

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

( повна назва факультету)

кафедри металургійне обладнання

(повна назва кафедри )

## ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

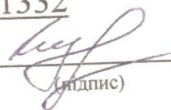
на тему «Дослідження конструктивно - технологічних параметрів

процесу дроблення в дробарках ударної дії»

Виконав: магістрант групи 6.1332

Кулік Д.Ю.

(ПІБ)

  
(підпис)

спеціальності 133 Галузеве машинобудування»  
(шифр і повна назва)

спеціалізація

(шифр і повна назва)


освітньо-професійна програма

133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і повна назва)

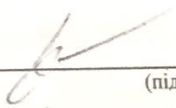
Керівник Шевченко І.А.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Запоріжжя – 2023 року







ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри А.О.Власов  
"\_\_\_\_\_" 2023 року

## ЗАВДАННЯ ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Кулік Дмитро Юрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Дослідження конструктивно - технологічних параметрів процесу дроблення в дробарках ударної дії  
керівник роботи: Шевченко І.А., к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом вищого навчального закладу від "09" 10 2023 року №1581-с
- Термін подання студентом роботи 10.12.23
- Вихідні дані до роботи: Технологічні вимоги до процесу подрібнення крихких матеріалів; ефективність процесу дроблення дробарками ударної дії; моделювання процесу дроблення дробаркою ударної дії. Інші вихідні дані вибираються магістрантом самостійно на підставі аналізу джерел інформації за темою дослідження.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Стан питання щодо робочого процесу та конструкцій дробарок ударної дії. 2. Теоретичні дослідження за темою роботи; 3. Експериментальні дослідження за темою роботи.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових складових): Графічний матеріал має бути кількістю не більш 8 одиниць плакатів, на яких розкривається суть магістерської роботи.

### 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

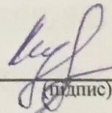
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Шевченко І.А.		
2	Шевченко І.А.		
3	Шевченко І.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примі
1	Узгодження і затвердження теми та змісту роботи	01.09 -17.09.2023	
2	Збирання матеріалу, опрацювання літературних джерел та нормативних документів	17.09-30.09.2023	
3	Виконання вступу роботи	01.10-05.10.2023	
4	Виконання основної частини роботи та проведення експериментальних досліджень	06.10-19.11.2023	
5	Підготовка висновків	20.11-24.11.2023	
6	Оформлення магістерської роботи	25.11-05.12.2023	
7	Рецензування магістерської роботи	01.12- 07.12.2023	
8	Попередній захист роботи	Згідно графіку	
9	Захист роботи у ДЕК	Згідно графіку	

Студент

  
(підпис)

Кулік Д.Ю.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Шевченко І.А.  
(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Кулік Д.Ю. Дослідження конструктивно - технологічних параметрів процесу дроблення в дробарках ударної дії .

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник І.А. Шевченко. Інженерний навчально-науковий інститут запорізького національного університету ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра «Металургійне обладнання», 2023.

В роботі на основі аналізу стану питання по темі дослідження обґрунтовані конструктивно-технологічні параметри процесу дроблення у молотковій дробарки та підвищення його ефективності.

Ключові слова: ДРОБАРКА, МОЛОТОК, УДАР, ПОТУЖНІСТЬ, СТУПІНЬ ПОДРІБНЕННЯ.

## ABSTRACT

Kulik D.Yu. Study of structural and technological parameters of the crushing process in impact crushers.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree in the specialty 133 - Industrial mechanical engineering, scientific supervisor I.A. Shevchenko. Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University named after Yu.M. Potebny ZNU, department "Metallurgical equipment", 2023.

In the work, based on the analysis of the state of the issue on the topic, research and substantiation of the structural and technological parameters of the hammer crusher, the improvement of the efficiency of the crushing process for the fractional preparation of limestone in the production of agglomerate is substantiated.

CRUSHER, HAMMER, IMPACT, POWER, DEGREE OF CRUSHING.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	6
ВСТУП .....	8
1 СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТА КОНСТРУКЦІЙ ДРОБАРОК УДАРНОЇ ДІЇ .....	10
1.1 Підготовка вапняку у виробництві агломерату .....	10
1.2. Стислий огляд законів дроблення .....	12
1.2.1 Область застосування процесів дроблення крихких матеріалів.....	16
1.3 Аналіз особливостей процесу руйнування сировини у дробарках ударної дії та шляхи його вдосконалення .....	20
1.3.1 Досвід експлуатації дробарок ударної дії .....	21
1.3.1.1 Досвід експлуатації молоткових дробарок .....	21
1.3.1.2 Досвід експлуатації роторних дробарок .....	28
1.3.1.3 Досвід експлуатації дробарок ударно-відцентрового типу .....	31
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ .....	36
2.1 Вплив факторів подачі матеріалу у молоткову дробарку на ефективність використання робочої поверхні відбійної плити .....	36
2.2 Взаємодія подрібнюваних частинок з робочими органами молоткової дробарки .....	44
2.2.3 Вплив швидкості руху подрібнювального матеріалу на процес руйнування частинок в дробарці ударної дії .....	53
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ ОДИНИЧНИМ УДАРОМ .....	57
3.1 Опис лабораторних досліджень .....	57
3.2 Аналіз результатів експерименту .....	59
ВИСНОВКИ .....	67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А.....	72
ДОДАТОК Б.....	73

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$n$	число обертів ротора за хвилину
$z$	кількість рядів молотків
$R$	радіус кола осей підвісу молотка
$l$	довжина молотка
$h_m$	висота молотка
$b_1$	товщина ніжки молотка
$l_1$	довжина ніжки молотка
$s$	ширина молотка
$\beta$	кут повороту ротора за час удару
$R_{зовн}$	зовнішній радіус ротора
$D_p$	діаметр робочої зони ротора
$D$	діаметр кола підвісу молотка
$v_p$	окружна швидкість ротора
$ZC$	відстань від осі ротора до точки контакту молотка зі шматком
$v_m$	швидкість молотка до удару
$v_m'$	швидкість молотка після удару
$v_{m2}$	швидкість молотка наприкінці удару
$v_{чз}$	швидкість частки після зіткнення
$J_m$	момент інерції молотка
$i$	ступінь подрібнення матеріалу
$d_{cp}$	середній діаметр частинок подрібнювального матеріалу після дроблення вільним ударом
$F_{уд}$	сила удару
$\Delta l_2$	деформація шматка матеріалу під час удару молотками
$A$	Робота
$\rho$	питома вага матеріалу

$\sigma_p$  теоретичне значення межі міцності матеріалу  
 $v$  об'єм тіла, що деформується  
 $E$  модуль Юнга



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Щорічно в світі декілька мільярдів тонн різних сипких матеріалів, таких як корисні копалини, цемент, мінеральні добрива тощо піддають дробленню і подрібненню. Одним з визначальних чинників, що впливають на ефективність подрібнення, є спосіб руйнування матеріалів, одним із поширених з яких є руйнування матеріалів вільним ударом.

Один із перспективних напрямів у пошуку більш досконалих конструкцій дробарок, принцип роботи яких засновано на ударній дії, для підвищення їх надійності, зниження енергоспоживання ґрунтується на аналізі рівнянь кінетики подрібнення мінеральної сировини, що враховує основні положення механіки руйнування твердих тіл.

Тому дослідження конструктивно-технологічних параметрів процесу дроблення матеріалів у молотковій дробарці з метою інтенсифікації процесу подрібнення крихких матеріалів з одночасним зниженням енергетичних витрат і покращенням якості продукції є актуальним завданням.

*Мета роботи.* Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дробарки ударної дії на основі дослідження по визначенню впливу швидкості руху сипкого матеріалу на процес руйнування частинок в дробарках ударної дії, які знаходять широке розповсюдження на металургійних підприємствах України.

Завдання дослідження:

- аналіз конструкцій молоткових дробарок та особливостей реалізації технологічних операцій дроблення;
- дослідження математичної моделі взаємодії ударних органів з матеріалом в молотковій дробарці;
- експериментальне дослідження процесу дроблення ударом та його аналіз.

*Предмет дослідження:* основні динамічні, кінематичні та технологічні показники процесу подрібнення матеріалів під час його реалізації.

*Об'єкт дослідження:* Конструктивні елементи молоткової дробарки з процесами, що впливають на продуктивність та якість дроблення матеріалу.

*Методи дослідження.* Для досягнення мети використано комплекс сучасних загальнонаукових методів:

- *теоретичних:* аналіз нормативної документації, патентів, матеріалів; використання закономірностей і методів теоретичної механіки, опору матеріалів, класичної теорії подрібнення і математичного аналізу.
- *емпіричних:* моделювання, теоретичний обчислювальний експеримент, лабораторні дослідження.

Ступінь достовірності результатів забезпечена використанням апробованих методів дослідження, поєднанням методів теоретичного і експериментального аналізу, збіжністю даних фізичного моделювання і теоретичних досліджень.

*Апробація роботи.* Матеріали основних положень магістерської роботи доповідались на XVI університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених (17-22 квітня 2023 року), ЗНУ.

*Структура та обсяг магістерської роботи.* Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 72 сторінках машинописного тексту, містить 4 таблиці, 25 рисунків, список використаних джерел з 28 найменувань.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТА КОНСТРУКЦІЙ ДРОБАРОК УДАРНОЇ ДІЇ

## 1.1 Підготовка вапняку у виробництві агломерату

Чорна металургія – дуже матеріаломістке виробництво, яке потребує різної сировини. На виготовлення 1 т чавуну витрачається не менш ніж 1,5 т залізної руди, 1,2–1,5 т коксівного вугілля, понад 0,5 т флюсових вапняків, 150 кг вогнетривкої глини і до 30 м<sup>3</sup> води. Для одержання високоякісної сталі з певними властивостями також потрібні легуючі метали: марганець, хром, молібден, нікель, кобальт, ванадій та інші.

Відомо [14] суттєвий вплив крупності вапняку, обпаленого в циклонній печі (3-0 мм) та одержуваного в кільцевій печі (3-12 мм), на показники спікання агломерату. При однаковій мірі випалу вапно циклонної печі забезпечує збільшення на 6-7% швидкості спікання агломерату, підвищення на 6-7% виходу класу плюс 5 мм після випробування агломерату в барабані Рубіна та зменшення на 7-8 % виходу класу мінус 0,5 мм, що обумовлено не лише меншою крупністю вапна циклонної печі, але й більшою її активністю. Вплив крупності вапна підтверджено і дослідженнями [3, 4], що дозволяє збільшити вертикальну швидкість спікання агломерату від 15 до 37 %, а при вмісті 40 % дрібної залізної руди і високої дисперсності вапна (90 % класу мінус 0,074 мм) знизити її вміст до 1% [28].

Дроблення виконують з метою розкриття зростків для вивільнення зерен корисного компонента з грудок корисних копалин. Процеси дроблення, подрібнення і грохочення належать до основних операцій рудопідготовки. Дроблення і подрібнення є найбільш енергоємними і дорогими процесами у циклі збагачення корисних копалин. Капітальні та експлуатаційні витрати на них можуть сягати 70 % усіх затрат на збагачення. Тому удосконалення дробильного і подрібнювального обладнання, застосування найбільш

ефективних і економічних способів і схем підготовчих операцій мають важливе економічне значення.

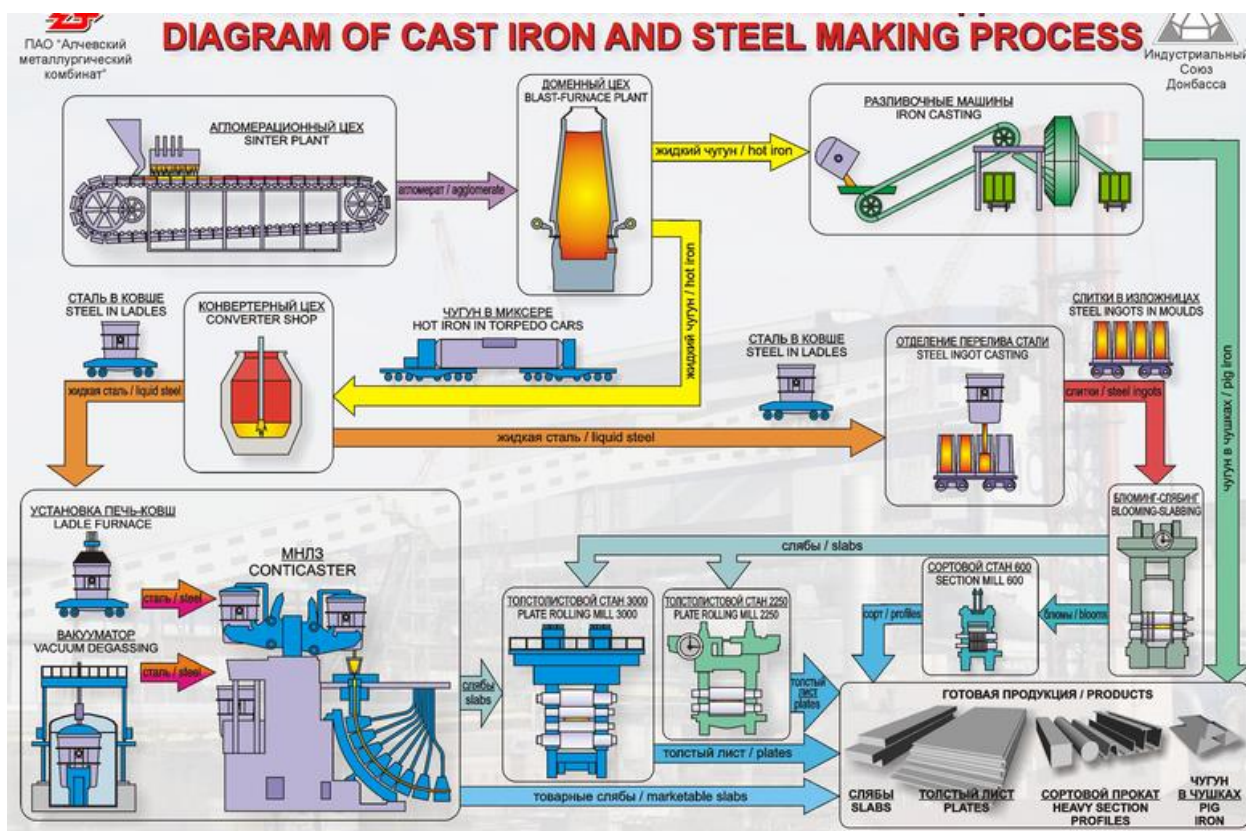


Рисунок 1.1 - Схема металургійного виробництва

Використання окискованої залізорудної сировини сприяє суттєвому підвищенню ефективності металургійних підприємств. Практика доменного виробництва показала, що, незважаючи на суттєве збільшення використання окатишів, основною залізорудною сировиною для доменних печей є офлюсований агломерат. Пояснюється це порівняно простою технологією виробництва та невисокими вимогами до гранулометричного складу вихідної сировини, її вологості та ін. У той же час слід зазначити, що агломерат має невисоку міцність і значний вміст дріб'язку. Так, вміст фракції 0 – 5 мм в агломераті різних фабрик досягає 10,2 - 26,0%, а при надходженні в доменний цех цей показник зростає до 11,1 - 26,5%. Значний вміст дріб'язку в агломераті суттєво погіршує техніко-економічні показники доменного

процесу. Підвищення якості агломерату та зменшення енерговитрат на його виробництво є основним завданням сучасних агломераційних підприємств України [1].

Технологічні функції основних флюсів з розвитком технологій суттєво розширюються. На рис. 1.1 приведена еволюція функцій флюсу на прикладі розвитку агломераційного виробництва. Найбільш поширеним видом флюсу є вапняк. Вимоги до вапняку встановлюють нижні межі вмісту  $\text{CaO}$  і  $\text{MgO}$ , верхні межі вмісту нерозчинного залишку, фосфору і сірки, а також розмір шматків. Вапняки, що поставляються на фабрики окускування повинні мати крупність 25 - 0 мм, так як вони все одно піддаються дробленню до 3 - 0 мм для виробництва агломерату і 0,1 - 0,3 мм – для виробництва офлюсованих окатишів. Вапняк спочатку дроблять в щоккових або конусних дробарках до необхідного розміру, потім промивають від глини та направляють на грохочення. Після цього дрібна фракція подрібнюється молоткових млинах до крупності 0 - 3мм (фракція 0 - 2мм складає більше 90%) та додають до складу агломераційної шихти [4]. Вапняк приймає участь в процесах мінералоутворення лише тоді, коли в шихті досягаються температури початку дисоціації вапняку ( $500^{\circ}\text{C}$ ).

## 1.2. Стислий огляд законів дроблення

Закони дроблення визначають роботу, яку виконують зовнішні сили при руйнуванні грудок корисної копалини, що дробиться. При дробленні мінеральні зерна руйнуються по найслабших перетинах (тріщинах, дислокаціях тощо). Робота, затрачувана на дроблення, частково витрачається на деформацію грудок, що руйнуються, частково витрачається на утворення нових поверхонь.

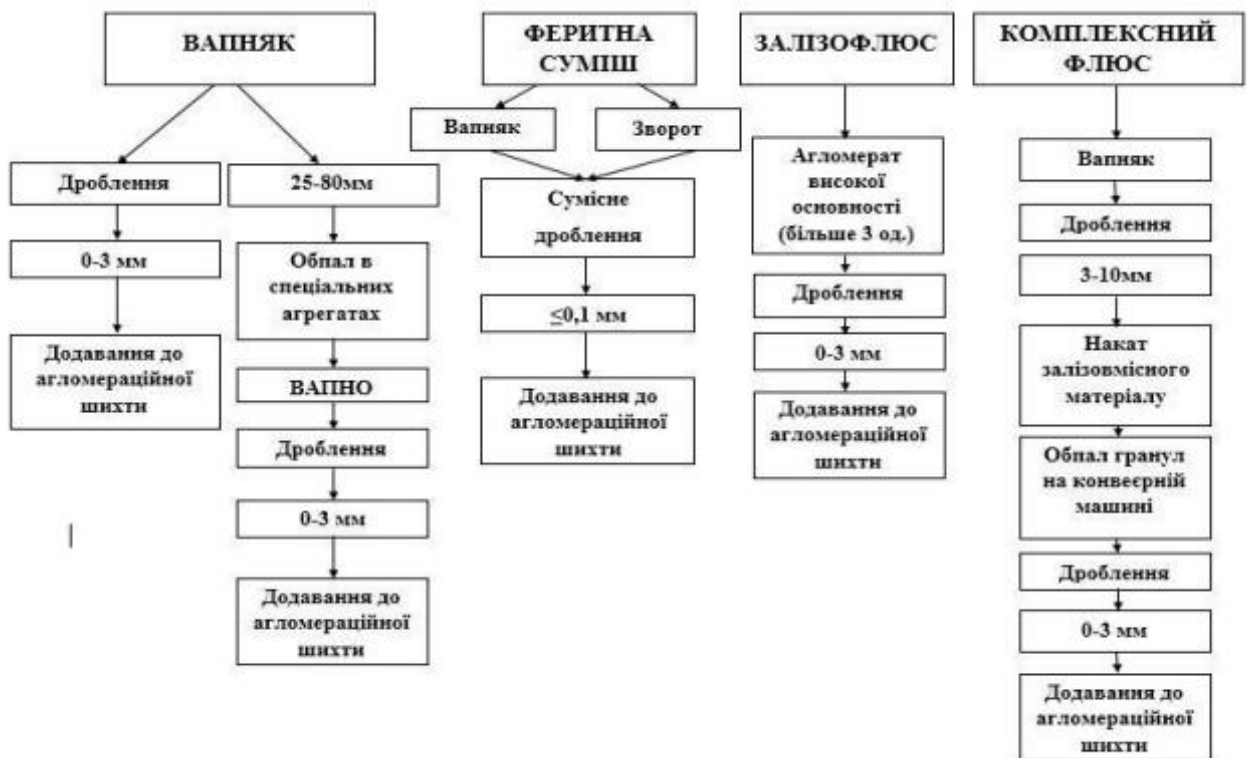


Рисунок 1.2 - Схема підготовки та використання різноманітних флюсів при виробництві агломерату [2]

В сучасній теорії і практиці дроблення і подрібнення використовують чотири основних закони (гіпотези), які є емпіричними [1, 3]:

1. Закон Ріттінгера (П. фон Ріттінгер, 1811–1872; Чехія - Австрія): робота, витрачена на руйнування зерна, пропорційна новій утвореній поверхні:

$$A = k_R D^2 \text{ або } A = k \Delta S \quad (1.1)$$

де  $k_R$  та  $k$  - коефіцієнти пропорційності;

$D$  - розмір грудки матеріалу, що дробиться;

$\Delta S$  - нова утворена поверхня.

2. Закон Кирпичова-Кіка (1874 - В. Л. Кирпичов, 1885 - Ф. Кік, 1840–1915; Австрія): витрата енергії на дроблення матеріалу пропорційна його об'єму або масі:

$$A = k_k D^3, \quad (1.2)$$

де  $k_k$  - коефіцієнт пропорційності.

3. Закон Ребіндера 1944 (П. А. Ребіндер): повна робота дроблення дорівнює сумі робіт деформацій і утворення нової поверхні:

$$A = k_R D^2 + k_k D^3, \quad (1.3)$$

тобто закон Ребіндера об'єднує два попередніх (Ріттінгера і Кіка-Кірпічова).

4. Закон Бонда Ф. Бонд, 1899 –1977; США): робота, затрачена на дроблення, пропорційна середньому геометричному об'єму і площі зерна, що руйнується:

$$A = k_k D^{2.5}, \quad (1.4)$$

де  $k_k$  - коефіцієнт пропорційності.

Інші гіпотези оснований на припущенні про зв'язок напруження на кінцях тріщин зерна і критичної довжини тріщини (гіпотеза 1920 А. Гріффітса, 1893–1963; Велика Британія).

Дроблення твердих матеріалів може бути здійснене такими методами:

- роздавлюванням;
- розколюванням;
- стиранням;
- ударом.

Подрібнення проводять шляхом роздавлювання (I), удару (II), стирання (III) та розколювання (IV).



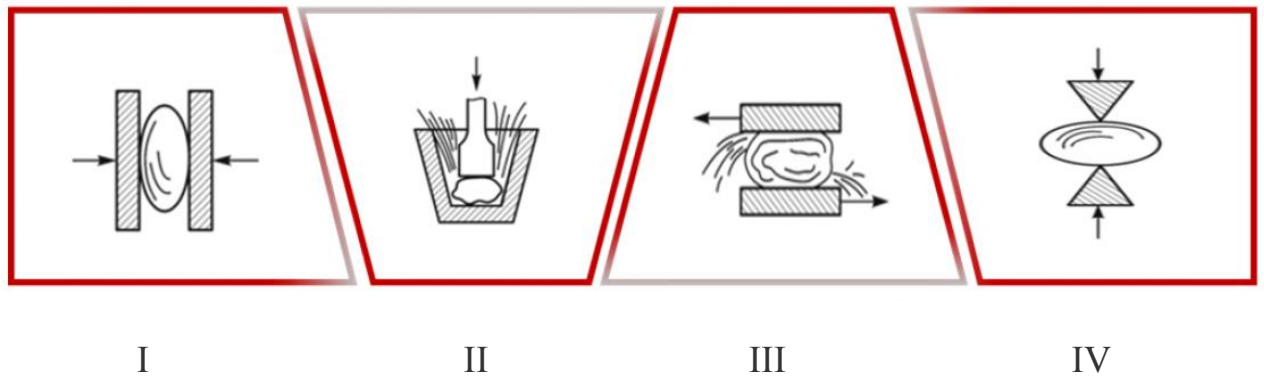


Рисунок 1.3 - Методи дроблення крихких матеріалів

Роздавлювання - руйнування грудки в результаті стиснення між двома подрібнюючими поверхнями. При дробленні роздавлюванням утворюється велика кількість дрібних зерен, особливо при дробленні крихких корисних копалин. Цей спосіб застосовують у випадку, якщо при дробленні корисної копалини допускається підвищений вихід дріб'язку.

Розколювання - руйнування грудки в результаті її розклинення між вістрями подрібнюючих поверхонь. Для розколювання характерним є мінімальне утворення дріб'язку, тому цей метод застосовують у випадках, коли переподрібнення небажане (наприклад, при підготовці вугілля до збагачення).

Стирання - руйнування грудки в результаті впливу двох поверхонь, які зміщаються одна відносно одної. Характерним є утворенням великої кількості тонких класів.

Удар - руйнування грудки в результаті впливу короткочасних динамічних навантажень. Дроблення ударом приводить насамперед до руйнування по тріщинах, поверхнях зіткнення, дислокаціях зерен окремих компонентів. Цей спосіб знаходить застосування при дробленні промислових продуктів і тонкому подрібненні корисних копалин.

За видом енергії, яку підводять до об'єкта руйнування, виділяють способи дроблення: вибухові, механічні, електричні, термічні, гідравлічні, акустичні, оптичні, радіаційні, хімічні, комбіновані. До нетрадиційних

зараховують такі методи дроблення: стиснутим середовищем, електрогідравлічним впливом, термообробкою тощо.

У більшості випадків відбувається комбінований вплив подрібнювальних зусиль, наприклад, роздавлювання з стиранням, удар з роздавлюванням та стиранням; іноді до основних зусиль приєднуються побічні-згинальні та розривні.

Спосіб подрібнення вибирають з урахуванням фізичних властивостей подрібнюваного матеріалу, насамперед його твердості та характеру зламу.

Для матеріалів, що відрізняються великою твердістю, більш ефективними є удар і роздавлювання, для в'язких матеріалів краще стирання, для крихких – розколювання.

Одним із найбільш істотних факторів, що характеризують процес подрібнення, є кількість енергії, яку необхідно витратити на подрібнення однієї тонни матеріалу. Чим більшу міцність має матеріал, що подрібнюється, тим більше енергії необхідно для подрібнення.

Для виконання операції дроблення використовують дробарки.

### 1.1.1 Область застосування процесів дроблення крихких матеріалів

Процеси дроблення і подрібнення широко застосовуються в різних галузях промисловості. Так, дробленню і подрібненню піддаються:

- 1) корисні копалини на збагачувальних фабриках (підготовчі операції перед збагаченням);
- 2) вугілля на електростанціях, що спалюють у пилоподібному стані;
- 3) вугілля на коксохімічних заводах, перед коксуванням;
- 4) вапняки і доломіти, що використовуються як флюси на металургійних заводах;
- 5) каміння, з метою виготовлення щебеню для промислового і дорожнього будівництва та ін.

Відомо [1], що на процеси дроблення і подрібнення твердих матеріалів витрачається п'ять відсотків усієї електроенергії, що виробляється в світі, з яких 5% – витрати, пов'язані з дробленням продукту, 64% – витрати, пов'язані з подрібненням продукту, решта (31%) – витрати, пов'язані з транспортуванням, сепарацією та ін.

Процеси дроблення (подрібнення) характеризуються ступенем дроблення (подрібнення), що визначається як відношення максимального розміру частинок у початковому продукті до максимального розміру частинок у вихідному продукті. Для отримання необхідного ступеня дроблення (подрібнення) традиційно застосовують багатостадійні схеми. Велика кількість стадій дроблення дозволяє отримувати продукт необхідної якості, проте призводить до значного збільшення енерго- та капітальних витрат, через необхідність в машинах дроблення, подрібнення, транспортування і сепарації на кожній стадії. Різновиди дроблення наведені в таблиці 1.1.

Враховуючи високу енерговитратність саме процесу подрібнення, і прагнення до зниження кількості стадій дроблення і подрібнення представляється перспективним зниження максимальної крупності вихідного продукту на останніх стадіях (середня та дрібна) дроблення за рахунок створення сучасних машин дроблення, що матимуть більший діапазон дроблення (різницю між крупністю початкового і одержуваного продукту) при тому самому рівні енергоспоживання.

Дані, щодо граничних розмірів початкового й одержуваного продуктів дроблення і подрібнення, в залежності від стадії, є нормованими і наведені в табл. 1.1 [2].

Таблиця 1.1 - Стадії дроблення і подрібнення [1, 3, 12]

Дроблення			Подрібнення		
Стадія	Крупність продуктів, мм		Стадія	Крупність продуктів, мм	
	початкового	дробленого до		початкового	дробленого до
Крупне Дроблення	1200 – 500	350 – 100	Грубе подрібнення	40 – 10	5
Середнє дроблення	350 – 100	100 – 40	Тонке подрібнення	5	0,01
Дрібне дроблення	100 – 40	40 – 10	Надтонке подрібнення	5	0,002

Ступінь дроблення, що досягається в окремій стадії, називають частковим, а у всіх стадіях — загальним. Загальний ступінь дроблення дорівнює добутку ступенів дроблення в окремих стадіях. Число стадій дроблення і подрібнення залежить від фізико-механічних властивостей корисної копалини, вкраплення корисного мінералу і крупності, що допускається подальшим процесом збагачення.

При крупному дробленні роботу дроблення визначають за В.Кірпічовим; при дрібному - за П.Ріттінгером, при середньому - за Ф.Бондом.

У сучасних вітчизняних дослідженнях процесу руйнування мінералів при їх подрібненні (Горобець Л. Ж.) показано зв'язок показників подрібнення з акустоемісійними характеристиками матеріалів при навантаженні стиском; доводиться, що утворена поверхня подрібненого продукту при диспергуванні на мікрорівні визначається величиною критичної щільності енергії руйнування, яка зростає в міру зменшення розміру об'єкта, що руйнується, так що добуток щільності енергії на розмір руйнування залишається постійним; при цьому характеристики

гранулометрії подрібнених продуктів підкоряються закономірностям геометричної прогресії для ряду характерних розмірів частинок. Показники подрібнення прогноуються на підставі комплексу функціональних та кореляційних зв'язків параметрів та закономірностей процесів подрібнення, деформування, руйнування й акустичного випромінювання при руйнуванні з використанням дискретно-хвильового і концентраційного критеріїв відповідно мікро- та макроруйнування.

З теорії збагачення відомо [1,2], що на середній та дрібній стадіях дроблення використовуютьпологоконусні, валкові дробарки та дробарки ударної дії (роторні, молоткові, ударно-відцентрові з вертикальним валом робочого органа).

Принциповою відмінністю наведених дробарок є спосіб руйнування зерен початкового продукту.

Так, для валкових тапологоконусних дробарок це – роздавлювання; для дробарок ударної дії це – удар.

При дробленні роздавлюванням у порівнянні з ударним руйнуванням селективність матеріалу значно нижча, що призводить до погіршення параметрів подальшого збагачення.

Дробарки ударної дії відрізняються між собою механізмом руйнування:

- 1) дроблення відбувається при контакті матеріалу з робочим органом і відбивною поверхнею: це роторні горизонтальні дробарки, молоткові. Недоліком таких дробарок є інтенсивний знос робочих органів і відбивної поверхні, особливо під час подрібнення абразивних матеріалів;
- 2) дроблення відбувається в полі відцентрових сил при контакті частинок матеріалу з відбивною поверхнею і між собою: це ударно-відцентрові дробарки з вертикальним валом робочого органа (далі ударно-відцентрові дробарки). При такому механізмі дроблення спостерігається менший знос робочого органа і відбивної поверхні (завдяки самофутеровці) та підвищення якості подрібненого матеріалу.

Таблиця 1.2 - Результати порівняльних випробувань дробарок [1].

Показник	Ударно-відцентрова Дробарка	Пологоконусна дробарка	Валкова дробарка
Продуктивність за готовим продуктом, т/год	32	32	20
Питоме енергоспоживання на тонну продукту, кВт·год/т	3,42	4,14	3,72

Результати порівняльних випробувань [1, 4] ударно-відцентрової,пологоконусної та валкової дробарок (при однаковому початковому продукті (гравій) і його крупності) наведені в табл. 1.2, із якої видно, що доцільно використовувати й удосконалювати машини дроблення саме ударно-відцентрової дії.

### 1.2 Аналіз особливостей процесу руйнування сировини у дробарках ударної дії та шляхи його вдосконалення

Одним з визначальних чинників, що впливають на ефективність подрібнення, є спосіб руйнування матеріалів.

Переваги ударного подрібнення описані в [22, 25]. Умовою подрібнення матеріалу є достатня для руйнування швидкість частинок, при чому, необхідно враховувати зміну кута атаки частинок, притаманну більшості подрібнювачів ударної дії.

Більшість гірських порід при механічній дії ведуть себе як крихкі тіла. Раніше вважалося, що міцність мінералів не залежить від швидкості їх вантаження. У експериментах [25] було виявлено помітний вплив швидкості зіткнення на механічні властивості гірських порід.

### 1.2.1 Досвід експлуатації дробарок ударної дії

Дробарки ударної дії - дробарки, в яких матеріал руйнується за рахунок кінетичної енергії рухомих тіл. За будовою основного дробильного органу дробарки ударної дії підрозділяються на молоткові і роторні.

Дробарки ударної дії використовуються для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів не тільки низької і середньої, але й підвищеної міцності. До переваг дробарок ударної дії слід віднести простоту конструкції, надійність, компактність, велику продуктивність, високий ступінь дроблення (20 і більше) та порівняно невеликі питомі витрати електроенергії. Тому вони широко застосовуються для дроблення кам'яного вугілля, коксової шихти, вапняку, руд чорних, кольорових, рідкісних і благородних металів, калійних солей, баритових, флюоритових і азбестових руд, будівельних матеріалів.

До переваг дробарок ударної дії слід віднести високу продуктивність, високі ступені дроблення, меншу масу і менші питомі витрати електроенергії в порівнянні з дробарками інших типів. Недоліки цих дробарок полягають у великому зносі молотків і необхідності використання живильників для рівномірного завантаження.

#### 1.3.1.1 Досвід експлуатації молоткових дробарок

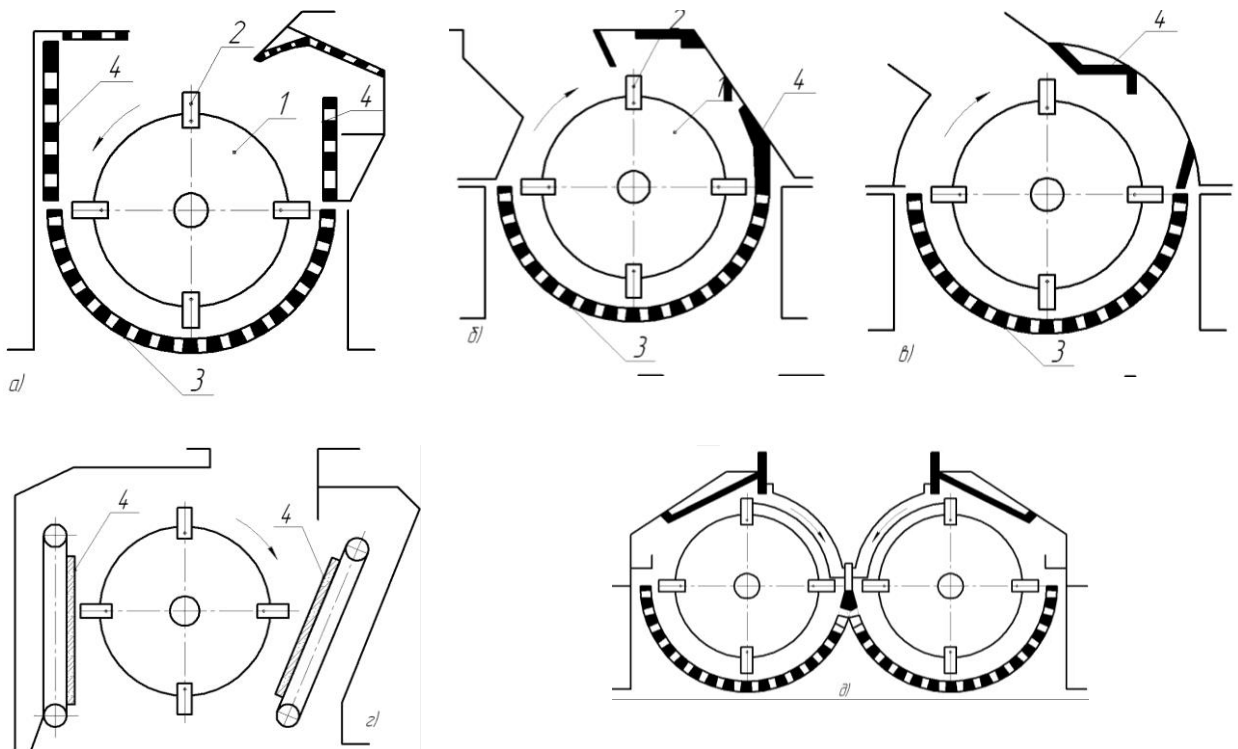
Молоткова дробарка - це механізм призначений для подрібнення сировини, шляхом удару про молотки і броні в помольної камери. Визначальною особливістю молоткових дробарок є шарнірне кріплення на валу бив або молотків [19]. Дана особливість молоткових дробарок дозволяє підвищити ресурс помольних органів, а також збільшити ККД дробарки. У цьому полягає основна відмінність молоткових дробарок від роторних, конструкція яких передбачає жорстке кріплення бив до ротора.



ТОВ «ЗАВОД ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ «ПРОГРЕС» (Харків)

виготовляє наступні молоткові дробарки [9]:

- дробарка молоткова однороторная неререверсивная: ДМ-4х3, ДМ-6х4, ДМ-8х6, ДМ-10х8, ДМ-13х11;
- молоткова дробарка реверсивна: ДМР-8,8х6, ДМР-9х10, ДМР-10х10, ДМР-14,5х13, ДМР-15х15;
- молоткова дробарка з рухомою плитою: ДМПП-8х6, ДМПП-12х5, ДМПП-12х10;
- дробарка молоткова типу СМД: СМД-112, СМД-114, СМД-504(СМД-147).



1 - ротор, 2 - молоток, 3 - колосники, 4 - відбивна плита

Рисунок 1.4 - Типи молоткових дробарок:  
а - дробарка з центральним завантаженням,  
кокосниковими ґратами та відбійною відбивною плитою;  
б, в - те саме з бічним завантаженням;  
г - теж тільки з відбійними плитами; д - двороторна дробарка з  
кокосниковими ґратами та відбійними плитами [1].

У молоткових і роторних дробарках дроблення матеріалу здійснюється шляхом завдання йому ударів робочим органами, що рухаються. У молоткових дробарках удари наносяться молотками, шарнірно підвішеними на роторі, що обертається з великою швидкістю. Сила удару створюється силою тяжіння молотка.

Ступінь дроблення в роторних і молоткових дробарках доходить до 30 - 40 і вище, а питома витрата енергії на дроблення нижче, ніж у дробарках, що працюють за іншим принципом. Молоткові та роторні дробарки відрізняються великою продуктивністю, що припадає на одиницю їх сил тяжіння.

Дробарка EV (Данія) [8] зменшує кар'єрний розмір шматків вапняку (що досягають 2,5 м і важать до 5 тонн) до млинового завантаження (25 мм) за 1 операцію. Це означає, що рівень подрібнення дробарки 1:100.

Виробнича потужність варіюється від 2200 тонн на годину з вихідними ґратами і до 2500 тонн на годину без вихідних ґрат.

Потужності двигуна зазвичай варіюються в межах 500 - 2500 кВт.

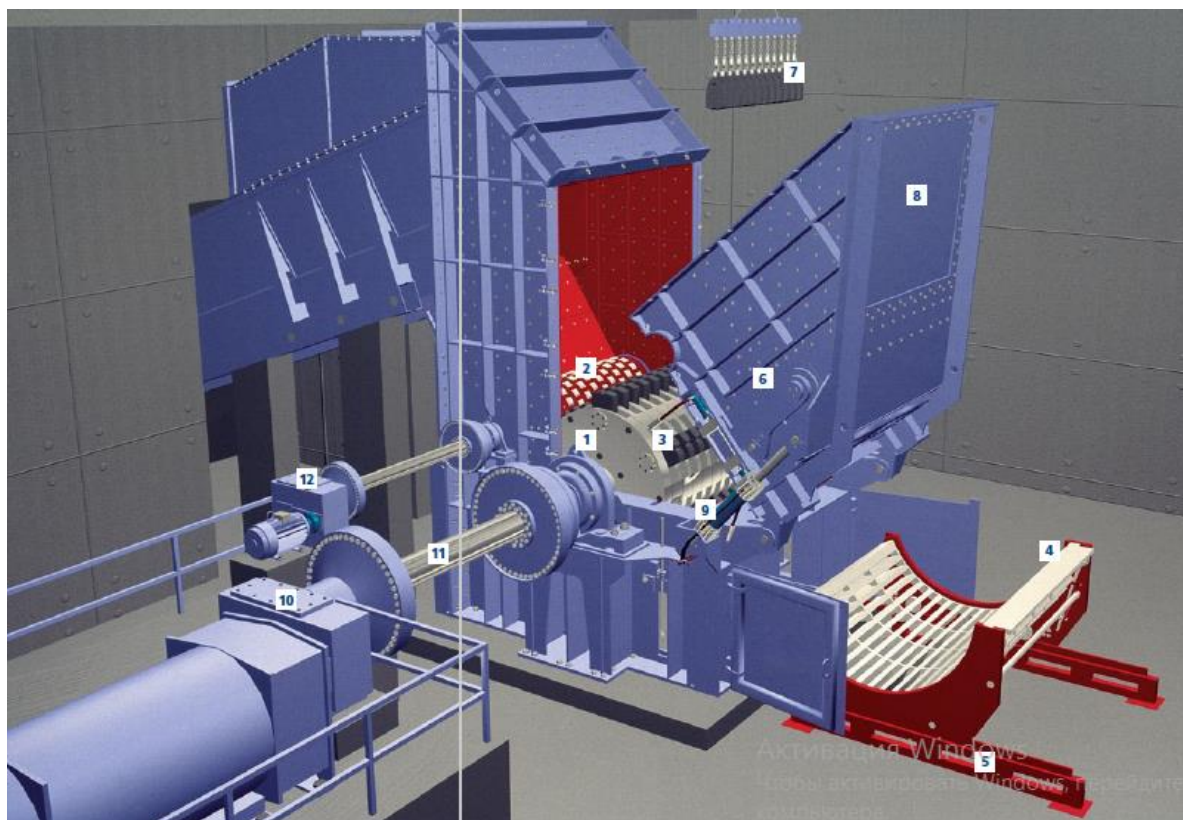
Первинне дроблення здійснюється за допомогою удару, тоді як вторинне відбувається за допомогою стирання та роздавлювання між молотками та відбійною плитою, і далі між молотками та вихідним колосниковими ґратами. Таким чином, гарантується дія навіть на дрібні частинки і негабаритний матеріал не залишає дробарку.

Ряди молотків встановлені у шаховому порядку, щоб повністю перекрити перетин вихідної решітки. Розташування молотків забезпечує кілька точок удару на сировинний матеріал залежно кількості рядів молотків. Це збільшує загальну ефективність дробарки.

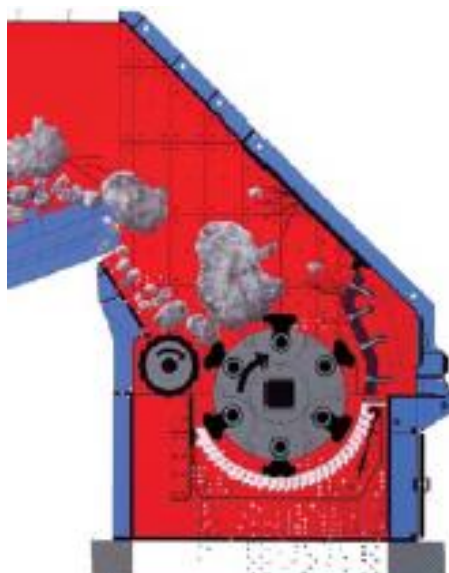
Молотки шарнірно закріплені на наскрізних осях та мають симетричну форму. Вони можуть бути легко перевернуті для зміни робочої та неробочої поверхонь, щоб забезпечити максимальний термін служби. Відсутність обмеження кругового ходу молотків на осях знижує енергію удару при

контакті між матеріалом і молотком, тим самим захищає ротор і корпус дробарки.

Відстань між молотками та відбійною плитою та відстань між молотками та вихідними ґратами може бути відрегульована, щоб компенсувати зношування молотків. Це дозволяє молоткам втратити більше 30% їхньої початкової ваги без істотної зміни гранулометричного складу продукту.



- 1 - ротор молотка; 2 - вхідний валок; 3 – молотки; 4 - вихідні ґрати;  
5 - рейки для висування решітки; 6 - регулювання відбійної плити;  
7 - запасні молотки; 8 - верхня частина;  
9 - гідроциліндри для відкриття верхньої частини; 10 - основний блок приводу; 11 - мембранна муфта; 12 - блок приводу, вхідний валок.



Пластинчатий живильник і один вхідний валок



Вібраційний живильник з клосниковими секціями і двома вхідними валками

Рисунок 1.5 - Молоткова ударна дробарка EV (Данія) [8]

Ударні дробарки і Metso Nordberg серії NP (Фінляндія, [11]) призначені для використання в сучасних умовах, що характеризуються постійним зростанням вимог до завантаження та продуктивності машин.

Таблиця 1.3 - Технічні дані ударної дробарки NORDBERG серії NP [11]

	Завантажувальне вікно	Максимальна потужність живлення	Максимальна встановлена потужність
NP1313	1 320 x 1 225 мм	900 мм	250 кВт (350 к.с.)
NP1415	1 540 x 1 320 мм	1000 мм	315 кВт (400 к.с.)
NP1620	2 040 x 1 634 мм	1 300 мм	500 кВт (700 к.с.)
NP2023	2 310 x 1 986 мм	1500 мм	1 200 кВт (1 600 к.с.)
NP1110	1 020 x 820 мм	600 мм	200 кВт (250 к.с.)
NP1520	2 040 x 995 мм	700 мм	500 кВт (700 к.с.)
NP13	1 320 x 560 мм	350 мм	315 кВт (400 к.с.)
NP15	1 540 x 600 мм	400 мм	355 кВт (450 к.с.)

Обладнання характеризується унікальним конструктивним поєднанням обтяженого ротора, дробильної камери та зносостійких матеріалів виконання.

Такий підхід підвищує продуктивність дробарки та якість виробленого продукту, додатково знижуючи операційні витрати. Оптимальні характеристики при експлуатації на першій, другій та третій стадіях дроблення.

Ударні дробарки Nordberg серії NP є чудовим рішенням при все більш суворих вимогах до продуктивності та пропускної спроможності. Можлива експлуатація за різних умов: від роботи в кар'єрі до гірничо-збагачувальних підприємств та комбінатів із переробки вторинної сировини. Замовник має можливість вибрати набір характеристик дробарки відповідно до своїх потреб, доповнивши його такими опціями, як повністю гідравлічна система регулювання відбійних плит, третя відбійна плита або ударні балки.

Система ротора самостійного обертання, доступна для всіх дробарок серії NP, є ще одним результатом безперервних зусиль компанії Metso, спрямованих на розробку інноваційних рішень та покращення якості, простоти експлуатації та безпеки обладнання. Нова система автоматизації для дробарок серії NP (IC2000) надає користувачу точну та комплексну інформацію про робочі показники процесу.

Незалежно від абразивності матеріалу, ефективність роботи дробарок серії NP залишається на високому рівні за рахунок використання ударних балок, виконаних з різних типів сталі та чавуну з можливістю комплектації керамічними вставками.

Дробарки серії NP мають унікальну систему кріплення ударних плит, які в поєднанні з чудовою центровкою по контактних поверхнях поперечки, знижують ризик поломки і дозволяють розширити спектр традиційного використання чавунних ударних плит. Ротор з високим інерційним моментом покращує ступінь дроблення та забезпечує стабільність процесу, знижуючи при цьому енергоспоживання та покращуючи робочі показники у довгостроковій перспективі.

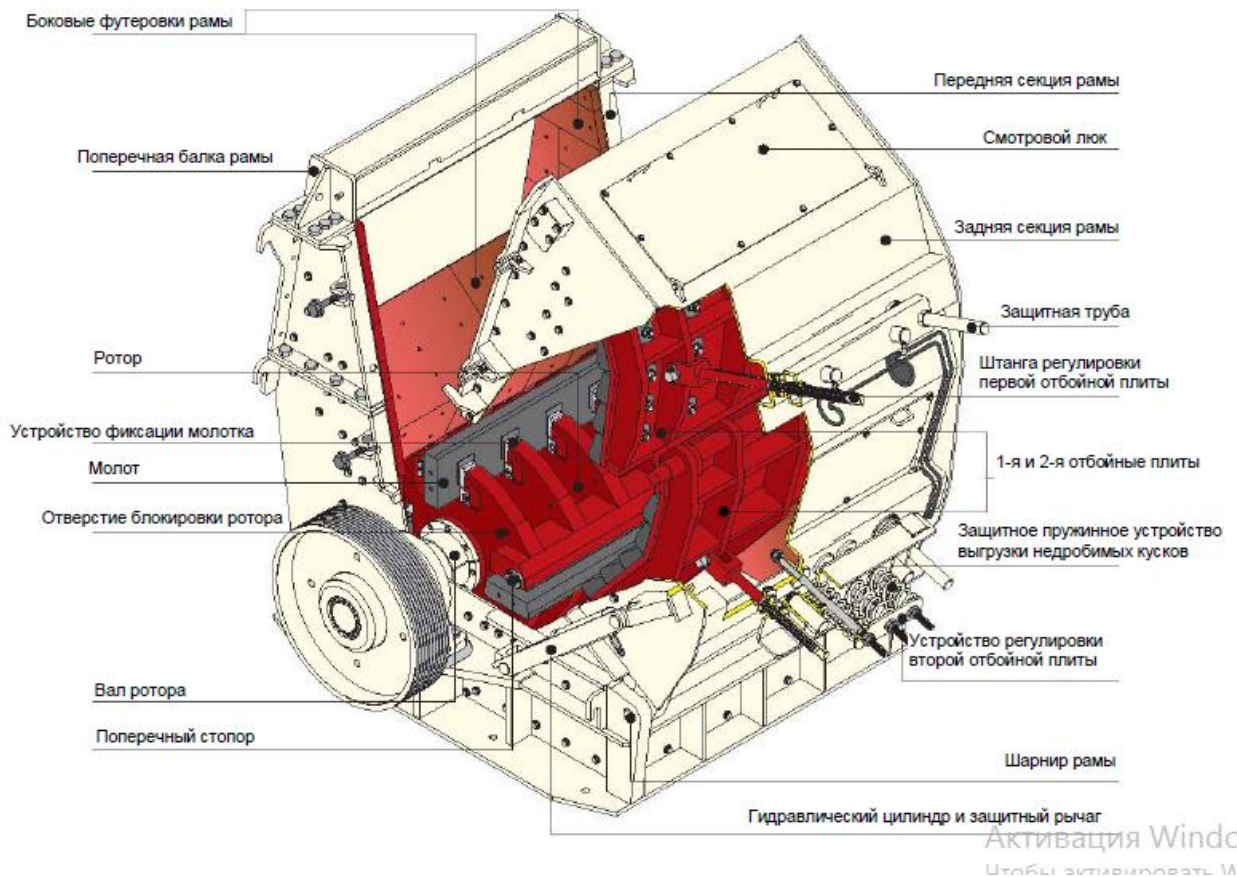


Рисунок 1.6 - Основні деталі та вузли дробарки Metso Nordberg серії NP (Фінляндія) [12]

Поряд із використанням різних видів зносостійкої сталі, ударні дробарки серії NP мають унікальні системи кріплення молотків.

Молотки фіксуються на роторах за допомогою одного клинового вузла, що дає момент затягування, який не досягається на дробарках інших виробників. Разом з ідеальним встановленням молотків на контактних поверхнях роторів дана система дає гарантію того, що між ротором та молотками не залишається зазорів. Цим знижується ризик пошкодження молотків та розширюється можливість використання чавуну для молотків.

Графіки продуктивності ударної дробарки є інструментом, який допомагає належним чином використовувати можливості дробарки серії NP.

Наведені значення продуктивності відносяться до матеріалу щільністю 1600 кг на кубічний метр.

Дробарка є одиницею обладнання ланцюга машин.



Тому, її продуктивність частково залежить від правильного підбору та роботи живильників, конвеєрів, гуркотів, конструкцій, що несуть, електродвигунів, деталей.

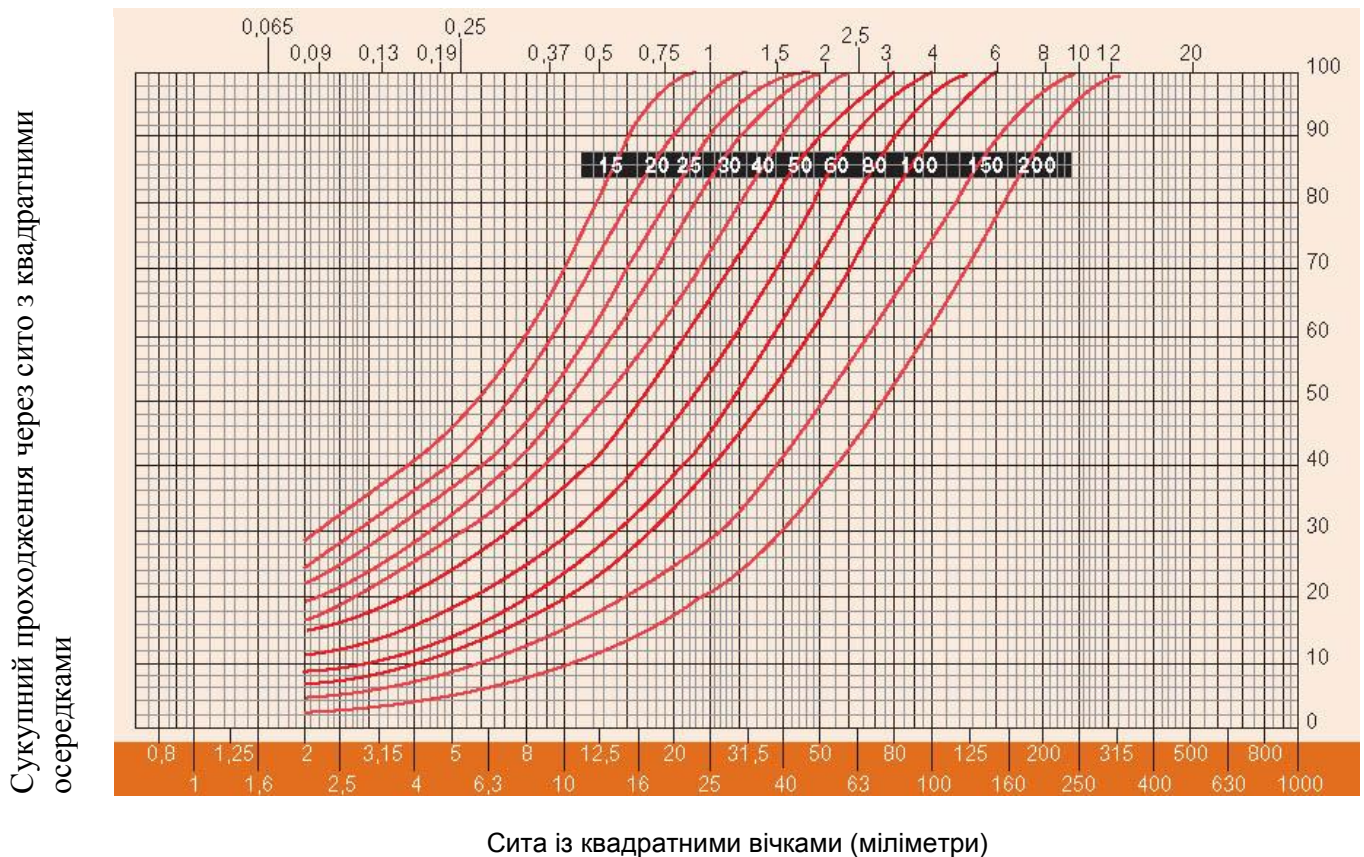


Рисунок 1.7 - Значення гранулометричного складу продукту та продуктивності дробарки від гранулометричного складу сировини, щільності та подрібнення матеріалу.

### 1.3.1.2 Досвід експлуатації роторних дробарок

Дробарки призначені для середнього та дрібного дроблення гірських порід з коефіцієнтом фортеці за шкалою М.М. Протод'яконова до 8.

Основні переваги роторних дробарок к – компактність; простота конструкції та експлуатації; надійність у роботі. Слід зазначити переваги роторних дробарок: врівноваженість маси ротора, що обертається, що не вимагає спеціальних фундаментів при встановленні дробарки; виготовлення



футеровки корпусу та елементів, що дроблять з матеріалів і сплавів, стійких до зносу. Широкий типорозмірний ряд роторних дробарок дозволяє варіювати продуктивність від 5 до 70 т/год, крупність від 80 до 250 мм та енергоємність процесу від 11 до 75 кВт (див. табл. 1) [10]. Корпус дробарки повністю футерований. Біла двостороння – при зношуванні однієї сторони перевертаються іншою стороною. Заміна зносу бил займає близько 10 хвилин. Останнім часом впроваджується конструкція біла з безболтовим кріпленням.

Таблиця 1.4 - Технічні характеристики роторних дробарок

Тип	ДР 4x2	ДР 4x4	ДР 6x6	ДР 7x6	ДР 8x8
Крупність вихідного продукту, мм.	до 80	до 100	до 150	до 200	до 250
Продуктивність, т/год	до 5	до 10	до 30	до 40	до 70
Діаметр ротора, мм	400	400	600	700	800
Число рядів бил, шт.	4	4	4	4	4
Частота обертання ротора, об/хв	до 80	до 80	до 80	до 80	до 80
Встановлена потужність, кВт	11,0	18,5	37,0	45,0	75,0
Габаритні розміри, мм					
Довжина	1780	1780	2270	2520	3520
Ширина	780	980	1310	1310	1640
Висота	1100	1100	1600	1640	2180
Маса, кг	820	1155	2820	3130	7300

Роторні дробарки ефективні в операціях середнього та дрібного дроблення для наступних матеріалів: вапняк, доломіт, мармур, гіпс, черепашник, руди малої абразивності та інші подібні матеріали. Характеристики крупності матеріалу до і після дроблення представлені рис. 1.8.

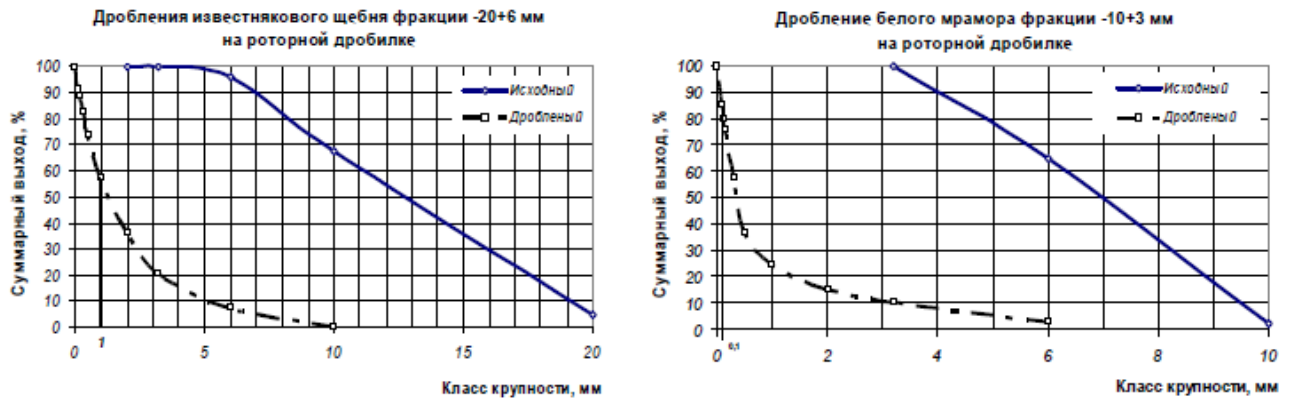


Рисунок 1.8 - Характеристика крупности материалу до та після дроблення

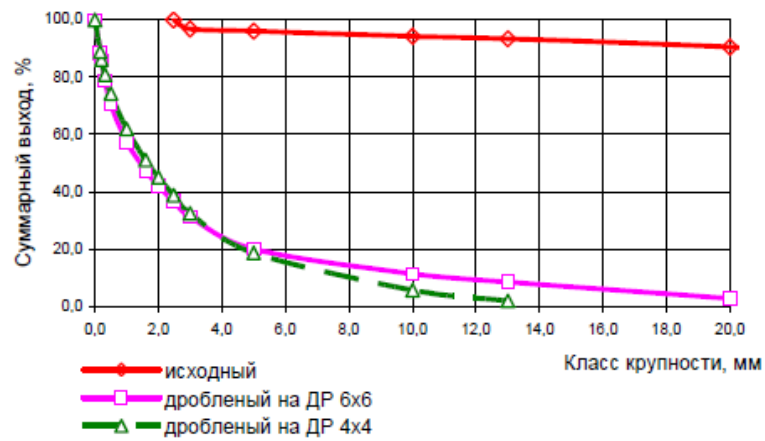


Рисунок 1.9 - Порівняльний гранулометричний склад вихідного та подрібнених продуктів при дробленні на роторних дробарках ДР 4x4 та ДР 6x6 ( $V= 30$  м/с, зазор 10/10 мм)

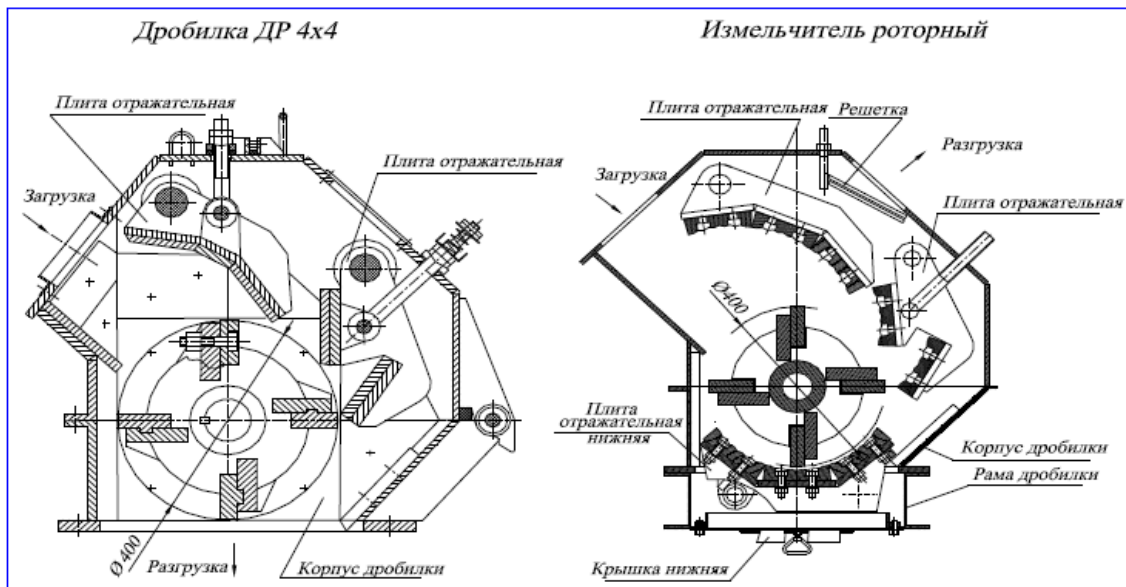


Рисунок 1.10 - Конструктивні особливості дробарки ДР 4x4 та подрібнювача роторного [10, 13]

### 1.3.1.3 Досвід експлуатації дробарок ударно-відцентрового типу

В останні роки почали широко використовуватись дробарки та млини (дезінтегратори) ударно-відцентрового типу, особливо на дрібних стадіях дроблення та подрібнення. Вони дозволяють поєднувати кілька стадій дезінтеграції, мають у порівнянні з іншими типами нижче енергоспоживання за високого ступеня отримання дрібного продукту [4-6], що дуже важливо при підготовці гірничої маси до збагачення [12]. На сьогодні ударно-відцентрові дезінтегратори серійно випускаються заводами багатьох компаній США, Швеції, Німеччини, Нової Зеландії, Чехії, Фінляндії. Випускаються різні типи та типорозміри цих машин, що відрізняються за продуктивністю, і для порід різної фортеці. Проте кінематично вони різняться незначно. Крупність кінцевого продукту цих машин значною мірою залежить від часу подрібнення та частоти обертання ротора, яка визначає силу ударного імпульсу частинок гірничої маси, що розганяються, про перешкоду, що і визначає основний принцип роботи машин цього типу. При

цьому в камері дроблення або подрібнення шматки гірської маси наводяться в рух розгінними ребрами, що обертаються (лопатками або билами) і дробляться, ударяючись з великою швидкістю об відбійні плити камери. За цим принципом створені конструкції поділяються на дві основні групи, в одній з яких реалізований принцип руйнування при ударі шматка гірської породи об метал броні камери, а в другий удар відбувається про шматки породи, що знаходяться в спеціальних кишнях робочої камери. Таке рішення пов'язане з різним ступенем абразивності порід, зносом броні робочої камери та від характеру зіткнення. За цим принципом значною мірою визначається область використання дезінтегратора для порід різної міцності та абразивності. Загальним для обох варіантів виконання є той факт, що руйнація шматків гірської маси при ударі досягається тоді, коли стискаючі напруги в ньому перевищують допустимі для породи, що переробляється, а загальним недоліком - високий знос лопаток і камери, який носить ударно абразивний характер.

Відомо, що опір гірничої маси прикладеному зусиллю при руйнуванні пропорційно до кількості енергії механічного впливу. Причому ця залежність зберігається за будь-яких видів напруги або механізму впливу в процесі руйнування порід. Відомий закон Реттінгера встановлює пропорційність між витратою енергії при подрібненні та утвореною площею поверхні руйнування, яка не залежить від характеру механічного впливу. Тому при однакових показниках руйнування гірської породи підведена енергія процесу є постійною величиною, що безпосередньо пов'язана з межею міцності породи. Цей факт враховується в процесі створення або модернізації обладнання шляхом максимальної можливості застосування енергії для руйнування зразків породи, забезпечуючи при цьому мінімізацію механічного впливу на робочий орган машини. Такий підхід підвищує експлуатаційні, технологічні та економічні показники, а також вартість. Досягається це не тільки підвищенням характеристик міцності вузлів машини або поліпшенням її кінематики, але і врахуванням механізму

руйнування з переважанням дотичних напруг. Такий підхід ґрунтується на обліку теорії руйнування міцних руд Кулоном, який переконливо довів, що максимальні дотичні напруження у зразку, при яких починається його руйнація, значно менше напруги при стисканні зразка. Отриманий критерій руйнування гірських порід Кулона вказує на переважне використання деформацій зсувів при реалізації механізму дезінтеграції гірських порід. Дія нормальних і дотичних напруг у площині руйнування гірських порід докладно вивчена Навьє. В результаті теорії Кулона - Навьє та незліченних результатів досліджень багатьма вченими [4], а також на підставі досвіду експлуатації подрібнювального обладнання встановлено [5], що, якщо міцність гірської породи на стиск у кілька разів вища, ніж при зрушенні, то і енергоємність її руйнування при дезінтеграції за механізмом реалізації зсувних деформацій буде значно меншим. Існуючі на сьогодні методи розрахунків деформування твердих тіл враховують цей важливий висновок. Розроблена теорія пружності показує, що модуль будь-якого матеріалу на стиск в три рази вище за його модуля на зсув. Але при дослідженнях міцності гірських порід на стиск та зсув отримані співвідношення такого підвищення більш ніж у 10 разів. В цьому випадку необхідно враховувати вплив об'ємного модуля стиснення, коли при точковому додатку сили до зразка деформації стиснення в зоні дії сили перешкоджає навколишній об'єм. Тому, чим дрібніша кускуватість гірської породи, що переробляється, тим менше зусилля для її подрібнення і енергоємність процесу.

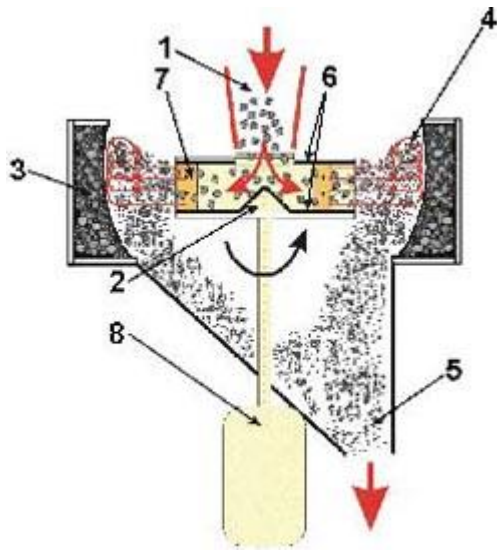
Особливістю робочого процесу ударно-відцентрової дробарки є те, що процес подачі і розгону подрібнюваного матеріалу характеризується значними зовнішніми збурюючими впливами через наявність незбалансованої маси, що призводить до зміщення центра мас і відповідне зміщення фактичної осі обертання відносно геометричної, що виводить робочий орган зі стану збалансованості, викликає підвищення вібрацій машини, згинальні коливання її елементів, та призводить до передчасного зносу підшипників.

Принцип дії ударно-відцентрової дробарки (рис. 1). Матеріал подається зверху конвеєром у завантажувальний отвір 1 (рис. 1), звідки падає у прискорювач 2. Падіння шматків матеріалу на конус прискорювача переводить шматки горизонтальний рух. Прискорювач обертається двигуном 8 і створює відцентрову силу, що діє на шматки матеріалу, які пройшовши каналами прискорювача вилітають в камеру подрібнення. По периферії камери подрібнення зроблені рудні кишені 3, в яких залягають шматки цього матеріалу, але менших розмірів, вони створюють ліжку самофутеровки, в яку ударяються шматки подрібнювального матеріалу 4, що вилетіли з прискорювача. Відбувається зіткнення «каменів» та його руйнація. Дроблений матеріал 5 під дією сили тяжіння падає вниз і вивантажується. Для забезпечення достатнього ресурсу прискорювача 2 його канали захищаються швидкозношуваними елементами, які можна замінювати в міру зносу: підкладні листи 6 (верхні і нижні), конус, лопатки 7. Лопатки разом з внутрішніми стінками каналу створюють кишені футеровки в самому прискорювачі, що також знижує знос та підвищує ресурс.

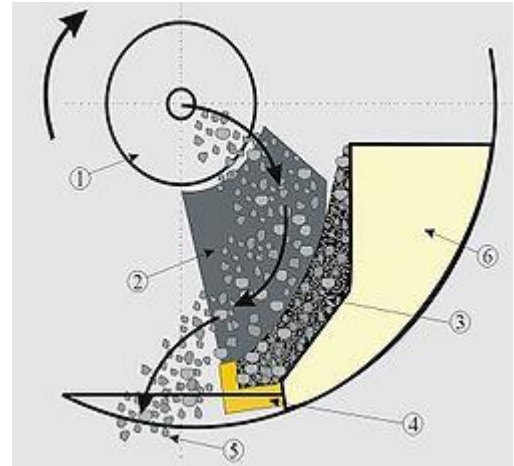
Геометричний розмір робочого органа, розташування опорних вузлів, об'єм та характер завантаження матеріалу дозволяє зробити припущення, що загальному вигляді ударно-відцентрова дробарка являє собою важке тіло, що швидко обертається [2] навколо своєї вісі симетрії і опирається одним кінцем цієї вісі на площину, тобто може розглядатися як механізм, що має властивості гіроскопа.

Характерною особливістю гіроскопа є те, що при короткочасній дії зовнішніх сил (різкий удар) вісь гіроскопа майже не змінює свого напрямку в просторі; вона лише починає тремтіти, здійснюючи коливання навколо середнього положення. Внаслідок тривалої дії зовнішніх сил на гіроскоп його вісь обертання буде змінювати свій напрямок в просторі, але відхилення вісі буде здійснюватися не в напрямку дії прикладеної сили, а під прямим кутом до цього напрямку. Це явище має назву гіроскопічний ефект.

Врахування впливу гіроскопічного ефекту на робочий орган ударно-відцентрової дробарки дає можливість точніше розрахувати критичну швидкість через врахування підвищення жорсткості системи внаслідок опору робочого органа поворотам площини обертання.



а)



б)

Рисунок 1.11 – а) Принципова схема ударно-відцентрової дробарки з вертикальним валом робочого органу;  
б) Принципова схема прискорювача відцентрово-ударної дробарки [12, 14]



## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ

### 2.1 Вплив факторів подачі матеріалу у молоткову дробарку на ефективність використання робочої поверхні відбійної плити

В дробарках ударної дії матеріал руйнується під дією механічного удару, при якому кінетична енергія рухомих тіл повністю або частково переходить в енергію їх деформації і руйнування. В результаті удару билем або молотком частинка матеріалу руйнується, її осколки розлітаються і відкидаються на колосникові грати, створюючи камеру подрібнення. Ударяючись об колосникові грати, матеріал додатково подрібнюється і, відбиваючись, знову потрапляє під дію ротора. Це повторюється багато разів, поки частки матеріалу, досягнувши певних розмірів, не вийдуть крізь колосникові грати на розвантаження. В деяких випадках матеріал, отримавши удар, починає обертатися довкола свого центру тяжіння з швидкістю, близькою до швидкості робочого органу дробарки, і руйнується, оскільки при цьому від дії відцентрових сил в шматку матеріалу виникає напруження, яке перевищує межу міцності при розтягуванні (наприклад, деревини впоперек волокон). Критичний розмір шматка матеріалу, при якому починається його руйнування, визначається за експериментальною формулою [17]:

$$d_{2кр} = 2,3 \cdot 10^{-6} \frac{\sigma_p}{\rho v_p^{1,5}}, \quad (2.1)$$

де  $d_{2кр}$  - критичний діаметр матеріалу, що подається на подрібнення, м;

$v_p$  - швидкість удару, що дорівнює лінійній швидкості ротора, м/с;

$\sigma_p$  - границя міцності матеріалу при розтягуванні, Па;

$\rho$  - щільність матеріалу, що подрібнюється, кг/м<sup>3</sup>.

Якщо шматок матеріалу буде мати розмір, менший за критичний, то при даних умовах він не піддається подрібненню. Для молоткових дробарок основним критерієм для розрахунків є критична лінійна швидкість молотка, при якій можливе руйнування матеріалу заданої величини. Швидкість ротора вибирається залежно від заданого максимального розміру продукту подрібнення і характеристики матеріалу - границі міцності матеріалу при розтягуванні і його щільності [17]:

$$v_{кр} = \sqrt[2]{\left(\frac{\sigma_p}{\rho d_2}\right)^2}, \quad (2.2)$$

де  $v_{кр}$  - критична лінійна швидкість ротора, при якій можливе руйнування матеріалу заданої величини, м/с;

$d_2$  - діаметр матеріалу, що подається на подрібнення, м.

Знаючи мінімально необхідну для руйнування матеріалу лінійну швидкість молотка, можна визначити необхідну для руйнування частинки матеріалу кутову швидкість молотка як [17]:

$$\omega = \frac{v}{R_{max}}, \quad (2.3)$$

де  $\omega$  - необхідна для руйнування частинки матеріалу кутова швидкість молотка, рад/с;

$R_{max}$  - радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка, м.

Радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка  $R_{max}$  визначається відповідно до конструктивних розмірів молотка. Для цього необхідно задатись такими конструктивними розмірами молотка, як довжина  $a$ , ширина  $b$  і товщина  $\delta$ . Тоді відстань від центра маси молотка до осі отвору (при умові одного отвору на молотці) визначається як [17]:

$$c = \frac{a^2 + b^2}{6a}, \quad (2.4)$$

де  $c$  - радіус від центра маси молотка до осі отвору, м;

$a$  - довжина молотка, м;

$b$  - ширина молотка, м.

Щоб на вал вальниці дробарки не передавалися ударні імпульси від молотків, квадрат радіусу інерції молотка  $r_c$  відносно його точки підвісу до диска повинен визначатися як [17]:

$$r_c^2 = \frac{a^2 + b^2}{12}, \quad (2.5)$$

де  $r_c$  - радіус інерції молотка відносно його центру маси, м.

Радіус інерції молотка відносно осі його підвішування буде [17]:

$$r = \sqrt{r_c^2 + c^2}, \quad (2.6)$$

де  $r$  - радіус інерції молотка відносно осі його підвішування, м.

Відстань від кінця молотка до осі його підвішування становить [17]:

$$l = c + 0,5a, \quad (2.7)$$

де  $l$  - відстань від кінця молотка до осі його підвішування, м.

Після цього вибирається відстань від осі підвішування молотка до осі ротора. Вибір проводиться виходячи із умови, що стійка робота молоткових дробарок спостерігається при умові нерівності відстаней від осі підвішування молотка як до його зовнішньої робочої кромки, так і до осі ротора. При цьому відстань від осі підвішування молотка до осі ротора  $R_0$  повинна бути більшою від відстані від осі його підвішування до кінця молотка  $l$  ( $R_0 > l$ ) [17]. Знаючи відстань від осі підвішування молотка до осі ротора  $R_0$  та відстань від кінця молотка до осі його підвішування  $l$ , визначається радіус найбільш

віддаленої від осі ротора точки молотка, яка необхідна для розрахунку кутової швидкості молотка за формулою (2.3) [17]:

$$R_{\max} = R_0 + l, \quad (2.8)$$

де  $R_{\max}$  - радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка, м;

$R_0$  - відстань від осі підвішування молотка до осі ротора, м;

$l$  - відстань від кінця молотка до осі його підвішування, м.

Знаючи кутову швидкість молотка можна визначити відцентрову силу його інерції [17]:

$$P_m = m_m \omega^2 R_c, \quad (2.9)$$

де  $P_m$  - відцентрова сила інерції молотка, Н;

$m_m$  - маса молотка, кг;

$R_c$  - радіус кола розміщення центру маси молотків, м. Молотки дробарок виготовляються із сталі.

Маса такого молотка визначається за формулою [17]:

$$m_m = V_m \rho_m = ab\delta\rho_m, \quad (2.10)$$

де  $V_m$  - об'єм молотка, м<sup>3</sup>;

$\rho_m$  - щільність матеріалу, з якого виготовлений молоток, кг/м<sup>3</sup>.

Радіус кола розміщення центру маси молотків визначається за формулою [17]:

$$R_c = R_0 + c, \quad (2.11)$$

Діаметр осі підвішування молотка визначається як [3; 17]:,

$$d = 1,363 \sqrt{P_m \frac{\delta}{\sigma_m}}, \quad (2.12)$$

де  $d$  - діаметр осі підвішування молотка, м;

$\delta$  - товщина молотка, м;

$\sigma_m$  - допустима напруженість на вигин, Па.

Допустима напруженість на вигин приймається із довідкової літератури. Товщина диска визначається за формулою [17]:

$$\delta_d \geq \frac{P_m}{d \sigma_{\text{доп.зм}}} \quad (2.13)$$

де  $\delta_d$  - товщина диска, м;

$\sigma_{\text{доп.зм}}$  - допустима напруженість на зминання, Па.

Допустима напруженість на зминання приймається із довідкової літератури. Зовнішній радіус диска визначається як [17]:

$$R = R_0 + 0,5d + h_{\text{min}}, \quad (2.14)$$

де  $R$  - зовнішній радіус диска, м.

Мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска повинен бути

$$h_{\text{min}} \geq \frac{0,5P_m}{\delta \sigma_{\text{зр}}}, \quad (2.15)$$

де  $h_{\text{min}}$  - мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска, м;

$\sigma_{\text{зр}}$  - допустима напруга на зріз, Н.

Допустима напруженість на зріз

$$\sigma_{\text{дон.зр}} = (0,2\dots 0,3)\sigma_m, \quad (2.16)$$

де  $\sigma_m$  - границя текучості, Па.

Для сталі марки Ст5, із якої найчастіше виготовляються молотки дробарок, значення границі текучості  $\sigma_m$  становить 260290 МПа. Діаметр ротора дробарки визначається як подвоєна сума відстані від кінця молотка до осі його підвішування  $l$  і відстані від осі підвішування молотка до осі ротора  $R_0$  [17]:

$$D_p = 2(R_0 + l), \quad (2.17)$$

де  $D_p$  - діаметр ротора дробарки, м.

Довжина ротора дробарки визначається залежно від його діаметра [17]:

$$L_p = (0,8\dots 1,2)D_p, \quad (2.18)$$

де  $L_p$  - довжина ротора дробарки, м. Кількість молотків залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

Велика кількість ярусів уповільнюватиме проходження матеріалу через робочу зону і, кінець кінцем, позначатиметься на продуктивності. Також може постраждає якість подрібнення - можлива поява ефекту переподрібнення. При малому ж числі молотків спостерігатиметься проскакування часток матеріалу і, як наслідок, внаслідок малої дії на матеріал, він не досягатиме необхідної міри дроблення. Звичайно необхідну кількість молотків та їх рядів встановлюється дослідним шляхом. Мінімальна кількість має бути не менше 2, аби зрівноважити вал ротора. Продуктивність дробарки визначається за формулами [17]:

$$P = 480 \frac{D_p^{1,5} L_p}{v_p^{0,35} z^{0,5}} K_\beta, \quad (2.19)$$

де  $P$  - продуктивність дробарки, м<sup>3</sup>/год;

$v_p$  - лінійна швидкість обертання ротора, м/с;

$z$  - число рядів молотків;

$K_\beta$  - коефіцієнт, що залежить від положення відбійної плити.

При роботі дробарки з опущеною відбійною плитою  $K_\beta = 1,3$ , а при повністю піднятою відбійною плитою -  $K_\beta = 5,2$  [17].

Частота обертання ротора  $n$  визначається відповідно до відомої кутової швидкості молотка [17]:

$$n = \frac{30\omega}{v\pi}, \quad (2.20)$$

де  $n$  - частота обертання ротора, об/хв.

Потужність двигуна дробарки визначається за формулою [4]:

$$N = \frac{(0,1 \dots 0,15) P i \rho}{1000}, \quad (2.21)$$

де  $N$  - потужність двигуна дробарки, кВт;

$P$  - продуктивність дробарки, т/год;

$i$  - ступінь подрібнення матеріалу;

$\rho$  - щільність матеріалу, що подрібнюється, кг/м<sup>3</sup>.

Ступінь подрібнення  $i$  характеризується відношенням розміру  $D_m$  шматків матеріалу до подрібнення до розміру  $d_m$  шматків після подрібнення [17]:

$$i = \frac{D_m}{d_m}, \quad (2.22)$$



де  $D_m$  - розмір шматків матеріалу до подрібнення, м;

Діаметр вала в небезпечному перетині біля шківів знаходиться за формулою:

$$d_0 = 0,052 \sqrt{\frac{N}{\omega}}, \quad (2.23)$$

де  $d_0$  - діаметр вала в небезпечному перетині біля шківів, м;

$N$  - потужність двигуна дробарки, кВт;

$\omega$  - кутова швидкість ротора, рад/с.

Наступним є розрахунок молотка на міцність.

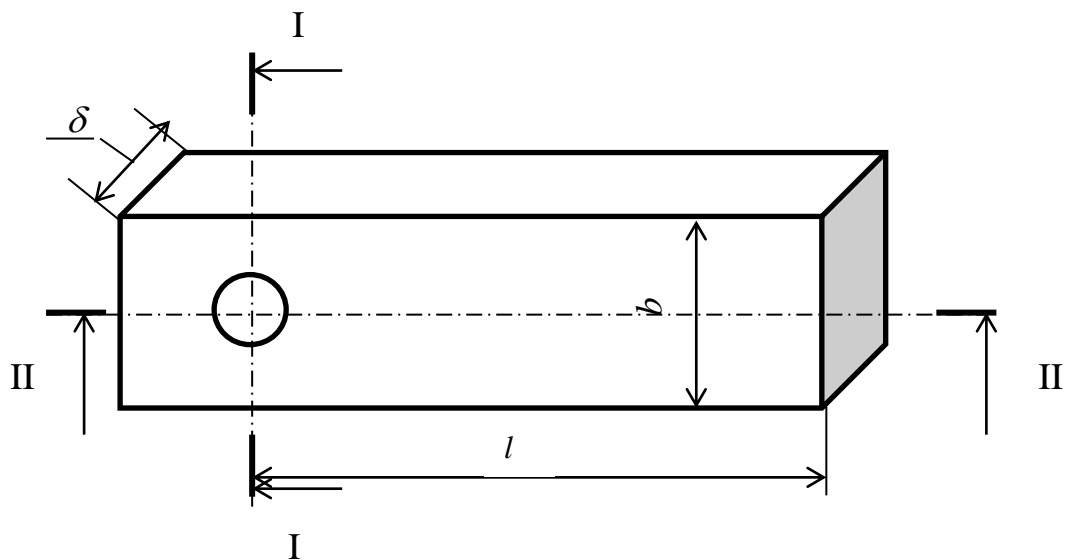


Рисунок 2.1 - Схема для розрахунку напружень [17]

Напруженість, що виникає в перетині I-I молотка становить:

$$\sigma_{I-I} = \frac{P_m}{(b-d)\delta} \quad (2.24)$$

Допустима напруженість в перетині I-I молотка при цьому визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{донI-I}} = \frac{\sigma_m}{s}, \quad (2.25)$$

де  $\sigma_{\text{донI-I}}$  - допустиме напруження в перетині I-I молотка, Па;

$\sigma_m$  - границя текучості, Па;

$s$  - запас міцності. Запас міцності для молотків дробарок становить 5.

Напруженість зрушення, що виникає в перетині II-II молотка становить:

$$\sigma_{\text{зрушII-I}} = \frac{P_m}{2\delta(l-b-d)}, \quad (2.26)$$

Допустима напруженість зрушення сталі становить 82 МПа. Напруженість на зминання, що виникає в молотці, визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{зм}} = \frac{P_m}{\delta d}. \quad (2.27)$$

## 2.2 Взаємодія подрібнюваних частинок з робочими органами молоткової дробарки

При вивченні процесу подрібнення слід розглянути взаємодію активних і пасивних робочих органів (молотків та кільцевих дек) із подрібнювальним матеріалом, вважаючи у першому наближенні частинку правильної кулястої форми, поверхні молотків та деки прийняти у вигляді площини та удар вважати пружним.

Після удару молотка за час ударного імпульсу частка набуває швидкості  $V_c$ , що перевищує швидкість молотка в точці удару в  $(1+k)$  разів і становить:

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{ок}}(1+k), \quad (2.28)$$

де  $V_{\text{ок}}$  - окружна швидкість молотка, м/с;

$k$  – коефіцієнт відновлення швидкості частки після удару.

Якщо удар не є прямим центральним і здійснюється з відхиленням від нормалі на кут  $\varphi$ , то нормальна  $V_{\text{чн}}$  і дотична  $V_{\text{ч}}$  складові швидкості відльоту частинки відповідно рівні:

$$\begin{aligned} V_{\text{чн}} &= V_{\text{ок}}(1+k)\cos\alpha; \\ V_{\text{ч}} &= V_{\text{ок}}(1+k)\sin\alpha. \end{aligned} \quad (2.29)$$

де  $\alpha$  - кут відображення.

Якщо не враховувати вплив зовнішніх впливів, то в таких зіткненнях зберігаються сумарні імпульси та енергія тіл, що зіштовхуються [27]:

$$\begin{aligned} \vec{P}_1 + \vec{P}_2 &= \vec{P}'_1 + \vec{P}'_2; \\ E_1 + E_2 &= E'_1 + E'_2. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Для закону збереження енергії справедлива рівність:

$$\frac{MV_M^2}{2} = \frac{M(V'_{\text{від}})^2}{2} + \frac{mV_{\text{ч}}'^2}{2} \quad (2.31)$$

де  $M$  - маса молотка, кг;

$m$  - маса частки, кг;

$V_M$  - відносна швидкість молотка до удару, м/с;

$V'_{\text{від}}$  - відносна швидкість молотка після удару, м / с;

$V_{\text{ч}}'$  - швидкість частинки після удару, м / с.

Розглядаючи взаємодію частинки з молотком при ударі, коли маса молотка  $M$  суттєво більша за масу частки  $m$  ( $M \gg m$ ), за систему відліку координат слід приймати «систему молотка» (рисунок 2.10).

Тоді відносна швидкість  $V_{\text{від}}$  підльоту частинки до поверхні молотка визначається:

$$V_{\text{від}} = |V_m| - |V_q|, \quad (2.32)$$

де  $|V_m|$ ,  $|V_q|$  – модулі швидкостей відповідно молотка та частки, м/с.

Якщо знехтувати тертям, то при прямому центральному ударі в «системі молотка» частки відлітатимуть зі швидкістю  $V_q$ :

$$V_q = kV_{\text{від}}, \quad (2.33)$$

де  $V_q$  - швидкість частки після відскоку в системі молотка, м/с;

$V_{\text{від}}$  - модуль швидкості частинки щодо молотка, м/с;

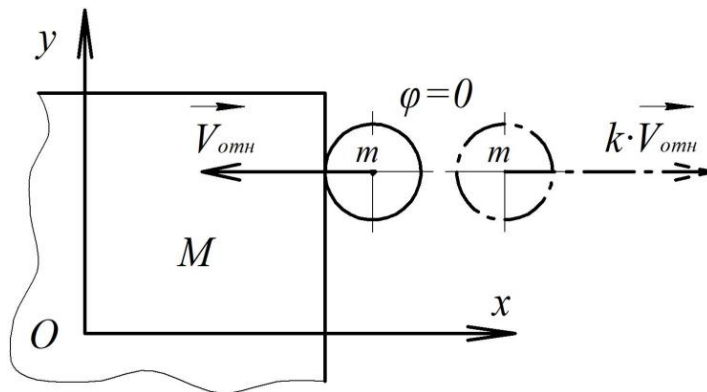


Рисунок 2.2 - Прямий центральний удар частки молотка в системі відліку координат молотка

Якщо перейти в нерухому систему відліку координат - "систему деки", тоді отримуємо наступне рівняння для визначення швидкості частки  $V_q'$  [14]:

$$V_q' = V_m + kV_{\text{від}}, \quad (2.34)$$

Підставивши в рівняння (2.28) значення відносної швидкості  $V_{від}$  з виразу (2.26), отримаємо:

$$V'_q = V_M + k(V_M - V_q) = V_M(1+k) - kV_q, \quad (2.35)$$

При подрібненні матеріалу відбувається зношування кромки молотка за деякою закономірності, рахуючи в першому наближенні по дузі кола, тому в більшості випадків напрямок удару відхилено від нормалі.

На рис. 2.11 зображено взаємодію закругленої кромки молотка радіусом  $r$  із часткою матеріалу. При зустрічі частки  $m$  з кромкою молотка в точці  $N$ , розташованій під кутом  $\varphi$  до напрямку руху молотка, на частинку діє сила реакції поверхні  $R$  молотка, що є сумою сил тертя  $T$  і нормальної реакції поверхні  $R_N$ . Напрямки швидкості молотка  $V_M$  у точці  $N$  та реакції  $R$  утворює кут  $\varphi - \varphi_m$ , де  $\varphi_m$  – кут тертя. Проекції реакцій  $R$  на напрямок швидкості молотка і в осьовому напрямку дає значення сили  $R_o$ , яка залежить від кута  $\varphi$ .

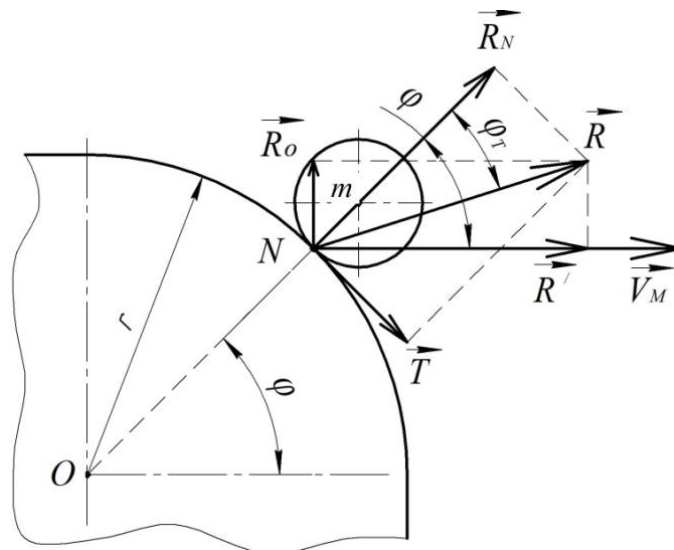


Рисунок 2.3 - Взаємодія молотка з часткою подрібнювального матеріалу

Задаючи граничні значення  $\varphi$ , отримуємо: при  $\varphi=0$  - прямий центральний удар (рис. 2.4.a), коли частка з максимальною швидкістю

відльоту від молотка продовжує рух у площині дії молотка; при  $\varphi = \varphi_m$  (рисунок 2.4.б) складова  $R_o$  дорівнює нулю, що зумовлює рівність кутів падіння та відображення; при  $\varphi > \varphi_m$  (рис. 2.4.в) осьова складова (по осі ротора) сили реакції  $R$ , що прагне виштовхнути частинку в бічному напрямку (з робочої зони молотка), дорівнює:

Таким чином, частка отримує удар «зі ковзанням». У міру збільшення  $\varphi$  до значення  $\pi/2$ , також зростає до  $\pi/2$ . При цьому  $\varphi + \alpha = \pi$  і в результаті отримуємо удар.

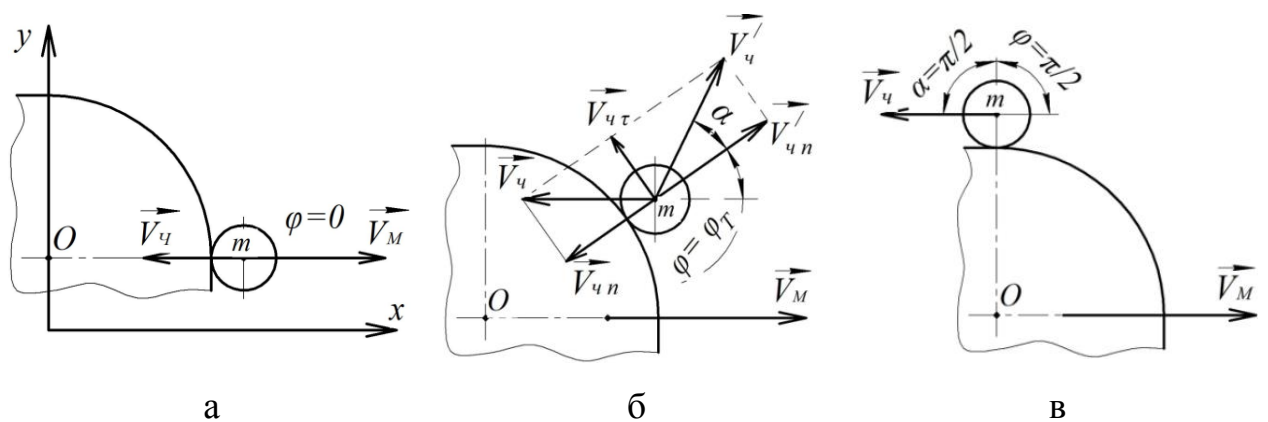


Рисунок 2.4 - Варіанти зіткнення частинки з молотком при значеннях кута падіння  $\varphi$ : а –  $\varphi=0$ ; б –  $\varphi=\varphi_T$ ; в –  $\varphi=\pi/2$

При  $\varphi > \varphi_m$  усі частинки, що отримали удар з боку закругленої кромки молотка в точці  $N$ , отримують подальший рух зі швидкістю  $V_c$  під кутом  $\alpha$  до нормалі в точці  $N$ . Найімовірніший кут відльоту частки становить  $0 \dots \pi/2$ .

У «системі молотка» до ударної взаємодії швидкість підльоту частинки з куту падіння на кромку молотка (рисунок 2.13) визначиться:

$$V_{cn} = -V_{eid} \cos \varphi \quad , \quad (2.36)$$

$$V_{ct} = -V_{eid} \sin \varphi \quad . \quad (2.37)$$

Після удару нормальна  $V'_{nc}$  і тангенціальна  $V'_{\tau c}$  складові швидкості відльоту частки  $V'_c$  від поверхні молотка з урахуванням сил тертя дорівнюватимуть:

$$V_{cn} = -kV_{cn} = kV_{\epsilon i \delta} \cos \varphi \quad (2.38)$$

$$V_{c\tau} = -V_{\epsilon c\tau} - (1+k)f|V_{cn}| = V_{\epsilon i \delta} \sin \varphi - (1+k)fV_{\epsilon i \delta} \cos \varphi = V_{\epsilon i \delta} [\operatorname{tg} \varphi - (1+k)f] \cos \varphi \quad (2.39)$$

де  $\varphi$  - кут падіння частинки на край молотка;

$f$  – коефіцієнт тертя матеріалу частки поверхні молотка.

Модуль швидкості відльоту частинки від кромки молотка дорівнює:

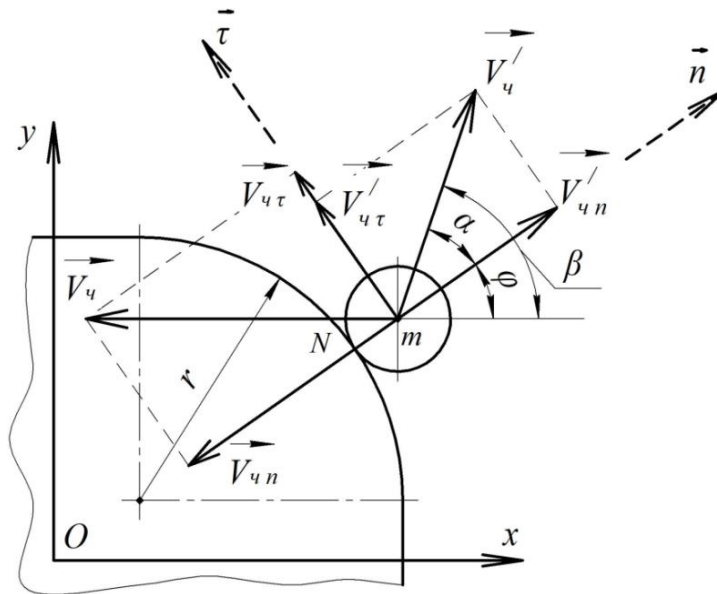


Рисунок 2.5 - Зіткнення частинки із закругленою кромкою молотка

Модуль швидкості відльоту частинки від кромки молотка дорівнює:

$$|V'_c| = \sqrt{V_{cn}^2 + V_{c\tau}^2} = V_{\epsilon i \delta} \sqrt{k^2 + [\operatorname{tg} \varphi - (1+k)f]^2} \cos \varphi. \quad (2.40)$$



Сила тертя (її складова  $(1+k)f|V_{un}|$ ) діє з моменту початку ковзання частки при ударі об поверхню молотка. І тому має виконуватися умова:  $tg\varphi \leq (1+k)f$ . Звідси можна визначити критичне значення кута падіння  $\varphi$ , у якому слід враховувати силу тертя.

$$tg\varphi \leq \arcsin[(1+k)f] \quad (2.41)$$

Наприклад, за досвідченими даними [24] при середніх значеннях коефіцієнта відновлення  $k=0,4$  і коефіцієнта тертя для зернових культур по сталі  $f=0,37$ , кут падіння  $\varphi$  буде дорівнювати:

$$t\varphi \leq \arctg[(1+0,4) \cdot 0,37] = 27,38^{\circ} \quad (2.42)$$

Якщо  $\varphi < 27,38^{\circ}$ , то напрямок та швидкість відльоту частки  $V'_c$  від молотка в «системі молотка» збігаються з нормальною складовою швидкості  $V'_{un}$  ( $\alpha=0$ ).

При більших кутах падіння ( $\varphi > 27,38^{\circ}$ ), кут відображення  $\alpha$  визначатиметься з виразу:

$$tg\alpha = \frac{V'_{c\tau}}{V'_{un}} = \frac{V_{sid} \cos \varphi [tg\varphi - (1+k)f]}{k V_{sid} \cos \varphi} ;$$

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{tg\varphi - (1+k)f}{k} \right]. \quad (2.43)$$

Тоді знаючи кут падіння  $\varphi$  частинки та коефіцієнти відновлення швидкості  $k$  і тертя  $f$  матеріалу сталі, можна визначити кут відльоту  $\beta$  частинки від поверхні молотка в «системі молотка»:

$$\beta = \varphi + \alpha = \varphi + \arctg \left[ \frac{tg\varphi - (1+k)f}{k} \right]. \quad (2.44)$$

Переходячи в «систему деки»  $x'O'y'$  (рис. 2.14), швидкість частинки  $V'_{чд}$  після удару молотка в проекціях на осі  $x'$  і  $y'$  дорівнюватиме:

$$V'_{чх'} = V_M + V'_{чх} = V_M + V'_ч \cos \beta \quad (2.45)$$

$$V'_{чы'} = V'_ч \sin \beta \quad (2.46)$$

Модуль швидкості частинки набуде вигляду:

$$|V'_{чд}| = \sqrt{V'^2_{чх'} + V'^2_{чы'}} \quad (2.47)$$

З урахуванням виразів (2.103) та (2.104) швидкість частки визначиться:

$$V'_{чд} = \sqrt{(V_M + V_{\epsilon id} \sqrt{k^2 + [tg \varphi (1+k)f]^2} \cos \varphi \cos \beta)^2 + V_{\epsilon id}^2 (k^2 + [tg \varphi - (1+k)f]^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi)}. \quad (2.48)$$

Кут підльоту  $\beta'$  частинки до деки (у «системі деки») визначиться із співвідношення:

$$\beta' = \arctg \frac{V'_{чы'}}{V'_{чх'}} \quad (2.49)$$

Згідно з виконаними розрахунками при заданих значеннях швидкості молотків  $V_M=60\dots 80$  м/с, коефіцієнтів відновлення швидкості  $k=0,4$  та тертя  $f=0,37$  матеріалу, кут підльоту  $\beta'$  частинки до деки змінюється від 0 до

Розглянемо випадок, коли повітряно-продуктовий потік має рівномірний розподіл, а швидкість частинок, що підлітають до відбійної плити, по осі  $y$  ( $V'_{чы}$ ) максимальна. При найбільшій складовій швидкості частинки у напрямку деки  $V'_{чы}$  вважатимемо, що частка досягне деки без зіткнення коїться з іншими частинками. Даним умовам відповідає кут підльоту частинки до деки в межах  $\beta'=6\dots 13^\circ$ , а кут змінюється від  $30$  до  $75^\circ$ . Отже,

поверхні деки досягатиме частка потоку частинок, що взаємодіють з молотком, рівна:

$$\rho = \sin 75^{\circ} - \sin 30^{\circ} = 0,47 \quad (2.50)$$

Для забезпечення найбільш ефективного зіткнення частинки з декою її поверхня повинна бути звернена до найбільш ймовірного напрямку підльоту частинок під кутом  $\pi/2$ , при цьому 91...97% запасу кінетичної енергії частинки може бути використане на руйнування. Досягти цього можна розташуванням робочих граней рифів деки до торцевої стінки дробильної камери під кутом  $\gamma = 90^{\circ} - \beta' = 90 - (6...13^{\circ}) = 84...77^{\circ}$ .

Частка співпадає з поверхнею деки з кутом підльоту  $\beta'$  зі швидкістю, яку представляємо у вигляді проекцій (складових):

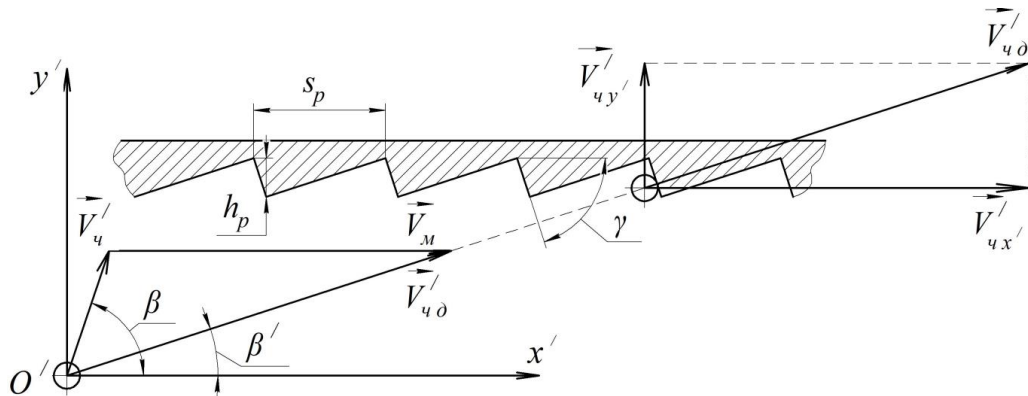


Рисунок 2.6 - Взаємодія частки з робочою відбійної плити

Кут підльоту частки  $\beta'$  залежить не тільки від кута падіння  $\varphi$ , але й від коефіцієнта відновлення  $k$  швидкості відльоту від поверхні молотка, коефіцієнта тертя  $f$  і ряду інших факторів, таких як сила аеродинамічного опору, сила Коріолісова, сила тяжіння, які в даному розгляді не враховуються.

Представлені вище теоретичні дослідження руху частинок матеріалу в камері подрібнення молоткової дробарки дозволяють визначити швидкість та кут підльоту частинок до плити  $\beta=6...13^\circ$ .

З урахуванням найбільшої ймовірності кута підльоту частинок  $\beta'$  до деки, в межах  $6...13^\circ$ , кут робочої грані відбійної плити  $\gamma$  щодо торцевої стінки .

### 2.2.3 Вплив швидкості руху подрібнювального матеріалу на процес руйнування частинок в дробарці ударної дії.

Переваги ударного подрібнення описані в [23]. Умовою подрібнення матеріалу є достатня для руйнування швидкість частинок, при чому, необхідно враховувати зміну кута атаки частинок, притаманну більшості подрібнювачів ударної дії.

Тому метою даної роботи є дослідження по визначенню впливу швидкості руху сипкого матеріалу на процес руйнування частинок в подрібнювачах ударної дії, які знаходять широке розповсюдження на гірничих підприємствах України.

Для вирішення поставлених задач була розроблена методика теоретичних досліджень параметрів процесу подрібнення і визначені основні складові до яких можна віднести наступні: вага ударного тіла, швидкість тіла у момент удару, робота, що витрачається на подрібнення матеріалу та пружних деформацій ударних тіл, фізико-механічних властивостей подрібнювальних матеріалів.

Визначимо швидкість, при якій у момент удару у матеріалі виникнуть граничні пружні деформації, і він почне руйнуватися.

Згідно [4] повинна виконуватися умова:

$$A \geq A_y, \quad (2.51)$$

де  $A$  - робота, що витрачається на подрібнення матеріалу, Дж;

$A_y$  - робота пружних деформацій, Дж.

З теорії удару відомо, що робота, яка витрачається на деформацію тіла, становить [3]:

$$A = \frac{qV^2}{2g} (1 - \sin^2 \alpha - k_e^2 \cos^2 \alpha), \quad (2.52)$$

де  $q$  - вага ударного тіла, Н;

$V$  - швидкість тіла у момент удару, м/с;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$k_e$  - коефіцієнт відновлення при ударі, залежний від форми і фізико-механічних властивостей тіл, що стикаються,  $0 < k_e < 1$ ;

$\alpha$  - кут між нормаллю до ударної поверхні і напрямом удару.

Згідно теорії пружності робота пружних деформацій тіла об'ємом  $v$  дорівнює:

$$A_y = \frac{\sigma_p^2 v}{2E}, \quad (2.53)$$

де  $\sigma_p$  - гранична напруга пружних деформацій (межа міцності матеріалу), Н/м<sup>2</sup>;

$v$  - об'єм тіла, що деформується, м<sup>3</sup>;

$E$  - модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>.

Тоді:

$$\frac{qV^2}{2g} (1 - \sin^2 \alpha - k_e^2 \cos^2 \alpha) \geq \frac{\sigma_p^2 v}{2E}. \quad (2.54)$$

Звідки руйнівна швидкість  $V$ :

$$V \geq \sigma_p \sqrt{\frac{g}{E\rho(1 - \sin^2 \alpha - k_g^2 \cos^2 \alpha)}}, \quad (2.55)$$

де  $\rho$  – питома вага матеріалу, Н/м<sup>3</sup>.

При прямому ударі  $\alpha = 0^\circ$ :

$$V \geq \sigma_p \sqrt{\frac{g}{E\rho(1 - k_g^2)}}. \quad (2.56)$$

Під руйнівною швидкістю  $V$  необхідно розуміти ту швидкість, при якій в тілі виникають граничні (оборотні) пружні деформації і воно починає руйнуватися з утворенням нової поверхні  $\Delta S$ . Знов утворена поверхня буде пропорційна надлишку роботи  $A_s$  наданої тілу:

$$A_s = A - A_y, \quad (2.57)$$

де  $A_s$  - робота, що витрачається на утворення нової поверхні, Дж.

Руйнівна швидкість  $V$  залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, форми частинок і кута атаки  $\alpha$ .

На рис. 2.7 представлений графік, побудований по результатам теоретичних досліджень  $V = f(\alpha)$  руйнівної швидкості  $V$  в залежності від кута атаки  $\alpha$  частинок для різних гірничих порід: антрацит; глинисті сланці; апатитова руда; базальт; кварц. Для теоретичних розрахунків руйнівної швидкості фізико-механічні властивості вказаних порід ( $\sigma_p$ ,  $E$ ,  $\rho$  і  $k_g$ ) прийняті за даними [5, 6, 7].

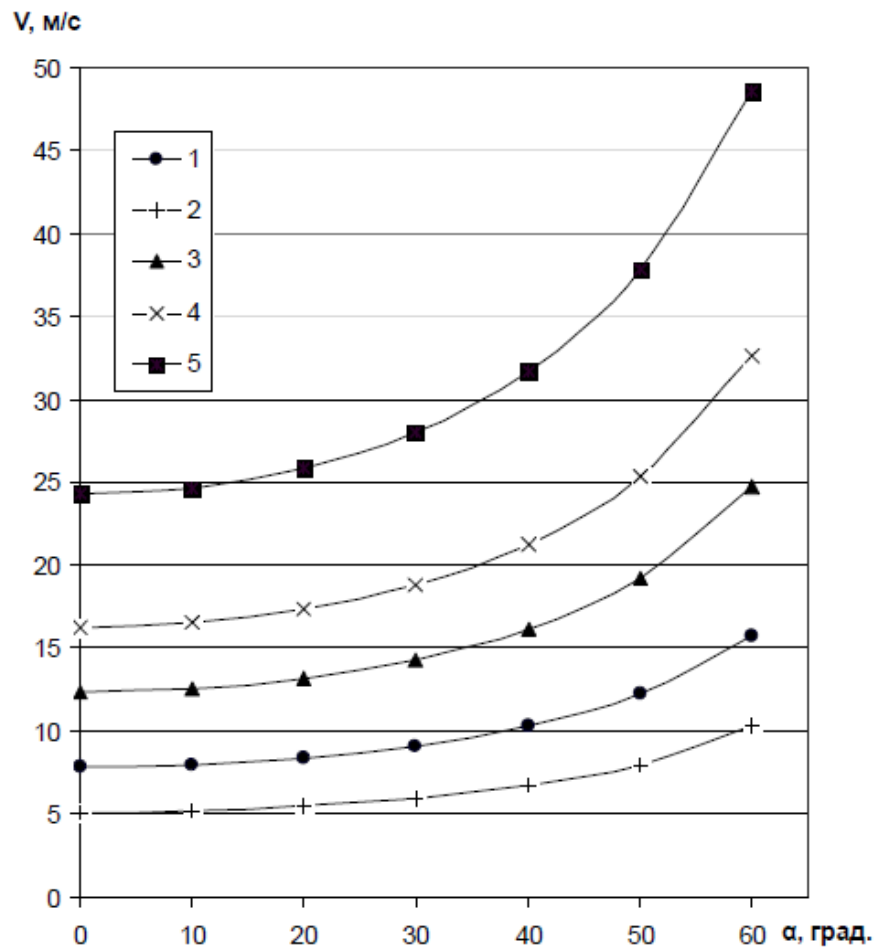


Рисунок 2.7 - Графік залежності  $V = f(\alpha)$  для деяких матеріалів [22, 23, 25]:  
 1 – антрацит; 2 - глинисті сланці; 3 - апатитова руда; 4 - базальт; 5 - кварц

Визначена залежність руйнівної швидкості частинок від фізико-механічних властивостей матеріалу при ударі об жорстку площину, розташовану під кутом до траєкторії руху.



### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ ОДИНИЧНИМ УДАРОМ

Основні завдання досліджень у галузі руйнування твердих матеріалів ударом - встановити оптимальну витрату енергії, що забезпечує задану якість дроблення; знизити енергетичні витрати у разі підвищення ступеня дроблення; підвищити ККД використання енергії на дроблення масиву. Вирішення цих завдань можливе за рахунок встановлення залежностей між питомою енергією та гранулометричним складом зруйнованих твердих матеріалів різних масштабів та фізико-технологічних властивостей.

#### 3.1 Опис лабораторних досліджень.

Для вапняку були проведені лабораторні дослідження подрібнення одиничним ударом на вертикальному копрі (рис. 3.1).

Зразки вапняку щільністю  $\rho_k = 2650 \text{ кг/м}^3$  являли собою шматки масою від 20 до 250 г. Після встановлення шматка в склянку копра, на нього скидався вантаж масою  $M_{zp} = 10 \text{ кг}$  з висоти  $h = 0, 1 \div 0,8 \text{ м}$ . Внаслідок удару шматок руйнувався на фрагменти різних розмірів, які розділялися за класами крупності за допомогою набору сит з отворами  $x = 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 20 \text{ мм}$  та зважувалися на електронних вагах. Окремо зважувалися більші шматки.

Форма шматка до руйнування приймалася кулястою, відповідно діаметр шматка ( $D$ , м) та його обсяг ( $V$ , м<sup>3</sup>) розраховувалися за геометричними залежностями

$$D = \sqrt[3]{\frac{6M_k}{\pi\rho}}, \quad (3.1)$$

$$V = \frac{M_k}{\rho}, \quad (3.2)$$

де  $\pi = 3,14$  – число Пі;

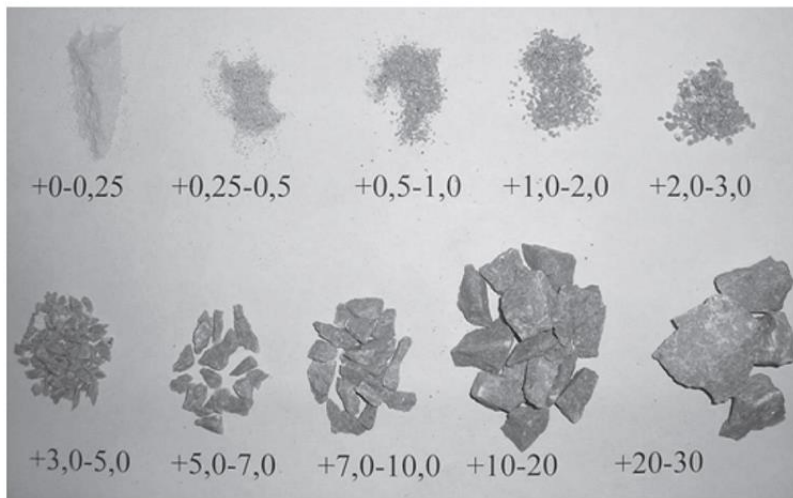
$M_k$  - маса шматка до руйнування, кг.



До удару



Після удару



Фракції подрібнених зразків



Рисунок 3.1 - Схема проведення експерименту.

Енергетичні параметри руйнування - енергія ( $A$ , Дж) та питома енергія удару ( $A_v$ , Дж/м<sup>3</sup>) визначалися за формулами

$$A = M_{ep}gh, \quad (3.3)$$

$$A_v = \frac{A}{V}, \quad (3.4)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ,

$h$  - висота падіння вантажу,  $\text{м}$ .

Характеристика гранулометричного складу фрагментів – середній розмір фрагментів ( $d_{cp}$ ,  $\text{м}$ ) розраховувався за залежністю

$$D_{cp} = \frac{\sum d_i \gamma_i}{100}, \quad (3.5)$$

де  $\gamma_i$  - вихід шматків  $i$ -ї фракції;

$d_i = 0,125; 0,375; 0,75; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0; 8,5; 15$   $\text{мм}$  - середній розмір шматків  $i$ -ї фракції.

Ступінь дроблення ( $N$ ) є характеристикою якості дроблення та визначалася за залежністю

$$N = \frac{D}{d_{cp}}. \quad (3.6)$$

### 3.2 Аналіз результатів експерименту.

Гранулометричний склад фрагментів руйнування представлявся графічно - як кривих розподілу «по мінусу» (рис. 3.2). По осі абсцис відкладався розмір отворів сит ( $x$ ,  $\text{мм}$ ), а по осі ординат накопичений вихід ( $F$ , вихід під решітного продукту), виражений у відсотках. Випукла крива 1 відбиває переважання дрібних фракцій і відповідає питомій енергії удару  $A_v = 4,392 \text{ МДж/м}^3$ .

При зменшенні питомої енергії криві гранулометричного складу викладаються та стають прямолінійними (наприклад, крива 2,  $A_v = 2,936$

МДж/м<sup>3</sup>). Подальше зниження питомої енергії призводить до переважання великих фракцій, і криві розподіли набувають увігнутої форми (крива 3,  $A_v=1,294$  МДж/м<sup>3</sup>).

Для зручності обробки та зберігання експериментальних даних, а також для побудови математичної моделі процесу отримані криві розподіли шматків апроксимувалися статечними рівняннями за Gates - Gaudin - Schuhmann (GGS) [15].

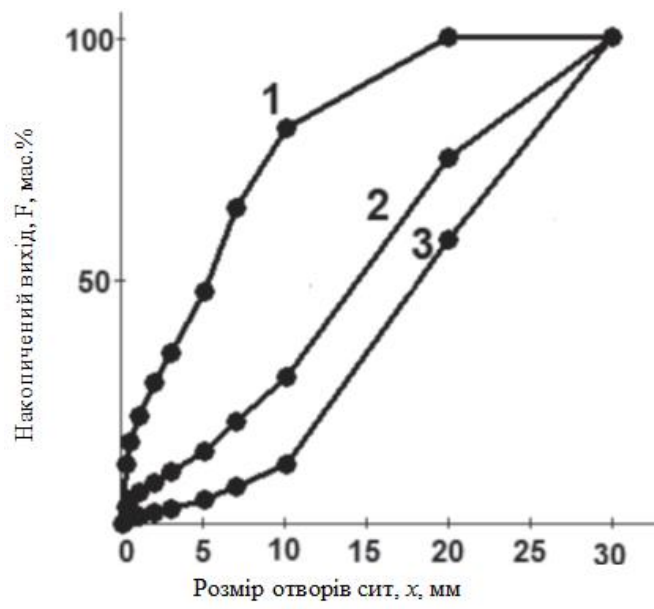
$$F(x) = Dx^m = 100 \left( \frac{x}{x_{100}} \right)^m, \quad (3.7)$$

де  $F$  - вихід підрешіточного продукту мас, %;

$x$  - діаметр отворів сита, мм;

$B$  та  $m$  - параметри розподілу;

$x_{100} = \sqrt[3]{\frac{100}{B}}$  - максимальний розмір шматка, що відповідний  $F = 100\%$ .



1 - опукла ( $A_v = 4,392$  МДж/м<sup>3</sup>); 2 - прямолінійна ( $A_v = 2,936$  МДж/м<sup>3</sup>);

3 - увігнута ( $A_v = 1,294$  МДж/м<sup>3</sup>)

Рисунок 3.2 - Сумарні криві розподілу гранулометричного складу

Крива розподілу GGS, побудована в логарифмічних координатах, є прямою лінією (рис. 3.3), і може бути виражена рівнянням

$$\log_{10} F = \log_{10} B + m \log_{10} x. \quad (3.8)$$

Для оцінки застосування моделі GGS обчислювався тест  $\chi^2$ -квадрат Пірсона за формулою

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{i=1}^n \frac{(F - F_{\text{розра}})^2}{F_{\text{розра}}}, \quad (3.9)$$

де  $F_i$  - експериментальне значення накопиченого виходу класів крупності;

$F_{\text{розра},i}$  - розрахункове значення за рівнянням GGS;

$n$  - число класів крупності.

Щільність розподілу

$$f(x) = F'(x). \quad (3.10)$$

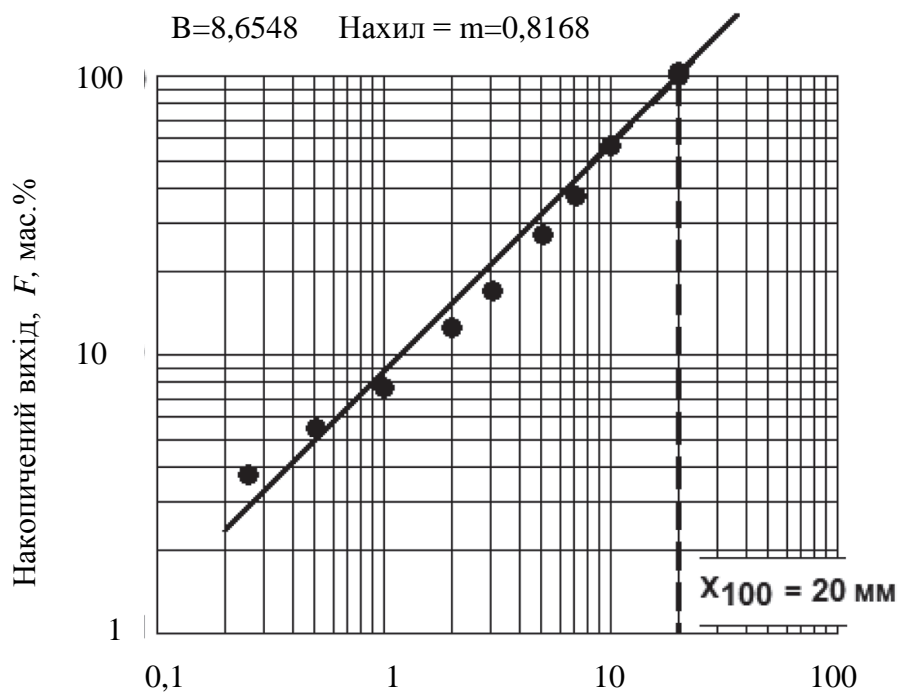


Рисунок 3.3 - Апроксимація лінійним рівнянням

Математичне очікування розподілу (середній розмір шматка)

$$d = \int_0^{x_{100}} xf(x)dx. \quad (3.11)$$

У всіх дослідах шматки більші за 20 мм зважувалися індивідуально, і визначався максимальний діаметр шматка після руйнування ( $x_{100}$ , мм). В результаті експериментів було встановлено, що при збільшенні питомої енергії удару зменшується максимальний розмір шматка вапняку маси залежно (рис.3.4):

$$x_{100} = 31,8190 - 12,2190 \ln(A_v), \quad (3.12)$$

де  $A_v$  – питома енергія удару, МДж/м<sup>3</sup>.

Значення параметра  $m$  від питомої енергії руйнування апроксимується логарифмічними залежностями (рис. 3.5)

$$m = \begin{cases} 1,2057 - 0,3045 \ln(A_v) \\ \text{при } 20 \text{ мм} < x_{100} < 40 \text{ мм} \\ 1,1628 - 0,2534 \ln(A_v) \\ \text{при } x_{100} = 20 \text{ мм} \end{cases}. \quad (3.13)$$

У результаті математична модель функції розподілу гранулометричного складу фрагментів за методом GGS набуде вигляду

$$m = \begin{cases} 100 \left( \frac{x}{31,8190 - 12,2190 \ln(A_v)} \right)^{1,2507 - 0,3045 \ln(A_v)} \\ \text{при } A_v < 2,5 \text{ МДж} / \text{м}^3 \\ 100 \left( \frac{x}{20} \right)^{1,1628 - 0,2534 \ln(A_v)} \\ \text{при } 2,5 \text{ МДж} / \text{м}^3 \leq A_v \leq 8 \text{ МДж} / \text{м}^3 \end{cases}. \quad (3.14)$$

де  $A_v$  - питома енергія удару, МДж/м<sup>3</sup>.

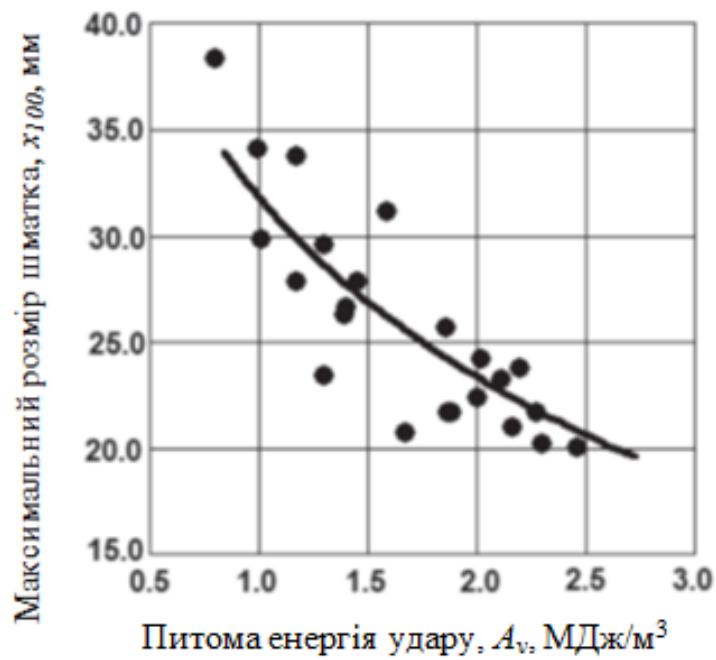


Рисунок 3.4 - Залежність максимального розміру шматка від питомої енергії удару

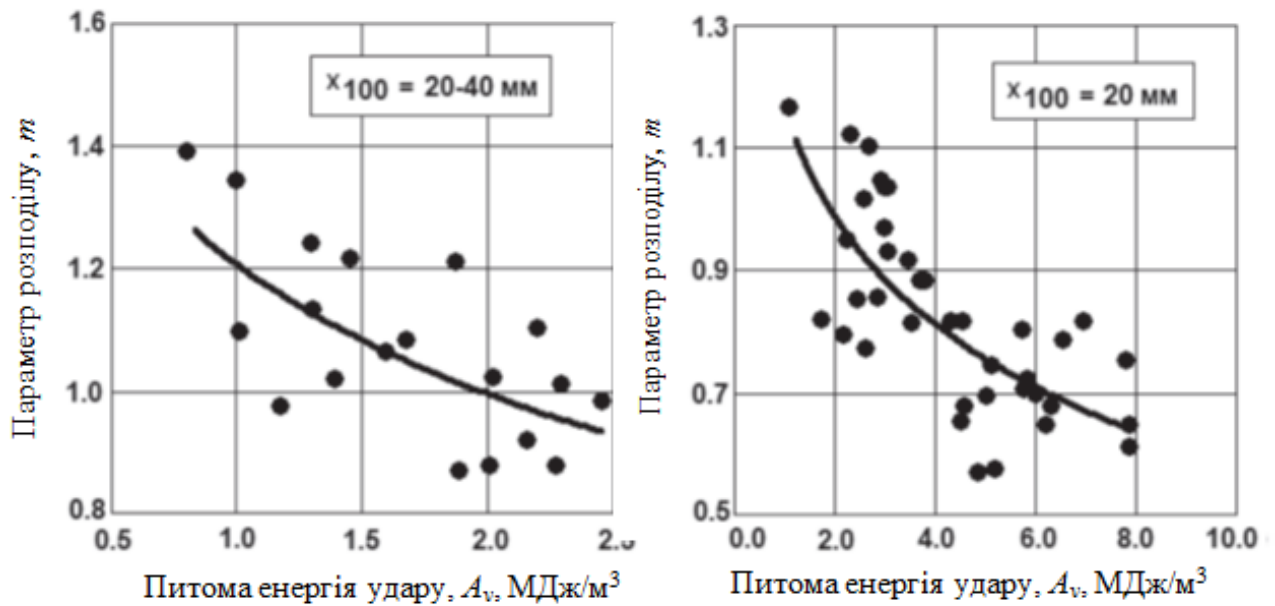


Рисунок 3.5 - Значення параметра  $t$  залежно від питомої енергії руйнування

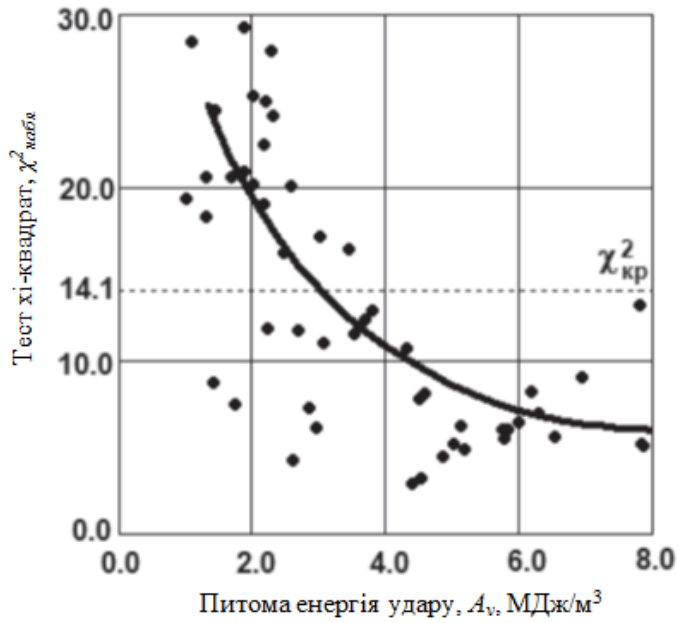


Рисунок 3.6 - Значення тесту хі-квадрат Пірсона  $\chi^2_{\text{набл}}$  в залежності від питомої енергії удару

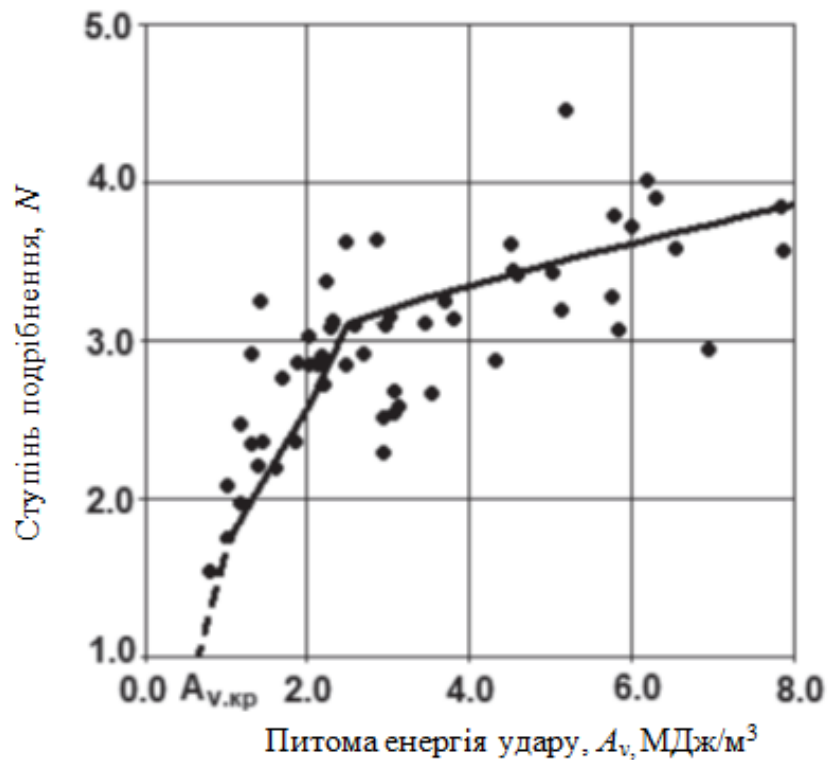


Рисунок 3.7 - Вплив питомої енергії удару на ступінь дроблення вапняку;  
 точки – експериментальні дані;  
 ламана крива - розрахунок за рівнянням (3.15)



Слід зазначити, що зі збільшенням питомої енергії удару (ступеня дроблення) значення тесту хі-квадрат Пірсона  $\chi^2$  набл зменшується, тобто адекватність застосування моделі GGS зростає (рис. 3.6).

Обчислене значення  $\chi^2_{\text{набл}}$  порівнювалося з  $\chi^2$  розподілом Пірсона за рівнем значущості  $\alpha = 0,05$ , яке становить при  $n = 10$   $\chi^2_{\text{кр}}=14,1$ .

За результатами експериментів та розрахунків за математичною моделлю (рівняння 3.14) встановлено вплив питомої енергії удару  $A_V$  на ступінь дроблення  $N$  (рис. 3.7). Залежність представлена на рис. 7 показує, що поки питома енергія удару менше певної критичної величини  $A_{V_{\text{кр}}}$ , для досліджуваного вапняку менше  $A_{V_{\text{кр}}}=0,514$  МДж/м<sup>3</sup>, зразок практично не руйнується і залишається цілим. У цьому випадку у зразку відбуваються невидимі пластичні деформації та зростання мікрodefektів, що виражаються у зниженні міцності шматка.

При збільшенні енергії ( $A_V > A_{V_{\text{кр}}}$ ) відбувається руйнування вихідного шматка на кілька фрагментів і ступінь дроблення збільшується. Однак зростання ступеня дроблення не є лінійним, як це має впливати із закону дроблення П. Ріттингера, а сповільнюється зі збільшенням питомої енергії удару. Прямі, що утворюють ламану криву, мають різний нахил по відношенню до осі абсцис, і чим вище питома енергія удару, тим менше кут нахилу. Це з збільшенням незворотних втрат енергії, тобто, дисипацією енергії зі зростанням швидкості навантаження. Значно збільшуються теплові втрати – відбувається нагрівання породи та елементів копра.

Деяка частина енергії витрачається на марну роботу - розліт і розкид фрагментів, відскік вантажу, звукові ефекти. Крім того, відомо, що ударне руйнування супроводжується утворенням найдрібніших частинок, мають високу питому поверхню, вловити які можна тільки з допомогою спеціального високоточного обладнання [19,20]. В.А. Ішейський, М.М. Якубовський встановили зниження міцності шматків вапняку під час навантажень [20] за рахунок утворення прихованих мікрodefektів. Таким чином, на утворення дрібних фракцій при руйнуванні та появі внутрішніх

дефектів фрагментів витрачається значна частина енергії удару, що і є причиною зниження приросту ступеня дроблення зі збільшенням питомої енергії руйнації.

Також слід зазначити, що при зростанні питомої енергії удару спостерігається періодичність - спочатку енергія витрачається на зростання мікродефектів у вихідному шматку, потім при досягненні  $A_{V_{кр}}$  відбувається катастрофічне руйнування тіла на фрагменти і значне зростання ступеня дроблення, а при подальшому зростанні питомої енергії знову зростання мікродефектів вже в фрагментах, що утворилися.

Отже, можна припустити існування критичних енергій -  $A_{V_{кр1}}$ ,  $A_{V_{кр2}}$  тощо на дрібніших масштабних рівнях [36].

#### Висновок

Експериментальними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням енергії удару зростання ступеня дроблення гірської породи сповільнюється. Тому високі значення питомих витрат енергії не завжди є раціональними і призводять до значних втрат енергії, зниження ККД дроблення. За допомогою лабораторних досліджень з руйнування шматків породи ударом на копрі можна визначити оптимальну питому витрату енергії, що забезпечує заданий гранулометричний склад продуктів дроблення.

## ВИСНОВКИ

1. Одним з визначальних чинників, що впливають на ефективність подрібнення, є спосіб руйнування матеріалів. Умовою подрібнення матеріалу є достатня для руйнування швидкість частинок, при чому, необхідно враховувати зміну кута атаки частинок, притаманну більшості подрібнювачів ударної дії.
2. Кут підльоту частки  $\beta'$  залежить не тільки від кута падіння  $\varphi$ , але й від коефіцієнта відновлення  $k$  швидкості відльоту від поверхні молотка, коефіцієнта тертя  $f$ . Теоретичні дослідження руху частинок матеріалу в камері подрібнення молоткової дробарки дозволяють визначити швидкість та кут підльоту частинок до відбійної плити  $\beta=6...13^\circ$ .
3. Визначена залежність руйнівної швидкості частинок від фізико-механічних властивостей матеріалу при ударі об жорстку площість, розташовану під кутом до траєкторії руху.
4. Встановлено, що збільшення маси молотка призводить до зниження зносу ударного органу при зіткненні з матеріалом, а збільшення маси шматка матеріалу - до його підвищення.
5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням енергії удару зростання ступеня дроблення подрібнювального матеріалу сповільнюється. Тому високі значення питомих витрат енергії не завжди є раціональними і призводять до значних втрат енергії, зниження ККД дроблення. За допомогою лабораторних досліджень з руйнування шматків подрібнювального матеріалу ударом на копрі можна визначити оптимальну питому витрату енергії, що забезпечує заданий гранулометричний склад продуктів дроблення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / За ред. В. С. Білецького. Донецьк : Східний видавничий дім, 2004–2013.
2. Двоєглазова А.В. Удосконалення технології одержання комплексного флюсу на основі вапняку та залізовмісних матеріалів при їх спільній термічній обробці : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02; Нац. металург. акад. України. Дніпро, 2018. 20 с
3. Смирнов В. О., Білецький В. С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім ; Донецьке відділення НТШ, 2012. 286 с.
4. Смирнов В. О., Білецький В. С. Переробка корисних копалин. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 607 с.
5. Сокур М. І., Кіяновський М. В., Воробйов О. М. та ін. Дезінтеграція мінеральних ресурсів. Кременчук : Щербатих О. В., 2014. 304 с.
6. Wills B., Finch J. Wills' Mineral Processing Technology. 8th ed. Oxford; Boston : Butterworth-Heinemann, 2015. 512 p.
7. Сокур М.І., Сокур І.М., Сокур Л.М. Центробежные дробилки : монографія. Кременчуг : КДПУ, 2009. 202 с..
8. К.А. Зіборов, М.М. Трубіцин, А.О. Логінова. Аналіз особливостей робочого процесу та конструкцій опорного вузла ударно-відцентрових дробарок з вертикальним валом робочого органа. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. НТУ "Дніпровська політехніка", 2013, Том 91. С.131-136.
9. Молоткова ударна дробарка EV. URL : [https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/crushing-and-sizing/old-platform/ev-hammer-impact-crusher\\_ru.pdf](https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/crushing-and-sizing/old-platform/ev-hammer-impact-crusher_ru.pdf)
10. ТОВ «ЗАВОД ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ «ПРОГРЕС» (Харків). URL : <https://zavodgooprogress.com.ua/ua/g9250551-drobilki-molotkovye>

11. Руденко М.Р., Мусієнко К.А., Руденко Р.М., Кундіренко Г.В.. Шляхи підвищення якості підготовки флюсів в умовах агломераційного цеху ПАТ «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТКОМБІНАТ». *Металургія. Зварювання*, 2011. с.9-15.
12. Ударні дробарки серії NP (Фінляндія). URL : <https://hydrolider.com.ua/ua/p1123993213-udarnye-drobilki-metso.html>
13. Зіборов К.А., Трубіцин М.М., Логінова А.О. Аналіз особливостей робочого процесу та конструкцій опорного вузла ударно-відцентрових дробарок з вертикальним валом робочого органа. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2013. Вип. 91. С. 131-136. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta\\_2013\\_91\\_31](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta_2013_91_31)
14. Інтернет ресурс : [http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення\\_і\\_подрібнення](http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення_і_подрібнення)
15. Інтернет ресурс [https://ru.wikipedia.org/wiki/Центробежно-ударная\\_дробилка#:~:text=Центробежно-ударная%20дробилка%20—%20оборудование%20\(исходной%20крупностью%20до%20180%20мм.](https://ru.wikipedia.org/wiki/Центробежно-ударная_дробилка#:~:text=Центробежно-ударная%20дробилка%20—%20оборудование%20(исходной%20крупностью%20до%20180%20мм.)
16. Надутий В.П., Логінова А.О., Сухарев В.В. Ефективність використання ударно-відцентрового дезінтегратора, що реалізує зсувні деформації при руйнуванні гірської маси. *Геотехнічна механіка* : Міжвід. зб. наук. праць. Дніпропетровск : ІГТМ НАНУ, 2016. Вип. 131. С.26-32.
17. Хмара Л. А., О. С. Шипілов, О. Г. Онищенко Дробильно-сортувальні заводи і устаткування : навч. посіб. Дніпропетровськ – Полтава : ПолтНТУ, 2009. 209 с. URL : <https://studfile.net/preview/4508479/>
18. Поліщук В.М., Тарасенко С.Є., Волошин С.М. Удосконалена методика конструктивно-технологічного розрахунку молоткової дробарки для лінії гранулювання деревної маси. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія : Техніка та енергетика АПК. 2012. Вип. 170(1). С. 305-312. Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau\\_tech\\_2012\\_170%281%29\\_\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2012_170%281%29__41)
19. ДСТУ 2411-94. Дробарки. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-20]. Вид. офіц. Київ, 1994. 16 с. (Інформація та документація).

20. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 655 с. ISBN 5-11-004083-4.
21. Кузьо І.В., Ванькович Т.М., Зінько Я.А. Теоретична механіка. Динаміка : навчальний посібник Кн.1. Львів : Растр-7, 2012. 444 с. : іл. ISBN 978-966-2004-95-3.
22. Турушин В. О., Ленич С.В. Закономірності руйнування сипких матеріалів в подрібнювачах ударної дії. *Вісник СНУ ім. В. Даля. 2009. № 5 (135). С. 11–15.*  
URL : [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/1%2818%29-2010/article/10NGIGBA.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/1%2818%29-2010/article/10NGIGBA.pdf)
23. Грицаєнко В.І. Вплив робочих органів молотків та фрез на енергетичні та якісні показники роботи молоткових кормодробарок : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Харків : ХІМЕСК, 1967. 28 с.
24. Власенко Д.А., Левченко Е.П. Особливості подрібнення шматкового вапна в дробарках ударної дії при різних варіантах підвісу бил. Сб. наук. праць, ДонГТУ. Алчевськ, 2015. № 45. С. 130–135.
25. Нечаєв Г.І., Ленич С.В., Турушин В.О. Вплив швидкості руху сипкого матеріалу на процес руйнування частинок в подрібнювачах ударної дії. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* . № 1 (18), 2010. с.203-205.
26. Маліч М.Г. Енергетичний аналіз дроблення рудних матеріалів асиметричним навантаженням. Загальнодержавний науково-технічний журнал *Теорія і практика металургії*. №3, 2022. с.38-44. ISSN 1028-2335  
URL : <https://nmetau.edu.ua/ru/mdiv/i2004/p1504>
27. Маліч М.Г., Васильєв Л.М., Усов О.О. Дослідження впливу параметрів навантаження на розподіл напружень, що діють при руйнуванні шихтових матеріалів в дробарках . *Металург. та гірничорудн. промисловість*. 2015. №7. С.99-106. (Російською).

28. Vasil'ev L.M. Theoretical ground for origination of normal horizontal stresses in rock masses / L.M. Va-sil'ev, D.L. Vasil'ev // Journal of Mining Science 2013. Vol 49, №2 , USA– pp 240-247.

## ДОДАТОК А

### ЗАЯВА

### ЩОДО САМОСТІЙНОСТІ ВИКОНАННЯ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Я \_\_\_\_\_, здобувач  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
ступеня вищої освіти «магістр» групи \_\_\_\_\_,

\_\_\_\_\_ (спеціальності)

\_\_\_\_\_ (освітньої програми)

факультету \_\_\_\_\_  
(назва факультету)

\_\_\_\_\_ форми навчання підтверджую, що  
(денна або заочна)

моя кваліфікаційна випускна робота магістра на тему: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

яка представлена до Екзаменаційної комісії для захисту, виконана самостійно і не містить елементів академічного плагіату (копіляції).

Усі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше науково-дослідних робіт, випускних кваліфікаційних робіт магістрів, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання та цитування, оформлені у відповідності до діючих правил.

Я ознайомлений (а) з діючим Положенням “Про заходи щодо запобігання випадків академічного плагіату”, згідно з яким виявлення факту академічного плагіату (копіляції) є підставою для застосування відповідних дисциплінарних стягнень.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_ (дата)