктивного виконання його елементів. Проста конструкція є запорукою скорочення термінів проведення ремонтних робіт і підвищення, в кінцевому рахунку, продуктивності технологічної лінії за рахунок скорочення часу простою. Низька надійність дисків валкових грохотів обумовлена тим, що пальці дисків порівняно часто виходять з ладу, або зношуються. Виникає необхідність повної заміни диска. У патенті [123]. запропоновано диски виконувати розрізними між пальцями. При цьому окремі частини диска з пальцями заведені в кільцеві канавки і прикріплені до днищ канавок гвинтами. Рис.5.5 ілюструє запропоновану конструкцію диска і його кріплення на валу. Вал грохоту містить ділянку 1 квадратного перетину із насадженими на неї маточинами 2, що мають квадратний отвір 3. Конструкція містить диски 4 з пальцями 5 і отвором 6. Окремі частини дисків 4 з пальцями 5 заведені в кільцеві канавки і прикріплені до днища 8 гвинтами 9. Диски 4 можуть бути

виконані розрізними між кожним пальцем 5, як це показано на рис. 5.5, або між групами пальців 5. У місцях розташування гвинтів 9 на пальцях 5 можуть бути виконані вибірки, отвір 10 дозволяє замінювати зношені елементи. Тому при зупинці грохоту для заміни поламаних пальців 5 необхідність у демонтажі валу не виникає.

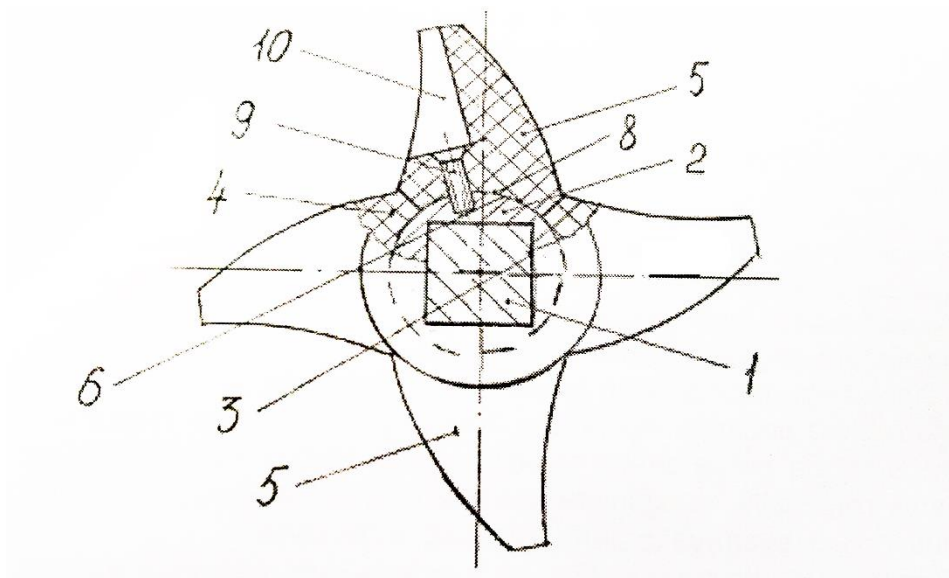


Рис. 5.6. Кріплення диска на валу грохоту

Необхідно зняти гвинти 9 через отвір 10 в зношених пальцях 5 і потім прикріпити нові пальці. Запропонована конструкція дисків грохоту сприяє підвищенню його експлуатаційної надійності [117].

## 5.5. Висновки до розділу 5

1. Суть запропонованих автором та захищених патентами конструктивних рішень валків і дисків валково-пальцевого грохота полягає в особливому розташуванні пальців диска відносно сусіднього вала грохота, в оригінальному кріпленні пальців на диску. Рішення забезпечують працездатність грохота, дозволяють підвищити надійність його роботи, скоротити терміни проведення ремонтних робіт. Розроблений експериментальний зразок валково-пальцевого грохоту реалізує результати

теоретичних досліджень автора в частині конструктивного виконання, режимів роботи грохотів такого типу.

2. Результати проведених експериментів дозволили отримати розрахункові значення показників ефективності збагачення і грохочення при заданих поєднаннях змінних параметрів, побудувати на цій основі регресійні моделі, виконати порівняльний аналіз розглянутих підходів до грохочення сировини.

3. Доведено, що при використанні валково-пальцевого грохоту спостерігається збільшення маси підрешітного продукту (в зіставленні з варіантом без його застосування). Збільшення відбувається завдяки зростанню маси глинистих добавок і дрібних частинок вапняку, причому у випадку підвищеної вологості вихідного продукту таке збільшення більш відчутно (в 1,5-2 рази).

4. Запропоновано на ранній стадії процесу переробки вапнякової сировини ввести додаткову операцію сепарації із застосуванням валково-пальцевого грохота. Запропоноване рішення дозволяє на ранній стадії процесу збагачення збільшити ступінь очищення сировини, що переробляється, поліпшити умови роботи товарних грохотів, підвищити якість отриманого щебеню.

Основні наукові результати розділу опубліковані в праці [117].

## ЗАГАЛЬНІ 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, який спроможний нівелювати вплив вологості вапняку на його збагачуванність, 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 вапнякових 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 в якості 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 в якості 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 вапнякових родовищ.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сладков А.С. Промышленное освоение гидрогрохота на еленовских известняках. Горный журнал, 1961, Вип. №11.
2. Люйкен В. Подготовка сырых материалов к доменной плавке. Металлургиздат, 1959.
3. Егоров В.Д. Обогащение полезных ископаемых. М., Недра, 1987.
4. СГУ МПП 73.080-028: 2004. Вапняки флюсові для доменного виробництва. Технічні умови. Вид. оф. Київ: Мінпромполітики України, 2004р.
5. СГУ МПП 73.080-177: 2007. Вапняки флюсові для сталеплавильного и феросплавного виробництва. Технічні умови. Вид. оф. Київ: Мінпромполітики України, 2007р.
6. Чилаев Т.В., Таранухин Н.А. Технология разработки месторождений цементного сырья. М.: Недра, 1980. 334с.
7. Монастырев А.В. Производство извести. М.: Высшая школа, 1986.
8. Анистратов Ю.И., Таратухин Н.А., Лукьянов В.И. Перспективы развития технологии горных работ на карьерах цементного сырья. М.: Недра, 1981.
9. ДСТУ Б В.2.7-109-2001. Породи карбонатні для виробництва вапна. Технічні умови. Вид. оф. Київ: Мінпромполітики України, 2001р.
10. ДСТУ Б В. 2.7-46: 2010. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. Вид. оф. Київ: Мінпромполітики України, 2010р.
11. Белей К.И., Куницкий Л.С., Лебедкова В.А. Состояние и перспективы развития производства известняковой муки. М.: ВНИИ ЖСМ, 1978. 31с.
12. Шлайн И.Б. Минеральное сырье для стекловарения. Москва: Промстройиздат, 1955. 275 с.
13. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. М. Недра, 2004. 126 с.

14. Гуменюк К.Д., Жадан А.М., Коробко А.Н., Задохин Н.Н. Использование отходов промышленности и сельского хозяйства в животноводстве. Киев, 1983. 180 с.
15. Гладуненко Р. Ринок вапна і вапняку України. Динаміка розвитку. «Україна в контексті розвитку світового ринку вапняної промисловості: досвід міжнародних компаній», матеріали конференції УАВП, 13-14 грудня 2017. Київ. 23 с.
16. Виноградов С.С. Известняки. М.: Госстройиздат, 1951. 118 с.
17. Шлайн И.Б. Разработка месторождений карбонатных пород. М.: Недра, -1968. 293с.
18. Базылев В.Г., В.Н. Сиренко Обоснование выбора средства механизации при разработке неоднородных по прочности карбонатных пород. Сб.тр. ВНИИнеруд. 1962. Вып.2. С. 17-22.
19. Друкованный М.Ф. К вопросу снижения выхода некондиционных фракций на карьерах флюсовых известняков и стройматериалов. Киев: Наукова думка, 1976, 50 с.
20. Григорович М.Б., Немировская М.Г. Месторождения минерального сырья для промышленности строительных материалов. М.: Недра, 1987.
21. Ларионов С.О. Исследование технологии разработки карбонатных месторождений при комплексном использовании сырья: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.03. М.: МГГУ. 1999. 202 с.
22. Шлайн И.Б. Разработка месторождений нерудного сырья. М.: Недра, -1985. 344с.
23. Олюнин В.В. Переработка нерудных строительных материалов. М.: Недра, 1988. 232 с.
24. Кириченко Ю.В., Ларионов С.О. Районирование карбонатных месторождений, как основа для выбора технологии их разработки. Горный информационно-аналитический бюллетень, М., МГТУ, К. 5, 1999.

25. Ларионов О.С. Повышение эффективности разработки карбонатных месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень. М., МГТУ 1999.
26. Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. 623 с.
27. Агошков М.И. Актуальные проблемы освоения месторождений и использования минерального сырья. М.: МГУ, 1993.
28. Жиганов П.А., Лагунова Ю.А., Жиганов А.А., Лазарев Е.А. Нетрадиционные технологии и оборудование для разработки сложно-структурных МПИ. Сб. докладов III международной конф. Екатеринбург: УГГУ, 2005. Вип.1. С. 93-97.
29. Майминд, В.Я. Эффективность применения новой технологии и техники на флюсовых карьерах. Горный журнал. 1982. №2, 20с.
30. Цибулевский А.И., Добротин Д.А., Воронин В.И. Переработка известняков Крымских месторождений. Госстройиздат, 1963.
31. Дрешпак А.С. Обоснование исходных параметров обогащения известняков из неоднородных карбонатных месторождений. Науково-технічний збірник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2016. вип. 64(105). С. 59-68.
32. Липман А.А., Терехов Д.И., Шаненко Ф.Ф. Обезвоживание нерудных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1975.
33. Авраамова Н.С., Косенко Н.В. Новые малоотходные безвзрывные технологии открытой разработки скальных горных пород. Проблемы машиноведения и машиностроения Сб. СЗТУ, 2004. Вип №33, С. 239-243.
34. Арсентьев А.И., Таламанова О.Н. Определение направлений совершенствования технологии производства щебня. Горный журнал. 2003. Вип. №4-5. С. 86-89.

35. Юдин А.В. Результаты экспериментальных исследований грохочения крупнокускового материала на колосниковом вибрационном грохоте. Тр. ин-та/ ИГД УрО РАН, 1972. Вип. №34. С. 109-116.
36. Жгулев А.С. Самоочистка упругих консольных колосников виброгрохотов. Обогащение руд. 1973. Вип. №4. С. 19-22.
37. Шакиров А.Ш., Левочкин В.Ф., Кривошеева Н.Г., Завгородняя Г.В. Добыча и обогащение доломитов Данковского комбината для огнеупорного производства. Горный журнал. 1991. Вип. №10. 20с.
38. Сладков А.С. Грохочение в жидкой среде. Бюллетень Колыма, 1954, Вип. №5.
39. Сладков А.С., Голгер Ю.Я. Исследование обогатимости отходов известняка Садахлинской дробильно-сортировочной фабрики. Подготовка руд черных металлов к плавке: Сб. ст. ин-та Механобрчермет, Днепропетровское книжное издательство, 1960.
40. Емельянов Г.П. Получение качественного известняка путем мокрого обогащения. Горный журнал, 1953, Вип. №9.
41. Лымарь А.Н. Обогащение известняков Тиановского месторождения. Обогащение полезных ископаемых: Сб. тр. Кольского филиала АН СССР, вып.1, Металлургиздат, 1958.
42. Голгер Ю.Я., Самойлов Н.Г. Усовершенствование схемы обогащения еленовских известняков. Горный журнал, 1959, Вип. №6.
43. Сладков А.С. Промышленное освоение гидрогрохота на еленовских известняках. Горный журнал, 1961, Вип. №11.
44. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд. Основные и вспомогательные процессы. Под ред. О.С. Богданова. М., Недра, 1984.
45. Нисневич М.Л., Ратьковский Л.Н. Обогащение нерудных строительных материалов. Госстройиздат, 1963.
46. Троицкий В.В. Обогащение нерудных строительных материалов. Л., Стройиздат: 1986, 284с.

47. Панкевич Ю.Б. Обобщение опыта эксплуатации карьерного комбайна SM фирмы Wirtgen на карьерах по добыче цементного сырья. Горная промышленность. 1997. №4. С. 32-34, 42-45.
48. Трубецкой К.Н., Леонов Е.Р., Панкевич Ю.Б. Комплексы мобильного оборудования на ОГР. М.: Недра, 1990.
49. Бульбашев А.П., Билюкин А.Б. Безвзрывная селективная выемка сложноструктурных залежей. Горный журнал. 1996. № 11-12. С. 70-72.
50. Клушанцев Б.В. Передвижные дробильно-сортировочные установки (зарубежный опыт). Строительные и дорожные машины, 1996, Вип. №6. С. 1519.
51. Фадеев Б.В., Хватов Ю.А. Нужны ли грохотильные установки перед конусными дробилками в карьерах? Горн. журн. 1980. Вип. №3. С. 3-7.
52. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н. Дробильно-измельчительное оборудование НПК «Механобртехника» для переработки минерального и техногенного сырья. Горный журнал, 2004, №3.
53. Панов В.А., Юдин А.В., Пекарский В.С. Опытные-промышленные испытания переносной грохотильно-дробильной установки на Качканарском ГОКе. Черная металлургия: Бюл. МТИ, 1988. Вип. №17. С. 3940.
54. Юдин А.В. Исследование вероятности извлечения фракций на вибрационном грохоте и определение расстояние между колосниками. Обогащение руд. 1973. Вип. №6. С. 43-45.
55. Юдин А.В., Кошев Г.Я. Параметры передвижной виброгрохотильной установки для карьеров. Горный журнал: Изв. ВУЗов. 1996. Вип. №3-4. С. 92-96.
56. Шилин А.Н., Юдин А.В. Грохоты тяжелого типа для применения в схемах циклично-поточной технологии. Тр. ин-та/ ИГД УрО РАН. 1970. Вип. №25. С. 81-93.
57. Баттель В. Новое о процессе грохочения. Цайтшрифт. Вип. №13. 1955.- С. 10-12.

58. Пономарев В.Н. Опыт эксплуатации резонансных грохотов на углеобогатительных фабриках. М.: Недра. 1965. 23 с.
59. Крюков Б.И. Динамика вибрационных машин резонансного типа. Киев: Наукова думка, 1967. 18 с.
60. Трубецкой К.Н. Теория и практика применения мобильного оборудования на открытых разработках. Горный журнал. 1986, Вып. №10, 61с.
61. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф. Моделирование влияния параметров валкового вибрационного классификатора на производительность. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. 2002. Вып. 30. С. 162-171.
62. Назимко Е.И., Лазарева Т.А., Лазарев А.М. Комплексное использование известняков Еленовского месторождения. Збагачення корисних копалин: Науково-технічний збірник. Вып. 50 (91), 2012, С. 7-11.
63. Андреев С.Е, Перов. В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М., Недра, 1980.
64. Троицкий В.В. Промывка полезных ископаемых. М., Недра, 1978.
65. 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.
66. 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.
67. Фадеев Б.В., Чапурин Н.А. Дробильные установки на карьерах. М.: Недра, 1981. 168 с.
68. Kalkstein-und Dolomit Vorbrech und Vorsiebanlage mit hohen Durchsatzleistung. Steinbruch und Sandgrube. - Aufbereit, Techn. 1991, 32, N 12, P, 714.

69. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. Металлургиздат, 1965.
70. Троицкий В.В., Мезрин В.В. Борьба с налипанием горной массы на рабочие поверхности транспортного и обогатительного оборудования. М.: 1987. С. 21-26.
71. Верхотуров М.В. Сепарация влажных материалов. Изд. Красноярского университета, 1987, 73 с.
72. Лиандов К.К. Грохочение полезных ископаемых. М.: Metallurgizdat. 1948.
73. Попов Г.А., Настоящий В.А. О возможности интенсификации процесса сортировки горной массы применением валковых грохотов. Техника и технология горного производства: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 1990. С. 86.
74. Плахотнюк Е.И. Результаты исследований грохочения влажной и липкой горной массы на валковом классификаторе. Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ: НГУ, 2005. Вип. 23(64). С. 17-19.
75. Фомин В.И., Коноплев Е.В., Кошев Г.Я. О совершенствовании техники и технологии в безотходном производстве карбонатного сырья. Горный журнал: Изв. ВУЗов. 1996. №2. С. 91-100.
76. Надутый В.П., Калиниченко В.В. Вибрационное грохочение горной массы повышенной влажности. Днепропетровск. НГУ Украины. 2004. 135 с.
77. Халло П.В. Технология разработки месторождений и переработки известняков Товтрской рифовой гряды. «Україна в контексті розвитку світового ринку вапняної промисловості: досвід міжнародних компаній», матеріали конференції УАВП, 13-14 грудня 2017. Київ. 2017. 9 с.
78. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2005. 252 с.

79. Надутый В.П., Остапенко В.А., Ягнюков В.Ф. Синтез параметров валковых вибрационных классификаторов. Монография: Проект "Наукова книга" НАН України. К. 2006. 189 с.
80. Юдин А.В., Мальцев В.А., Косолапов А.Н. Тяжелые вибрационные питатели и питатели-грохоты для горных перегрузочных систем. Екатеринбург, 2009. 402 с.
81. Надутый В.П., Эрперт А.М., Ягнюков В.Ф. Обобщенная модель работы валкового вибрационного классификатора с учетом режимных и конструктивных параметров. Межвед. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины: Геотехническая механика. Вып. 48. 2004. С. 286 - 290.
82. Kalkstein-und Dolomit Vorbrech und Vorsiebanlage mit hohen Durchsatzleistung. Steinbruch und Sandgrube. - Aufbereit, Techn. 1991, 32, N 12, P, 714.
83. Новая установка дробления и грохочения влажных и липких материалов на заводе CADEM. Mazzan Luis. Il sem.-por.-migon. 1993. N 726. С. 1411-1418.
84. Валковый классификатор: патент UA на корисну модель № 47329. МКИ В 07 В 1/100. № u201210194. Заявл. 10.08.09, Опубл. 25.01.10, Бюл. № 1. 7 с.
85. Валковый классификатор: деклараційний патент на винахід № 71721А, Україна. МКИ 7В 07В 1/14. Заявл. 29.09.03, Опубл. 15.12.04., Бюл. № 12. 5 с.
86. Лященко П. В. Гравитационные методы обогащения. Л. 1940.
87. Левенсон Л.Б., Ключев Т.М. Производство щебня. Госстройиздат, 1959.
88. Егоров В.Д. Обогащение полезных ископаемых. М., Недра, 1987.
89. Буткевич Р.Г., Тарапухин Н.А., Птичников Е.В. Разработка сложно-структурных месторождений цементного сырья. М.: ВНИИЭСМ, 1976.
90. Трубецкой К.Н., Панкевич Ю.Б. Современные методы открытых работ месторождений карбонатного сырья за рубежом. М., 1973 .
91. Зимин М.А., Панфилов Ф.В., Матросов А.А., Афонин И.А. Руководство по обогащению отсеков дробления и разнопрочных каменных материалов. М.: СОЮЗДОРНИИ, 1992. 66 с.



92. Козин В.З. Опробование на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1988. 287 с.
93. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. М.: Недра, 1978. 168 с.
94. Арсентьев А.И., Таламанова О.Н. Определение направлений совершенствования технологии производства щебня. Горный журнал. 2003. Вип. №4-5. С. 86-89.
95. Виноградов В.С. Технологическое оборудование на карьерах. Справочник под ред. В.С. Виноградова. М.: 1981. 327с.
96. Фадеев Б.В., Чапурин Н.А. Дробильные установки на карьерах. М.: Недра, 1981. 168 с.
97. Thormahlen P. Fine screening of hygroscopic materials with the Mogensen Sizer. Aufbereitung-Technic. 1989, №11. С. 698-704.
98. Юдин А.В. Вибрационные грохоты и питатели-грохоты Технологическое оборудование карьеров. М.: Недра, 1981. 190 с.
99. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М., Недра, 1985.
100. Бульбашев А.П., Шувалов Ю.В. Рациональные технологии освоения месторождений строительных материалов. СПб: МАНЭБ, 2000.
101. Клушанцев Б.В. Передвижные дробильно-сортировочные установки (зарубежный опыт). Строительные и дорожные машины, 1996, Вип. №6. С. 1519.
102. Юдин А.В., Пекарский В.С., Линев В.П. Перспективные схемы и повышение эффективности грохотильно-дробильных пунктов в глубоких карьерах. Проектирование предприятий горнорудной промышленности: сб. тез. М.: 1980. Вип. №6. с. 13-17.
103. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф. Моделирование влияния параметров валкового вибрационного классификатора на производительность. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. 2002. Вип. 30. С. 162-171.

104. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981, 184с.
105. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций. Под общ.ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ. 2004. 257с.
106. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд. Основные и вспомогательные процессы. Под ред. О.С. Богданова. М., Недра, 1984.
107. Непомнящий Е.А. Некоторые результаты теоретического анализа процесса грохочения. М. Обогащение руд. Вып. 5. 1962.
108. Лошкарев Ю.В., Соловьев А.А. Методы расчета производительности грохочения Сб. науч. Тр. ВНИИ нерудных стройматериалов и гидромеханизации, Вып. 37. М. 1973. С. 34-43.
109. Юдин А.В. Вибрационные грохоты и питатели-грохоты Технологическое оборудование карьеров. М.: Недра, 1981. 190 с.
110. Юдин А.В. Результаты экспериментальных исследований грохочения крупнокускового материала на колосниковом вибрационном грохоте. Тр. ин-та/ ИГД УрО РАН, 1972. Вип. №34. С. 109-116.
111. Юдин А.В. Исследование вероятности извлечения фракций на вибрационном грохоте и определение расстояние между колосниками. Обогащение руд. 1973. Вип. №6. С. 43-45.
112. Юдин А.В., Кошев Г.Я. Параметры передвижной виброгрохотильной установки для карьеров. Горный журнал: Изв. ВУЗов. 1996. Вип. №3-4. С. 92-96.
113. Шилин А.Н., Юдин А.В. Грохоты тяжелого типа для применения в схемах циклично-поточной технологии. Тр. ин-та/ ИГД УрО РАН. 1970. Вип. №25. С. 81-93.
114. Дрешпак А.С. Эффективность обогащения и классификации сырья неоднородного карбонатного месторождения. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 2018. – вип.56. – С. 175-183.

115. Дьяконов В. MathCAD 8/2000: специальный справочник. СПб: Издательство «Питер». 2000г. 592 с.
116. Pilov P.I., Dreshpak A.S. Mathematical model for predicting limestone enrichment indicators. *Int. journal of energy for a clean environment, vol. 18, № 4*. Connecticut. 2017. P. 319–333 (Scopus).
117. Спосіб збагачення неоднорідних карбонатних матеріалів: патент на корисну модель 114078, Україна, МКП В03В 7/00. № u201609540. заявл. 15.09.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 6 с.
118. Сладков А.С. Подготовка флюсов к доменной плавке. Москва, Metallurgiya, 1976. 300 с.
119. Дрешпак А.С. Определение степени разубоживания известняков Западно-Тягинского месторождения. *Збагачення корисних копалин Науково-технічний збірник*. Дніпро, 2015. Вип. 61(102). С. 56-58.
120. 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.
121. 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.
122. Валково-пальцевий грохот: патент на корисну модель 113996, Україна: МКП В07В 1/16. № u201608648: заявл. 08.08.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 4 с.
123. Вал грохота: патент на корисну модель 114030, Україна, МКП В07В 1/16. № u201608910. заявл. 18.08.2016; опубл. 27.02.17, Бюл. №4. 4 с.
124. Дрешпак А.С. Особенности конструктивного исполнения фигурных дисков валково-пальцевого грохота / А.С. Дрешпак - Збагачення корисних копалин: Науково-технічний збірник. Вип. 70(111). 2018. С. 6-17.

## Додаток А

**Методика розрахунку регресійних залежностей вмісту  $\text{CaCO}_3$  від  
крупності часток та показників ефективності збагачення вапнякової  
сировини**

**НТУ «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

УЗГОДЖЕНО  
Проректор по науковій роботі  
НТУ Дніпровська політехніка, Стар. проф.  
«26» червня 2019 р.



**Методика розрахунку регресійних залежностей вмісту  $\text{CaCO}_3$   
від крупності часток та показників ефективності збагачення  
вапнякової сировини**

Зав. кафедрою технологій щодо  
інженірингу переробки матеріалів  
К.т.н., доц. Девченко К.А.

\_\_\_\_\_  
Науковий керівник  
Д.т.н., проф. Пісак П.І.

\_\_\_\_\_  
Виконавець  
Аспірант Дрешич О.С.

\_\_\_\_\_  
Секретар кафедри  
Березняк О.О.

Кафедра технологій щодо інженірингу переробки матеріалів  
м. Дніпро, 2019

Методика проведення експериментальних досліджень і виконання на цій основі зазначених аналізів наведені результати виконаних досліджень. Для  $i$ -го класу крупності вихідної сировини визначалися:

- вага навіски  $m_i$ , г;
- вихід продукту  $i$ -го класу крупності  $\gamma_i$ , %;
- сумарний вихід  $\Sigma\gamma_i$ , %, що представляє собою кумулятивну суму виходів низьких класів крупності;
- масу глинистих добавок  $m_{ri}$ , г;
- процентний вміст глинистих добавок  $m_{ri}$ , %;
- масу вапняку  $m_{ui}$ , г;
- процентний вміст вапняку  $m_{ui}$ , %;
- питомий вміст глинистих добавок  $\frac{m_{ri}}{m}$ , % ( $m$  - загальна маса проби матеріалу, г);
- питомий вміст вапняку  $\frac{m_{ui}}{m}$ , (%).

В якості прикладу розглянемо типовий вихідний матеріал вапнякового родовища.

Таблиця 1.1

## Результати аналізу вихідної сировини Західно-Тягинського родовища

Клас крупності, мм	Вага навіски, $m_i$ , г	Част. вихід, $\gamma_i$ , %	Сум. вихід, $\Sigma\gamma_i$ , %	Маса глини, $m_{ri}$ , г	Вміст глини, $m_{ri}$ , %	Маса вапняку $m_{ui}$ , г	Вміст вапняку $m_{ui}$ , %	Пит. вміст розд. $\frac{m_{ri}}{m}$ , %	Пит. вміст вапняку $\frac{m_{ui}}{m}$ , %
40-80	413,26	19,03	100,00	111,74	27,04	301,52	72,96	5,14	13,88
20-40	345,6	15,91	80,97	104,5	30,24	241,1	69,76	4,81	11,10
10-20	270,07	12,43	65,06	110,85	41,04	159,22	58,96	5,10	7,33
7-10	236,29	10,88	52,63	105,58	44,68	130,71	55,32	4,86	6,02
5-7	150,75	6,94	41,75	83,88	55,64	66,87	44,36	3,86	3,08
2-5	165,64	7,63	34,81	92,05	55,57	73,59	44,43	4,24	3,39
0,8-2	240,32	11,06	27,19	156,32	65,05	84,00	34,95	7,20	3,87
0-0,8	350,26	16,12	16,12	194,23	55,45	156,03	44,55	8,94	7,18
ВСЬОГО	2172,19	100							

Для отримання регресійної аналітичної залежності між вмістом кальциту ( $Y_i$ ) і середньою крупністю частинок  $X_i$  необхідно задати її вид. При цьому слід виходити з взаємного розташування експериментальних точок на площині.

Таблиця 1.2

Середнє значення  $i$ -го класу крупності в співвідношенні з цільовим компонентом  $\text{CaCO}_3$

$X_i$ , мм	60	30	15	8,5	6	3,5	1,4	0,4
$Y_i$ , %	72,96	69,76	58,96	44,36	44,43	34,95	34,95	44,55

Для вибору типу кривої, що задовольняє заданому розташуванню точок, доцільно користуватися стандартним набором функцій, представлених, наприклад, в програмі MathCAD [1]. В результаті підбору апроксимуючої функції виявилось, що прийнятна регресійна залежність може бути представлена ступеневою функцією. Звернення до функції *pwzfit* програми MathCAD дозволяє шукати регресійну залежність виду:

$$Y = aX^n + b, \quad (1.1)$$

де  $Y$  – оцінка математичного очікування вмісту кальциту у вихідному матеріалі.

При цьому пошуку підлягають значення  $a$ ,  $n$  і  $b$ , що забезпечують мінімальне значення середньоквадратичної похибки. Використання методу найменших квадратів дозволило отримати регресію виду:

$$m_{2d}/m = 22,403d^{0,347} - 0,675; \quad (1.2)$$

$$m_{н2d}/m = 7,962d^{0,448} - 0,271. \quad (1.3)$$

Розрахунок (див. додаток А) показав, що запропоновані криві практично ідеально підходять для апроксимації результатів експериментальних досліджень, наведених в табл. 2.3. Рисунок 2.3 ілюструє отримані залежності в графічному вигляді. Значення показника  $F$ , розраховане за формулою 2.3, для зазначених кривих склало:

- Для кривої 1 – значення  $F = 39,2$ ;

- Для кривої 2 – значення  $F = 8,0$ .

Розрахункові значення кореляційних відношень  $r$  для розглянутих нелінійних моделей склали відповідно:

- для кривої (2.7) –  $r = 0,997$ ;

- для кривої (2.8) –  $r = 0,998$ .

$$i := 0..7$$

$$V_i := (60 \ 30 \ 15 \ 8.5 \ 6 \ 3.5 \ 1.4 \ 0.4)$$

$$N_i := (72.96 \ 69.76 \ 58.96 \ 55.32 \ 44.36 \ 44.43 \ 34.95 \ 44.55)$$

$$V := \begin{pmatrix} 60 \\ 30 \\ 15 \\ 8.5 \\ 6 \\ 3.5 \\ 1.4 \\ 0.4 \end{pmatrix}$$

$$N := \begin{pmatrix} 72.96 \\ 65.76 \\ 58.96 \\ 52.32 \\ 46.36 \\ 44.43 \\ 34.95 \\ 44.55 \end{pmatrix}$$

Формування масивів змінних у відповідності до табл. 2.2

$$B := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1 \\ 45 \end{pmatrix}$$

$$K := \text{pwrfit}(V, N, B)$$

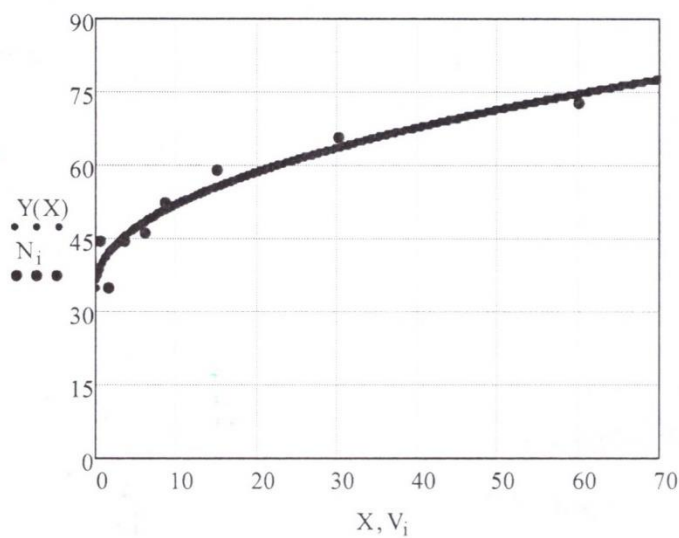
$$K = \begin{pmatrix} 5.84 \\ 0.469 \\ 35.039 \end{pmatrix}$$

Пошук коефіцієнтів регресійної залежності

$$K_0 = 5.84$$

$$K_1 = 0.469$$

$$K_2 = 35.039$$

$$Y(X) := K_2 + K_0 \cdot X^{K_1}$$


Побудова регресійної залежності згідно рис. 2.1.

$$V := \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 5 \\ 7 \\ 10 \\ 20 \\ 40 \\ 80 \end{pmatrix} \quad N := \begin{pmatrix} 0 \\ 11.05 \\ 14.44 \\ 17.52 \\ 23.54 \\ 30.87 \\ 41.97 \\ 55.85 \end{pmatrix}$$

Формування масиву змінних у відповідності до табл. 2.3

$$B := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1 \\ 45 \end{pmatrix}$$

$$K := \text{pwrfit}(V, N, B)$$

$$K = \begin{pmatrix} 7.962 \\ 0.448 \\ -0.271 \end{pmatrix}$$

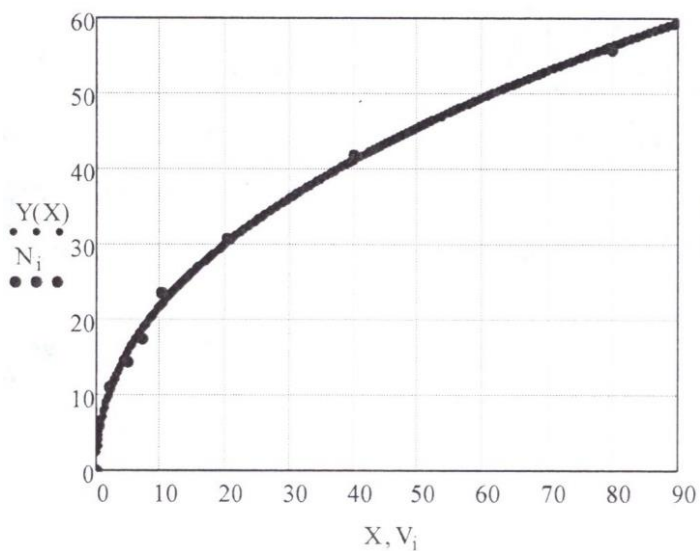
$$K_0 = 7.962$$

$$K_1 = 0.448$$

$$K_2 = -0.271$$

Пошук коефіцієнтів регресійної залежності

$$Y(X) := K_2 + K_0 \cdot X^{K_1}$$



Побудова регресійної залежності, що відповідає рис. 2.3



$$V1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 5 \\ 7 \\ 10 \\ 20 \\ 40 \\ 80 \end{pmatrix} \quad N1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 27.19 \\ 34.81 \\ 41.75 \\ 52.63 \\ 65.06 \\ 80.97 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Формування масиву змінних у відповідності до добл. 2.3

$$B := \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 45 \end{pmatrix}$$

$$K := \text{pwrfit}(V1, N1, B)$$

Пошук коефіцієнтів регресійної залежності

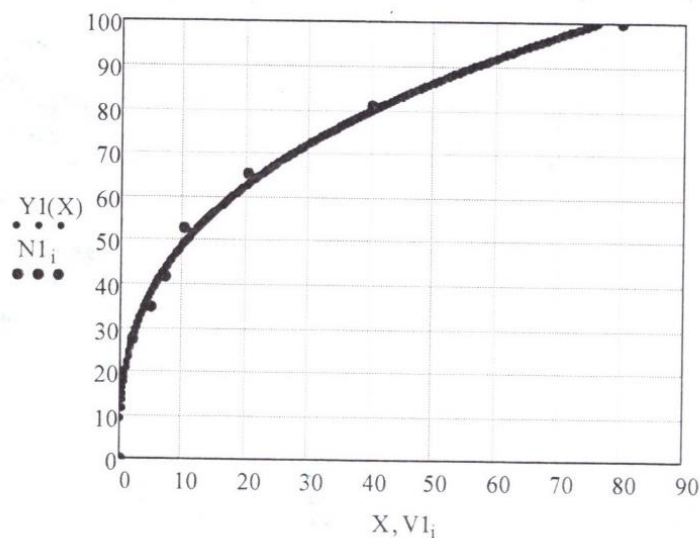
$$K = \begin{pmatrix} 22.403 \\ 0.347 \\ -0.675 \end{pmatrix}$$

$$K_0 = 22.403$$

$$K_1 = 0.347$$

$$K_2 = -0.675$$

$$Y1(X) := K_2 + K_0 \cdot X^{K_1}$$



Побудова регресійної залежності, що відповідає рис. 2.3 (крива 1)

Нижче наведена формула для розрахунку суми найменших квадратів відхилень [2]:

$$F = \sum_{i=1}^N [Y_i - Y(X_i)]^2, \quad (1.4)$$

де  $N$  – кількість дослідів.

Таким чином, експериментальні точки дещо «віддалені» від лінії регресії. Ступінь стохастичною зв'язку між змінними визначається кореляційним відношенням  $\rho$  [3].

Перш за все, необхідно визначити показники ефективності збагачення сировини. Оскільки мова йде про використання пристрою класифікації, то процес збагачення повинен супроводжуватися поліпшенням якості надрешітного продукту і враховувати вміст цільового компонента в підрешітному продукті. Крім того, важливі вагові показники концентрату і хвостів. Цим вимогам відповідає широко використовуваний при збагаченні корисних копалин показник ефективності збагачення  $E$  [4]:

$$E = \frac{\varepsilon_1 - \gamma_1}{1 - \alpha}, \quad (1.5)$$

де  $\varepsilon_1$  – вилучення кальциту в надрешітний продукт, %;

$\gamma_1$  – вихід надрешітного продукту, %;

$\alpha$  – вміст кальциту у вихідному матеріалі, %.

Значення витягу для надрешітного продукту (концентрату), отримуємо з формули [4]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma_1 \beta_1}{\alpha}, \quad (1.6)$$

де  $\beta_1$  – вміст кальциту в надрешітному продукті (концентраті), %.

Важливим параметром, який використовують для оцінки ефективності роботи пристрою класифікації матеріалу, є показник ефективності процесу класифікації  $E_r$ . Якщо в якості класифікуючого пристрою використовується грохот, то розглядають ефективність грохочення матеріалу  $E_r$ :

$$E_r = \frac{m_2}{m_{2d}}, \quad (1.7)$$

де  $m_2$  – маса підрешітного класу, г;

$m_{2d}$  – маса підрешітного класу у вихідному матеріалі, г.

Процес апроксимації передбачає попередній вибір виду прийнятної для апроксимації кривої.

Таблиця 1.3

Зв'язок масових часток вихідного продукту і вапняку в нижніх класах з розміром розділення  $d$

$m_{2d}/m$	27,19	34,18	41,75	52,63	65,06	80,97	100
$m_{u2d}/m$	11,05	14,44	17,52	23,54	30,87	41,97	55,85
$d$ , мм	2	5	7	10	20	40	80

Залежність  $E(d)$  може бути отримана шляхом формування аналітичних залежностей, що пов'язують зі значенням параметра  $d$  масу матеріалу  $m_{2d}(d)$ , а також масу вапняку  $m_{u2d}$  в нижніх класах крупності вихідного матеріалу. У відносних одиницях такі залежності матимуть вигляд  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$ , де  $m$  – маса вихідного матеріалу. Отримання таких аналітичних залежностей можливо шляхом апроксимації даних про вихідну сировину, представлених в табл.2.1. Задаючи різні рівні параметра  $d$  (верхні межі класів крупності в табл. 2.1), знайдемо масові частки вихідного продукту крупністю, що не перевищує значення  $d$  ( $m_{2d}/m$ ), а також вапняку ( $m_{u2d}/m$ ). Результати зведені в табл. 1.3. Звернемо увагу на той факт, що в табл. 1.3 значення  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$  представляють собою накопичену (кумулятивну) суму масових часток класів, крупність яких не перевищує значення  $d$ . Апроксимуючи зв'язок між змінними регресійною залежністю, отримаємо аналітичні залежності  $m_{2d}/m(d)$  і  $m_{u2d}/m(d)$ .

Підбір прийняттого виду аналітичної залежності здійснювався шляхом вибору із сукупності функцій системи MathCAD такої, що найбільш повно відповідає розташуванню експериментальних точок, наведених в табл. 1.3. Виявилось, що для обох залежностей прийнятна ступенева функція виду  $Y = aX^n + b$ . Звернення до функції *pwzfit* системи MathCAD дозволило отримати наступні регресійні залежності:

$$A := 0.558; \quad d := 2, 3, \dots, 58$$

$m_2, m_1$  - маса часток  
верхнього та нижнього  
класів крупності в  
вихідному матеріалі

$$m_2(d) := \frac{(22.403d^{0.347} - 0.675)}{(100)}$$

$$mu_2(d) := \frac{(7.962d^{0.448} - 0.271)}{(100)}$$

$mu_1, mu_2$  - маса вапняку  
в надрешетному та  
підрешетному продуктах

$$mu_1(d) := A - mu_2(d) \quad m_1(d) := 1 - m_2(d)$$

$$Y_2(d) := m_2(d) \quad Y_1(d) := 1 - Y_2(d) \quad E_g - \text{ефективність грохочення}$$

$$E_g := 0, 0.2, \dots, 1 \quad i := 0, 1, \dots, 10 \quad Y_s, Y_{s2} - \text{виходи надрешітного та підрешітного продуктів}$$

$$Y_S(d, E_g) := Y_1(d) + (1 - Y_1(d)) \cdot (1 - E_g)$$

$B, B_2$  - вміст вапняку в  
надрешітному та  
підрешітному продуктах

$$B(d, E_g) := \frac{[mu_1(d) + (A - mu_1(d)) \cdot (1 - E_g)]}{Y_S(d, E_g)}$$

$$B_2(d, E_g) := \frac{[A - [mu_1(d) + (A - mu_1(d)) \cdot (1 - E_g)]]}{1 - Y_S(d, E_g)}$$

$$EP_1(d, E_g) := Y_S(d, E_g) \cdot \frac{B(d, E_g)}{A}$$

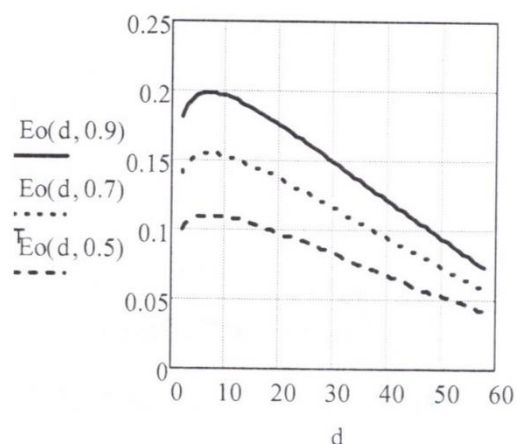
$EP_1, EP_2$  - вилучення  
вапняку в надрешітний та  
підрешітний продукти

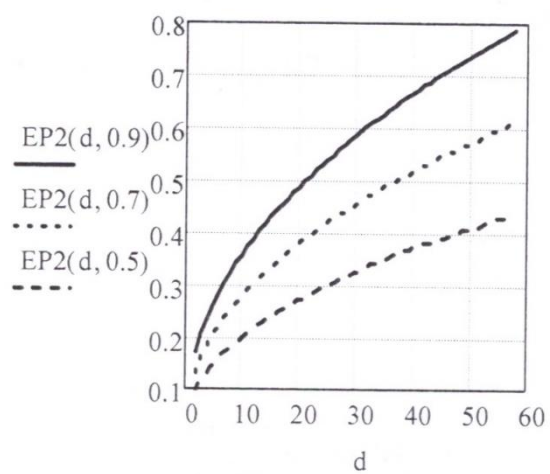
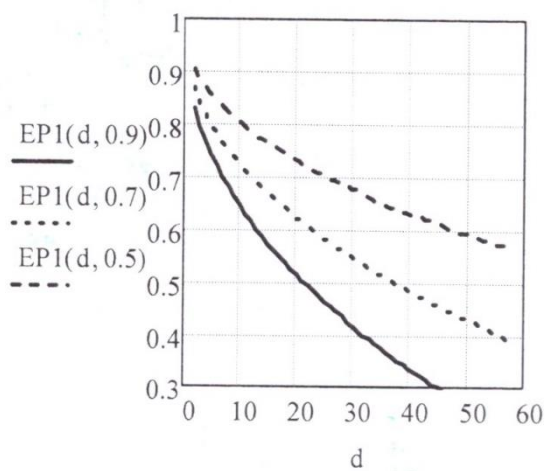
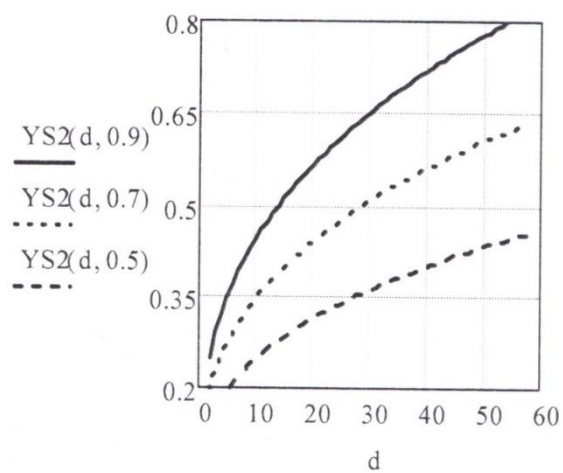
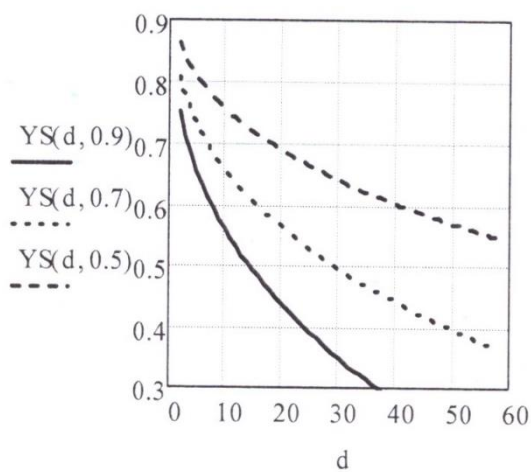
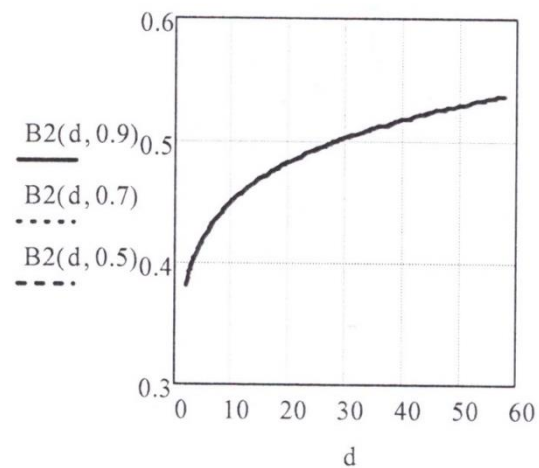
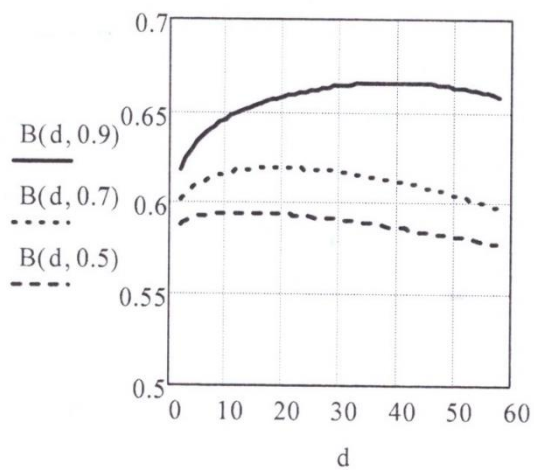
$$EP_2(d, E_g) := 1 - EP_1(d, E_g)$$

$$E_o(d, E_g) := \frac{(EP_1(d, E_g) - Y_S(d, E_g))}{1 - A}$$

$E_o$  - ефективність збагачення

$$Y_{S2}(d, E_g) := 1 - Y_S(d, E_g)$$





## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дьяконов В. MathCAD 8/2000: специальный справочник. СПб: Издательство «Питер». 2000г. 592 с.
2. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981, 184с.
3. Pilov P.I., Dreshpak A.S. Mathematical model for predicting limestone enrichment indicators. *Int. journal of energy for a clean environment*, vol. 18, № 4. Connecticut. 2017. P. 319–333 (Scopus).
4. Сладков А.С. Подготовка флюсов к доменной плавке. Москва, Металлургия, 1976. 300 с.

## Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії

$$X := \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad Y1 := \begin{pmatrix} 26.8 \\ 43 \\ 6.8 \\ 32.7 \end{pmatrix} \quad Y2 := \begin{pmatrix} 31.35 \\ 52.2 \\ 18.9 \\ 51.9 \end{pmatrix} \quad Y3 := \begin{pmatrix} 81.9 \\ 81.3 \\ 37. \\ 38.2 \end{pmatrix} \quad Y4 := \begin{pmatrix} 86 \\ 89.9 \\ 63.5 \\ 75.8 \end{pmatrix}$$

$$(X^T \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{pmatrix}$$

$$B1 := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y1$$

$$B2 := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y2$$

$$B3 := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y3$$

$$B4 := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y4$$

## Коефіцієнти регресії

$$B1 = \begin{pmatrix} 27.325 \\ 10.525 \\ -7.575 \end{pmatrix}$$

$$B2 = \begin{pmatrix} 38.588 \\ 13.463 \\ -3.188 \end{pmatrix}$$

$$B3 = \begin{pmatrix} 59.6 \\ 0.15 \\ -22 \end{pmatrix}$$

$$B4 = \begin{pmatrix} 78.8 \\ 4.05 \\ -9.15 \end{pmatrix}$$

$$Yes := X \cdot B1$$

$$Yen := X \cdot B2$$

$$Yes = \begin{pmatrix} 24.375 \\ 45.425 \\ 9.225 \\ 30.275 \end{pmatrix}$$

$$Yen = \begin{pmatrix} 28.313 \\ 55.238 \\ 21.938 \\ 48.863 \end{pmatrix}$$

$$Y_{\text{eg3}} := X \cdot B3$$

$$Y_{\text{eg4}} := X \cdot B4$$

$$Y_{\text{eg3}} = \begin{pmatrix} 81.45 \\ 81.75 \\ 37.45 \\ 37.75 \end{pmatrix}$$

$$Y_{\text{eg4}} = \begin{pmatrix} 83.9 \\ 92 \\ 65.6 \\ 73.7 \end{pmatrix}$$

$$E1 := Y1 - \text{Yes}$$

$$E1 = \begin{pmatrix} 2.425 \\ -2.425 \\ -2.425 \\ 2.425 \end{pmatrix}$$

$$E1^2 = \begin{pmatrix} 5.881 \\ 5.881 \\ 5.881 \\ 5.881 \end{pmatrix}$$

$$3 \sum E1^2 = 70.567$$

### Остаточні дисперсії

$$3 \left( \sum Y1^2 - 4 \cdot \sum B1^2 \right) = 70.567$$

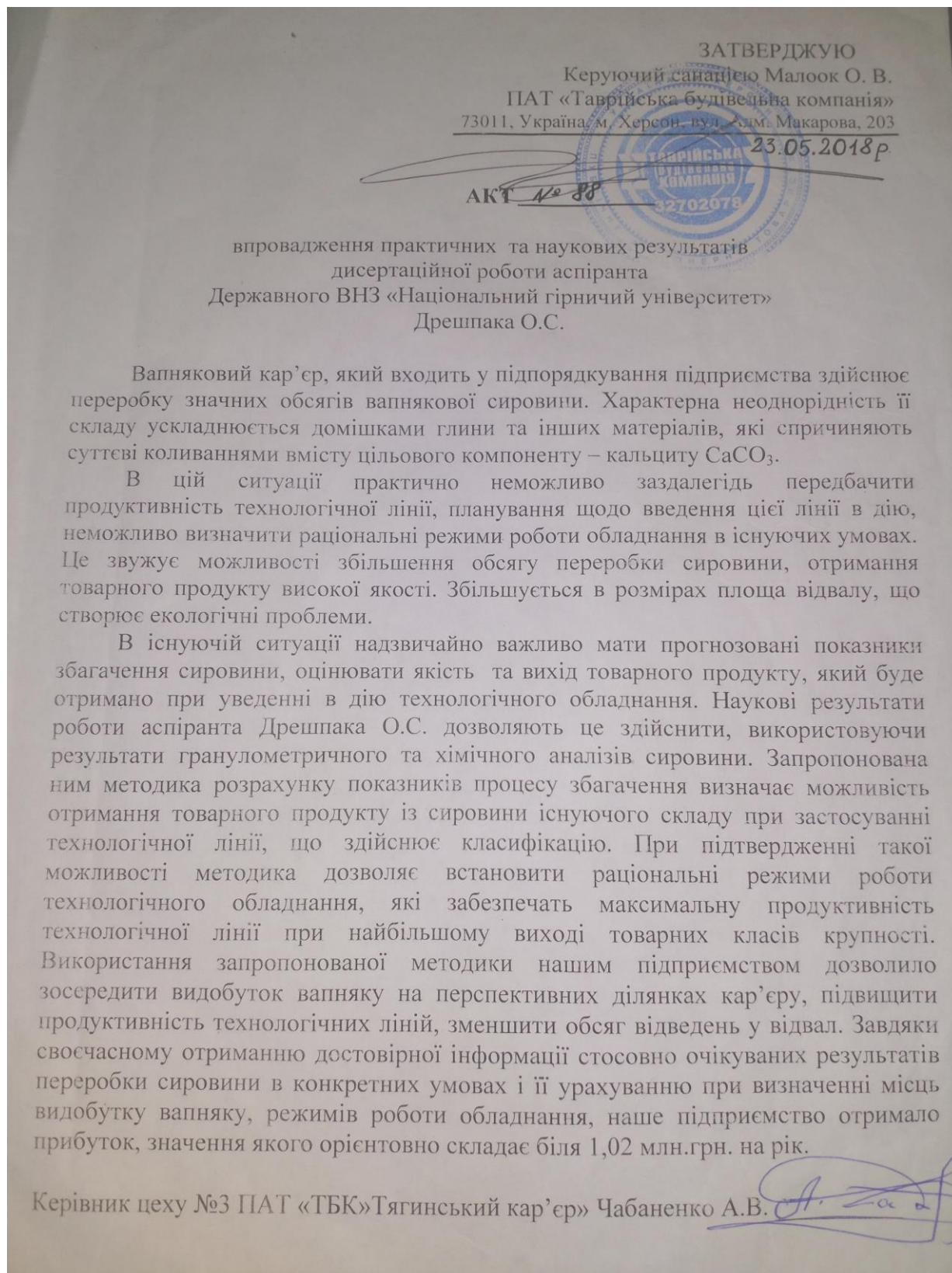
$$3 \left( \sum Y2^2 - 4 \cdot \sum B2^2 \right) = 110.717$$

$$3 \left( \sum Y3^2 - 4 \cdot \sum B3^2 \right) = 2.43$$

$$3 \left( \sum Y4^2 - 4 \cdot \sum B4^2 \right) = 52.92$$



## Акт впровадження результатів дисертаційної роботи №1



## Додаток Д

## Акт впровадження результатів дисертаційної роботи №2

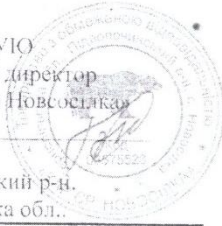


ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
**«КАР'ЕР НОВОСІЛКА»**

47874, Україна, Тернопільська область, Підволочиський район, с. Новосілка. П/р 26006339101792 в  
 Тернопільському ОУ Ощадбанку, МФО 338545, ІПН 035755219120, свід. № 26577321, ЄДРПОУ 03575528

Вх. № 104  
 від 10.04.2018р.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Генеральний директор  
 ТОВ «Кар'єр Новосілка»  
 Марин Б.С.  
 с.Новосілка  
 Підволочиський р-н.  
 Тернопільська обл.



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
 аспіранта Дрешпак О.С.

Підприємство здійснює переробку сировини неоднорідного карбонатного родовища з метою її збагачення і отримання характеристик, що відповідають товарному продукту. Досвід застосування технологічних ліній збагачення свідчить про те, що навіть досвідчені технологи не в змозі заздалегідь прогнозувати результати переробки, очікувані показники якості продукції. Це ускладнює роботу підприємства, часто приводить до відхилень реальних показників якості продукції від нормованих значень.


Методика прогнозування показників збагачення сировини, розроблена аспірантом Дрешпак О.С., дозволяє на основі обмеженої кількості експериментальних досліджень і виконаних розрахунків здійснювати прогнозування важливих параметрів процесу збагачення, пов'язуючи їх значення з характеристиками сировини, а також режимами роботи пристроїв класифікації.

Розрахунки забезпечують:

- Попередню оцінку якості товарного продукту та продуктивності технологічної лінії в заданих умовах;
- Вибір перспективних ділянок для видобутку сировини, виходячи із обсягів замовлення продукції підприємства та вирішення екологічних проблем регіону;
- Визначення раціонального режиму класифікації.

Впровадження методики на нашому підприємстві дозволило реалізувати ефективні технічні та управлінські рішення і забезпечило виконання виробничих завдань з мінімальними фінансовими витратами. Економічний ефект склав близько 500 тис.грн на рік.

Головний інженер  
 ТОВ «Кар'єр Новосілка»



Генгало В.М.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Публікації у закордонних 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).

*Публікації у фахових виданнях:*

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. Науково-технічний збірник Збагачення корисних копалин. Дніпро, 2016. вип. 64(105). С. 59-68.

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

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

*Матеріали конференцій:*

6. 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. Заочна форма участі.

7. Дрешпак О.С. Визначення залежностей вапнякової сировини Західно-Тягинського 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. Заочна форма участі.

8. 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. Очна форма участі.

9. 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. Очна форма участі.

*Інші видання:*

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

11. 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.

12. 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.