Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

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

(повна назва факультету)

кафедра металургійне обладнання

(повна назва кафедри)

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему «**Дослідження технологічного процесу роботи молоткової дробарки**»

Виконав: магістрант групи 8.1333

Кір`янов Павло Сергійович

(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 – 2024 року

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра Металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і повна назва)

Спеціалізація _____
(шифр і повна назва)

Освітньо-професійна програма 133.00.12 Металургійне обладнання
(шифр і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри А.О.Власов
_____
"__" _____2024 року

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

_____ Кір`янов Павло Сергійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Дослідження технологічного процесу роботи молоткової дробарки.
керівник роботи: Шевченко І.А., к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "20" 02 року № 358-с

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: Технологічні вимоги до процесу твердого палива агломерації; ефективність процесу дроблення ударними дробарками; сучасні методи і способи управління процесом ударного дроблення. Інші вихідні дані вибираються магістрантом самостійно на підставі аналізу джерел інформації за темою дослідження.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд технологій дроблення сировинних матеріалів ударом в металургійній промисловості; 2. Теоретичні дослідження процесу дроблення ударом; 3. Експериментальні дослідження енергії удару і гранулометричного складу продукту руйнування.

5. 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 видачі завдання
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
1	Узгодження і затвердження теми та змісту робот	01.09 -17.09.2024
2	Збирання матеріалу, опрацювання літературних джерел та нормативних документів	17.09-30.09.2024
3	Виконання вступу роботи	01.10-05.10.2024
4	Виконання основної частини роботи та проведен експериментальних досліджень	06.10-19.11.2024
5	Підготовка висновків	20.11-24.11.2024
6	Оформлення магістерської роботи	25.11-05.12.2024
7	Рецензування магістерської роботи	09.12- 15.12.2024
8	Попередній захист роботи	Згідно графіку
9	Захист роботи у ДЕК	Згідно графіку

Студент _____ Кір'янов
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Шевченко
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кір`янов П.С. Дослідження технологічного процесу роботи молоткової дробарки.

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», 2024.

В роботі проведено дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів дробарок на продуктивність і енергоємність процесу подрібнення та на якість вугільної сировини; приведено модель взаємодії робочих елементів дробарки з матеріалом, що дробиться.

Ключові слова: ДРОБАРКА, ШИХТА, ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД, УДАР, ЗУСИЛЛЯ ДРОБЛЕННЯ, БИЛО, РОТОР.

ABSTRACT

Kiryanov P.S. Research of the technological process of hammer crusher operation.

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 133 - Industrial mechanical engineering, scientific supervisor I.A. Shevchenko. Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhia National University named after Yu.M. Potebnia ZNU, Department of "Metallurgical Equipment", 2024.

The work conducted a study of the influence of structural and technological parameters of crushers on the productivity and energy intensity of the crushing process and on the quality of coal raw materials; a model of the interaction of the crusher's working elements with the material being crushed is presented.

Keywords: CRUSHER, BATCH, GRANULOMETRIC COMPOSITION, IMPACT, CRUSHING EFFORT, BLADES, ROTOR.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ…… 6

ВСТУП ……. 7

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ДРОБЛЕННЯ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПОМИСЛОВОСТІ…….. 9

1.1Проблеми теорії і практики використання твердого палива в агломерації …… 9

1.2 Вплив крупності вапняку і палива на якість вугільної сировини …. 12

1.3 Аналіз способів подрібнювання твердих матеріалів…… 16

1.4 Вплив типу дробарки на якість вугільної сировини …… 20

1.5 Аналіз основних типів дробарок ударної дії …….. 25

1.5.1 Аналіз основних типів дії молоткових дробарок …….. 27

1.5.2 Аналіз основних типів роторних дробарок …….. 33

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ УДАРОМ .. 38

2.1 Аналіз гіпотез, що пояснюють механізми подрібнення …….. 38

2.2 Фактори, що впливають на процес подрібнення дробарками ударної дії ……. 42

2.4 Аналіз способів руйнування матеріалов …… 44

2.4 Аналіз руйнівних впливів та конструктивні принципи створення дробарок ударної дії ……. 51

2.5 Технологічні характеристики дробарок ударної дії …….. 56

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ УДАРУ І ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ РУЙНУВАННЯ … 64

3.1 Обладнання й матеріал експериментальних досліджень …… 64

3.2 Проведення експерименту …… 66

3.3 Результати експерименту …….. 68

ВИСНОВКИ …… 73

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 75
ДОДАТОК А…… 79
ДОДАТОК Б…… 80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

V	-	об’єм подрібнюваного матеріалу
E	-	модуль пружності матеріалу
σ_{lim}	-	граничні значення нормальних напруг
τ_{lim}	-	граничні значення дотичних напруг
i	-	ступінь дроблення (подрібнення)
D_p	-	діаметр ротора ротора
L	-	довжина ротора
D_{max}, d_{max}	-	розміри максимального зерна шматка у вихідному і дробленому (подрібненому) матеріалі
Q	-	продуктивність дробарки
$Q_o^{\max}$	-	максимальне граничне значення продуктивності
$Q_o^{\min}$	-	мінімальне граничне значення продуктивності
n	-	частота обертання ротора
P	-	потужність дробарки
E	-	модуль пружності
η	-	ККД приводу дробарки
N	-	потужність електродвигуна
$И$	-	питомий знос матеріалу бил
α	-	кут атаки поверхні била
r	-	радіус закруглення робочої кромки била
Δm	-	середній масовий знос бил

ВСТУП

Актуальність теми. В Україні найпоширенішими є різні технології підготовки вугілля та шихт: подрібнення (дроблення), термічна обробка, ущільнення, використання спікливих добавок, а також їх поєднання. Якість коксу буде тим вищою, чим більш однорідною за складом частинок вугілля буде шихта. Однак вугілля саме по собі не є однорідним продуктом, та його різні складові мають дуже різну міцність.

Рівень подрібнення вугільної шихти помітно впливає на її технологічні властивості. При цьому якість шихти погіршують як крупні куски так і дрібні. Регулювання гранулометричного складу шихти здійснюється вибором конструкції дробильного обладнання.

При отриманні шихти оптимального гранулометричного складу раціонально використовувати дробарки ударної дії: молоткові або роторні.

У зв'язку з тим, що схема підготовки вугілля істотно впливає на вихід і якість кінцевого продукту коксохімічного виробництва (доменного коксу), питанням її вдосконалення необхідно приділяти підвищену увагу

Тому дослідження процесу подрібнення вугілля і вибору типу дробарки, що забезпечує оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти є актуальними науково-технічними завданнями металургійного виробництва.

Мета дослідження: знаходження взаємозв’язку між конструктивними елементами й технологічними параметрами з якістю дроблення, шляхом вивчення та дослідження процесу дроблення.

Завдання дослідження:

- провести аналіз конструкцій дробарок ударної дії, їх робочих органів та особливостей реалізації технологічних операцій дроблення;
- дослідити теоретичні основи процесу дроблення матеріалів, дослідження зв'язку між витратами енергії та характеристиками продукту, що подрібнюється;

- провести аналіз різних руйнівних впливів та їх ефективність для застосування удару при подрібненні матеріалів;
- визначити залежності кількості енергії, що поглинається матеріалом при ударі, та впливу поглиненої енергії на характер продукту дроблення

Предмет дослідження: основні закономірності напружень та деформацій у подрібнювальному матеріалі при взаємодії з робочими органами дробарок ударної дії.

Об'єкт дослідження: технологічний процес дроблення матеріалів в молотковій дробарці.

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.

Структура та обсяг магістерської роботи. Випускна кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 79 сторінках машинописного тексту, містить 4 таблиці, 22 рисунків, список використаних джерел з 40 найменувань.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ДРОБЛЕННЯ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПОМИСЛОВОСТІ

1.1 Проблеми теорії і практики використання твердого палива агломерації

Доменна плавка в наш час є основним і необхідним ланцюгом в виробництві сталі.

Суттєвим недоліком доменного процесу є необхідність в використанні дефіцитного дорогого палива – коксу, для отримання якого необхідно використовувати вугілля, яке підлягає коксуванню.

Основні напрями удосконалення процесу агломерації полягають в покращенні якості агломерату за рахунок збільшення його міцності, відсіву дрібних фракцій, підвищення основності [1].

Удосконалення підготовки коксу до плавки повинно відбуватися за рахунок підвищення його механічної міцності за рахунок оптимізації процесу коксування, диференційного дроблення вугілля, раціональної сушки коксової шихти і попередньої механічної обробки коксу з відсівом найбільш дрібних і крупних фракцій.

Кокс – це паливо, що використовується в процесі виробництва сталі, яке утворюється при нагріванні вугілля за відсутності повітря.

Найбільша кількість коксу, що виготовляється в світі, використовується в доменному виробництві. Сучасний доменний процес характеризується високою інтенсивністю, яка досягається за рахунок підготовки шихти, використання високої температури дуття та інших заходів.

Крупність і механічна міцність коксу відображає вплив усіх генетичних і технологічних факторів його виробництва: склад і властивості вугільних шахт, їх підготовки, умов коксування, тушіння і сортування. Вони визначають роботу доменних печей, а також інших споживачів, і тому

являються найбільш важливими показниками якості коксу. Для їх оцінювання у поставника і споживача обрані і використовуються наступні показники: зольність, вологість, гранулометричний склад, механічна міцність та реакційна здатність.

Виробництво коксу включає низку різних процесів. Ці процеси можна розбити на складові. Кожна стадія випікання коксу супроводжується складними хімічними процесами.

Кокс виробляється шляхом нагрівання вугілля при високих температурах протягом тривалого часу. Це нагрівання називається “термічною дистиляцією” або “піролізом”. Для виробництва коксу, який буде використовуватися в доменних печах, вугілля зазвичай піддають термічній перегонці протягом 15-18 годин, але процес може тривати до 36 годин.

Першим кроком у виробництві коксу є доставка вугілля до коксових печей, яка зазвичай здійснюється баржами або залізницею. Другим етапом виробництва коксу є переробка сировини – вугілля до консистенції, придатної для коксових батарей. Для досягнення цієї консистенції вугілля подрібнюється в дробарці і, за необхідності, змішується з водою і маслом для контролю щільності вугільної суміші [1].

Отриманий кокс просіюють і сортують за розмірами шматків. Найбільший – доменний кокс, середній – коксовий горішок, а решта – коксова дрібниця. Великий іде в доменну піч для виплавляння чавуну, середній використовується як паливо у феросплавній промисловості, а дрібний відправляють для виробництва агломерату.

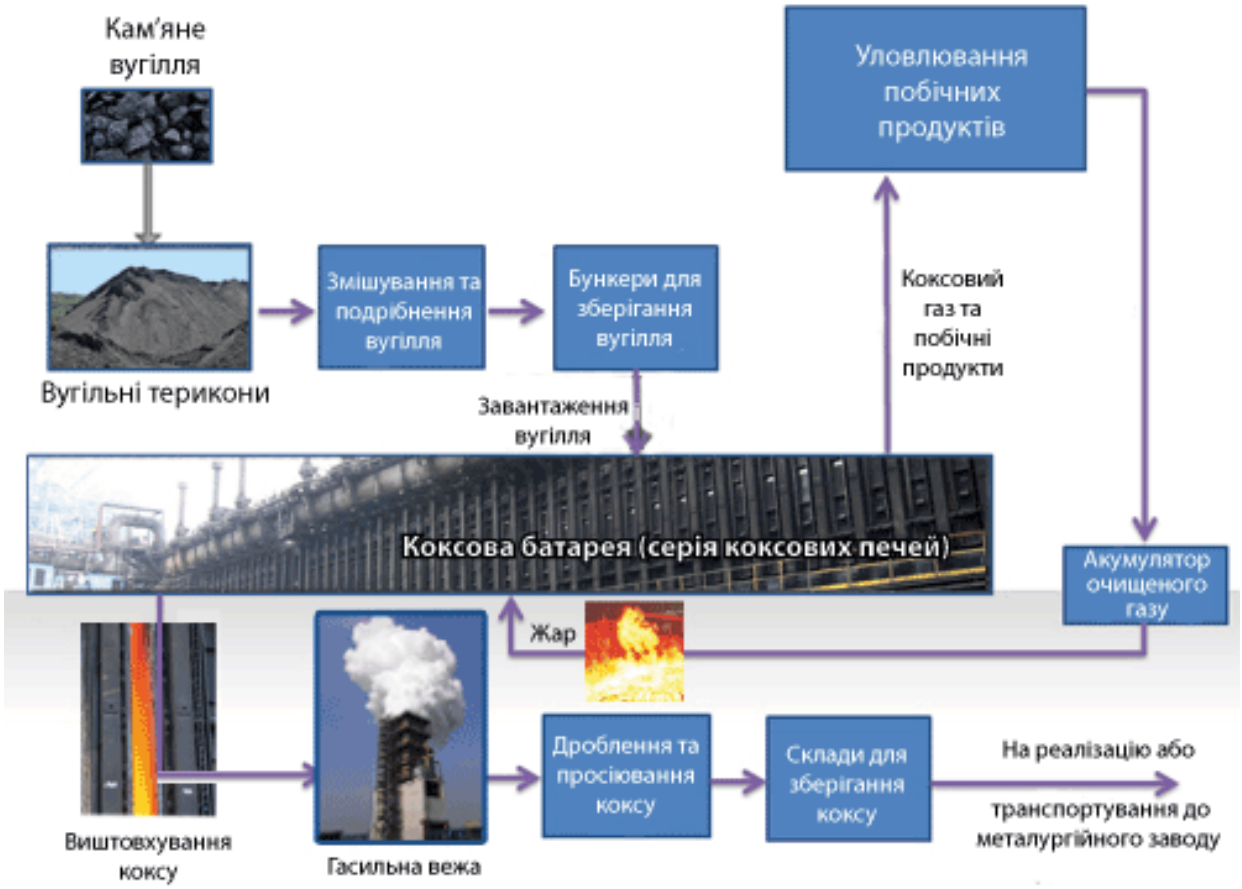


Рисунок 1.1 - Базова схема найпоширенішого процесу виробництва коксу [1]

Крупність і механічна міцність коксу відображає вплив усіх генетичних і технологічних факторів його виробництва: склад і властивості вугільних шахт, їх підготовки, умов коксування, тушіння і сортування. Вони визначають роботу доменних печей, а також інших споживачів, і тому являються найбільш важливими показниками якості коксу [2]. Для їх оцінювання у поставника і споживача обрані і використовуються наступні показники: зольність, вологість, гранулометричний склад, механічна міцність та реакційна здатність.

Кокс, як і раніше, залишається важливим джерелом тепла, відновником і розпушувачем. Але споживання коксу визначається вже не стільки тепловим балансом доменної плавки, скільки необхідністю забезпечити визначену газопроникність стовбура шихтових матеріалів, яка у більшості залежить від крупності і рівномірності шматків коксу. У зв'язку з цим, роль

цих характеристик зростає. Гранулометричний склад коксу повинен бути близьким до гранулометричного коксу іншої частини шихти. В перспективі основною вимогою до гранулометричного складу буде вміст в ньому класу 40-60 мм, сукупність механічних властивостей якого в найбільшому ступені відповідає вимогам доменного процесу. В той же час немає достатніх підстав для відмовлення від використання в доменній плавці коксу крупністю 60-80 мм і від сортування товарного коксу крупністю 25-80 мм на вузькі класи 25-40 і 40-80 мм з роздільною їх подачею в доменні печі.

Міцність коксу визначається ступенем зміни його гранулометричного складу під дією руйнівних зусиль [2].

1.2 Вплив крупності вапняку і палива на якість вугільної сировини

У зв'язку з цим підвищення якості агломерату, розробка ефективних технологій підготовки твердого палива для агломераційного процесу, заснованих на отриманні палива необхідного гранулометричного складу та раціональне його введенні в агломераційну шихту, є важливою науково-практичним завданням, що має велике значення для металургійної галузі та економіки країни.

Незважаючи на активний пошук і використання замінників коксового дріб'язку (антрацитовий штиб, худий вугілля, буровугільний напівкокс і ін.) [3,4], даний матеріал є найбільш поширеним видом твердого палива для аглофабрик, що забезпечує відносно високі показники процесу спікання і якість агломерату.

Показники процесу спікання агломерату і його якість в значній мірі залежать від технічного, гранулометричного складів твердого палива і способу його введення в шихту. Для спікання тонкоподрібненого концентратів коксове паливо повинне містити мінімальну кількість частинок як крупніше 3 мм, так і дрібніше 0,5 мм. У разі застосування палива з підвищеною реакційною здатністю необхідний верхня межа крупності може

збільшуватися до 5 мм, при використанні палива зі зниженою реакційною здатністю - відповідно зменшуватися до 2… 3 мм [5] На думку авторів роботи [6], крім зазначених фракцій, технологічна цінність агломераційного палива повинна оцінюватися співвідношенням в ньому фракцій: 0…0,5, 0,5…1, 0,1,0…2,0, 2,0 …3,0,
3,0… 5,0 і більше 5,0 мм.

Для коксового дріб'язку зазначеного діапазону крупності (0,05 - 8 мм) зі збільшенням розміру частки закономірно зменшується її питома поверхня, загальна і відкрита пористість з одночасним збільшенням уявної щільності і закритою пористості.

Зміна гранулометричного складу окомкованної аглошіхти і розподіл палива по її класах при використанні окремих фракцій коксового дріб'язку призводять до помітних змін вмісту вуглецю в класах шихти.

Найменша концентрація вуглецю виявлена в грудках аглошіхти крупніше 5 мм. Максимальна неоднорідність шихти, з точки зору розподілу вуглецю по її класів, спостерігається при використанні палива крупністю 0,4…1 мм. Застосування менш і більш великих фракцій коксового дріб'язку характеризується більш рівномірним розподілом вуглецю за класами шихти, проте для дрібного палива фракції 0 - 0,4 мм це супроводжується найбільшою неоднорідністю шихти по гранулометричному складу (авторами не вказується порівнюваний діапазон крупності). Для палива фракцій 1… 2,5 і 2,5… 3 мм має місце висока однорідність шихти як по ситова складу, так і за розподілом в ній вуглецю [7].

Аналіз результатів дослідження [4] показує, що основним носієм вуглецю окомкованной шихти при використанні коксового дріб'язку розміром 0 - 0,5, 0-5 і 1 -2 мм є фракція шихти 0-3 мм, що містить до 79% всього внесеного палива. Збільшення крупності коксового дріб'язку до 3 - 3,5 мм призводить до того, що вона майже вся розподіляється у фракції шихти більше 3 мм, що навіть зумовлено підвищення вмісту вуглецю у фракції шихти 3-5 мм до 9,5%.

Отже, головним чинником, що впливає на розподіл твердого палива в шихті різної крупності, є його гранулометричний склад.

В роботі [5] проведено дослідження розподілу палива в аглошихту на Комкувачі ПРО 3,2х12,5 агломашини №2 ВАТ «НЛМК». Порівняльний аналіз закочування коксового дріб'язку різної крупності при огрудкування різних шихт показав, що дрібне паливо, незалежно від його виду, закочується в 2…3 рази більше, ніж паливо фракції 0,5…1,0 мм і в 3… 5 разів більше, ніж паливо фракції 1…2 і 2…3 мм. Крім того, відзначається підвищення рівномірності розподілу палива по класах.

Вплив крупності коксового дріб'язку на комкуємость агломераційної шихти також було досліджено в лабораторних умовах [8].

Аглошихту змішували і огрудковується на тарілчастому грануляторі. В результаті проведених досліджень виявлено, що видалення з палива фракції менше 0,5 мм збільшує коефіцієнт комкуємості аглошіхти на 6…16,5%. Широкий інтервал значень автори роботи пояснюють впливом на процес огрудкування таких факторів, як загальна кількість палива (варіювали в діапазоні 2,7…3,2%) і вологість шихти (змінювалася в діапазоні 7,2…8,8%). Видалення з палива фракції більше 3 мм, навпаки, знижує коефіцієнт комкуємості на 5,5… 8,5% , а середній діаметр - на 0,3…0,8 мм.

Крупність палива визначає багато в чому температурно-теплові умови процесу спікання аглошихти.

Крупність палива істотно впливає на динаміку аглопроцесу: якщо на паливі фракції менше 0,5 мм швидкість фільтрації повітря монотонно зростає в ході спікання, досягаючи до кінця процесу значень, в кілька разів перевищують її величини в початковий момент спікання, то в міру укрупнення палива (наприклад , на фракції 1…2,5 мм) спостерігається відносно тривалий період стабілізації швидкості фільтрації повітря через аглошар (більше половини часу спікання).

Підготовка вапняку на аглофабриках полягає в його дробленні до необхідної крупності: 3…0 мм для дозування в шихту та 10…3 мм для отримання обожженого вапняку.

При виборі оптимальної крупності вапняку використали фракції 3…6, 6…8, 8…20 та 10…12 мм. Висота шару, що обжилася у всіх експериментах складала 500 мм. Паливом слугувала косова дрібнота крупністю 3…0 мм. Випалювання кожної фракції вапняку проводили за різними витратами палива. Виявилося, що за однакових витратах коксової дрібноти ступінь випалювання збільшується зі зменшенням крупності вапняку (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Вплив крупності вапняку на процес випалювання [9]

$a_{вап}$, мм	K, %	$G_ш$, кг	$G_{вап}$, кг	$\tau_{вип}$, хв	S, %	Q, т/м^2·год
3-6	8	3,03	2,08	9,4	57,0	1,51
	9	2,96	1,88	9,7	69,5	1,61
	10	2,94	1,79	10,0	75,0	1,61
	11	2,90	1,72	10,1	78,5	1,60
6-8	9	3,08	2,04	9,4	62,0	1,60
	10	3,08	2,0	9,5	64,3	1,61
	11	2,99	1,87	10,0	69,6	1,55
	12	3,0	1,79	10,5	76,1	1,61
	13	2,95	1,68	10,7	82,9	1,55
8-10	11	3,12	1,98	10,0	67,1	1,58
	12	3,12	1,94	10,3	69,4	1,56
	13	3,10	1,81	10,7	78,8	1,59
	14	3,10	1,75	11,0	83,3	1,58
10-12	11	3,17	2,16	10,1	54,3	1,40
	13	3,17	2,08	10,4	60,0	1,43
	13	3,18	2,02	10,7	64,5	1,45
	14	3,19	1,95	11,0	69,8	1,48

При витратах кокосової дрібноти 11% ступінь випалювання для фракції 3-6 мм складала 78,5%, а для фракції 10-12 мм – всього 54,3%. Питома продуктивність установки знизилася при цьому з 1,6 до 1,4 т/м^2·год [9].

При визначенні оптимальної крупності палива брали фракції 3…0, 3…4 та 4…6 мм. У всіх експериментах витрати палива складали 10%. Результати,

надані в табл.1.2, свідчать проте, що вапняк фракції 10…12 мм краще випалюється у випадку використання крупних фракцій палива. Застосування такого ж палива для більш дрібних фракцій вапняку менш ефективне.

Таблиця 1.2 – Вплив крупності палива на процес випалювання вапняку [9]

$a_{КМ}$	$a_{вап}$, мм	$G_{Ш}$,кг	$G_{вап}$, кг	S, %	$\tau_{вип}$, хв	Q, т/м^2·год
0-3	10-12	3,17	2,16	54,3	10,0	1,40
3-4	10-12	3,17	2,09	60,5	10,6	1,42
4-6	10-12	3,17	1,99	69,0	11,4	1,44
0-3	3-6	2,90	1,72	78,5	10,1	1,60
3-4	3-6	2,90	1,71	79,6	10,1	1,61

Найбільш вигідним є випалювання дрібних фракцій вапняку. Навіть незначне збільшення крупності вапняку, що випалюється, з 3-6 до 6-8 мм потребує додаткових витрат палива [9].

1.3 Аналіз способів подрібнювання твердих матеріалів

Дроблення – технологічний процес поділу твердих матеріалів на частини або це руйнування матеріалу під дією зовнішніх сил, що переборюють сили зчеплення між частинками. Процес дроблення залежить від: розміру і форми шматків, що подрібнюються; від їх взаємного розташування в дроблячому просторі; від фізико - механічних властивостей матеріалу (міцності, твердості, тріщинуватості, в'язкості, щільності, вологості), форми і маси частин, що дроблять і т.д.

Подрібнення потрібне для того, щоб створити велику питому поверхню матеріалу, тоді хімічні реакції перебігають інтенсивніше.

Основні фактори процесу подрібнення - ступінь подрібнення і питома витрата енергії на одиницю одержуваної продукції.

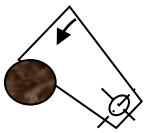
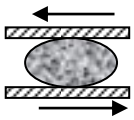
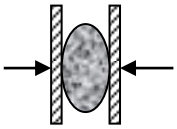
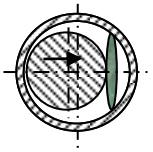
Ступенем подрібнення називають відношення розміру поперечника

шматка матеріалу до подрібнювання до розміру поперечника шматка (чи частинки) після подрібнювання.

Основна фізична характеристика подрібнюваного матеріалу – його міцність. Залежно від міцності матеріали поділяють на м'які, середньої твердості і тверді. Ступінь твердості матеріалу визначають за шкалою твердості.

Тверді матеріали можна подрібнювати роздавлюванням, ударом, стиранням, розколюванням чи поєднавши ці способи (табл.1.2).

Таблиця 1.2 - Схеми основних способів дроблення

Спосіб	Удар	Стирання	Роздавлювання	Розколювання	Роздавлювання з розколюванням, ударом та вигином
Схема					

Вибір способу залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і потрібного ступеня подрібнення. Для твердих матеріалів ефективні роздавлювання й удар, для крихких - розколювання; для вологих в'язких матеріалів - стирання в сполученні з роздавлюванням.

Практично всі способи механічного навантаження матеріалів з метою їх руйнування (удар, стиснення, стирання, зсув, різання) знайшли застосування в тих чи інших конструкціях подрібнювальних машин. Вибір способу механічного впливу на продукт залежить від його властивостей і технологічних вимог до готового продукту.

Згідно ДСТУ 2411-94 «Дробарки. Терміни та визначення» процес подрібнення дроблення – це руйнування твердого кускового матеріалу на дрібні куски. Дробарка – машина для дроблення [28].

Дроблення ударом - один з найпоширеніших видів подрібнення.

Поділяють його на руйнування вільним ударом і обмеженим ударом. Руйнування при вільному ударі залежить від швидкості руху «молотка». При обмеженому ударі матеріал руйнується між двома робочими органами.

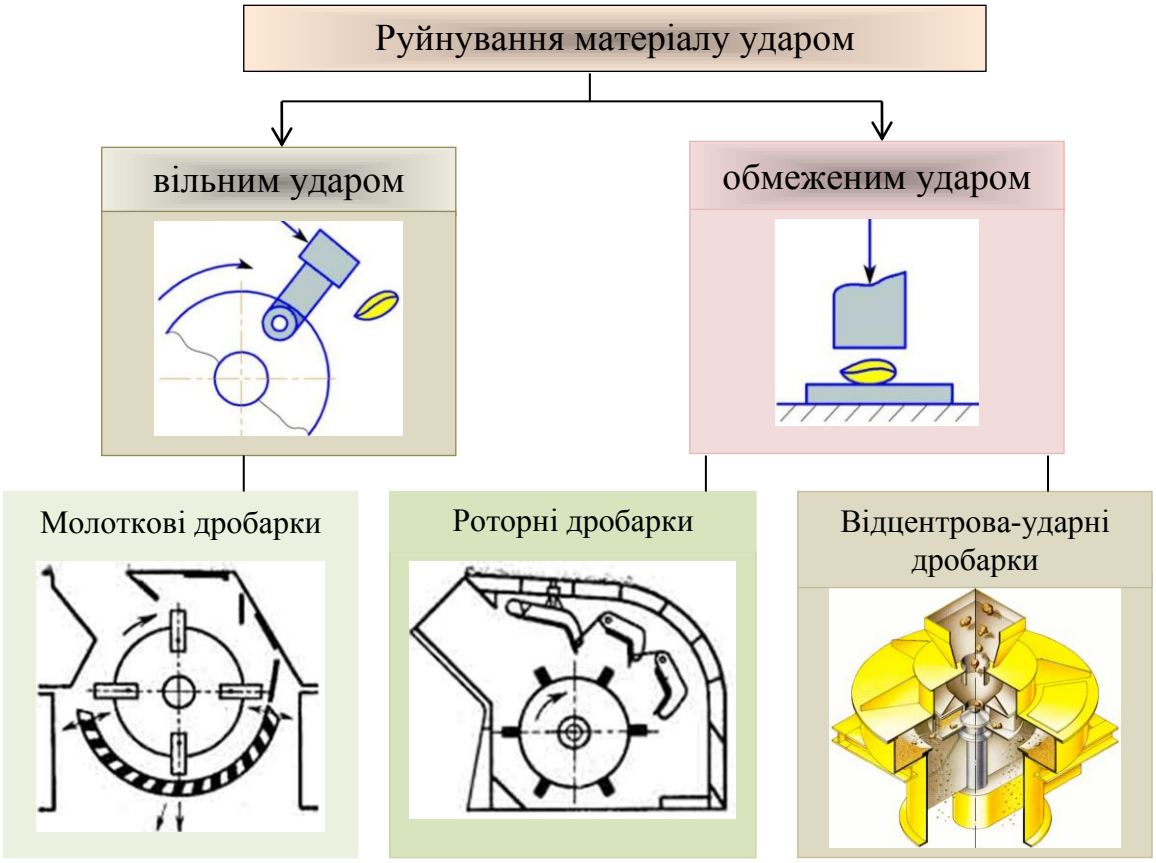


Рисунок 1.2 - Способи дроблення в дробарках динамічної дії

Подрібнювання в дробарках ударної дії відбувається внаслідок:

- удару швидкообертових молотків безпосередньо по шматках матеріалу й удару шматків один об один;
- удару матеріалу об дробильні плити;
- подрібнювання матеріалу між молотками і броньовими плитами;
- подрібнювання матеріалу між молотками і колосниками.

Схеми ударного подрібнення наведені на рис.1.3.

Розрізняють обмежений і вільний удар [20]. При обмеженому ударі матеріал руйнується між двома поверхнями,що співударяються, і осколки руйнує мого тіла вільно розлітаються тільки в бічні сторони. В цьому

випадку руйнівний ефект залежить від маси тіла, що вдаряє, і швидкості його руху в момент удару (рис.1.3,б).

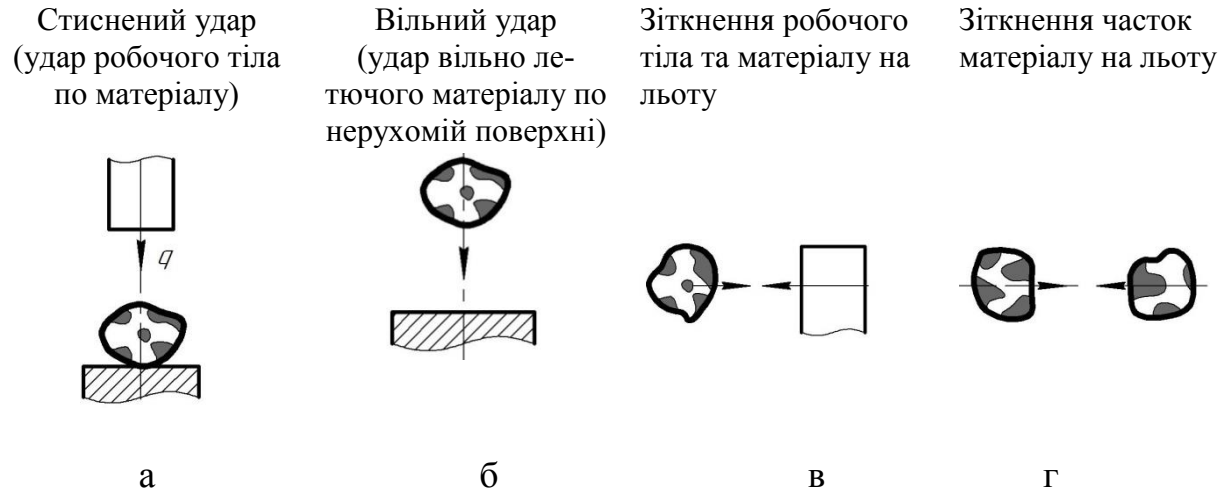


Рисунок 1.3 – Схеми ударного подрібнення [11,20]

При вільному ударі частки матеріалу руйнуються в результаті зіткнення їх з тілами, що вдаряються, або один з одним в польоті. В цьому випадку осколки зруйнованої частки можуть розлетітися в усіх напрямках.

Якщо при обмеженому ударі частки руйнуються переважно в місцях зосередження максимальних зусиль, то при вільному ударі вони руйнуються в основному по найбільш слабким спаям. Цим пояснюється можливість отримання зі сланців, що мають шарувату структуру, пластинчастої крупки, чого не можна досягти жодним іншим способом подрібнення.

При вільному ударі руйнівний ефект залежить головним чином від швидкості зіткнення тіл і не залежить від того, яке з них рухається - руйнівне або те, що руйнується.

У тих випадках, коли руйнування матеріалу проводиться зіткненням рухомих частинок, що руйнівна швидкість зіткнення буде дорівнювати відносній швидкості зустрічі цих частинок (рис.1.4).

$$w_y = w_1 + w_2,$$

$$w_y = w_1 - w_2 \qquad (1.1)$$



А б

а - при зустрічному ударі: б - набігаючому ударі

Рисунок 1.4 – Додавання швидкостей

Швидкість руйнівного удару залежить від механічних властивостей і щільності частки, що руйнується, і не залежить від її розмірів.

1.4 Вплив типу дробарки на якість вугільної сировини

Для того, щоб тверде тіло зруйнувалося, воно повинно бути напруженим шляхом застосування сили. Тривимірна картина напруг у твердому тілі представляє силу розтягування, стиснення або зсуву на одиницю площини, що діє в будь-якому напрямку через будь-яку точку твердого тіла. Відповідно до напруги відбувається зміна розмірів твердого тіла, яка називається деформацією. Інтеграл від сили (напруги), помноженої на відстань, на яку перемістилася сила (деформація), є енергією, збереженою в твердому тілі через його напругу та деформацію.

Частинка вугілля, піддана силі стиснення або зсуву, міститиме області напруги розтягування, які ініціюють крихке руйнування через дефекти, активовані напругою. Існує п'ять основних методів, за допомогою яких напруга прикладається до частинок у промислових машинах: пряме стиснення частинки між твердими поверхнями; стиснення відносно легкими ударами кульок; ударне стиснення молотами, що рухаються з високими швидкостями; зсув частинки між поверхнями; ударне стиснення частинок, створене перенесенням частинок у високотурбулентному газовому потоці.

Насправді всі машини піддають частинку стисненню та зсуву одночасно, оскільки сила стиснення прикладається під кутом, який автоматично призводить до зсуву.

У пристроях для процесу подрібнення матеріалу застосовуються наступні способи його руйнування: роздавлювання, розколювання, злам (розламування), зріз, різання, розпилювання, стирання, удар та їх поєднання. Конструкція дробильного обладнання заснована на переважному використанні одного з основних способів руйнування: роздавлювання, розколювання, удар і стирання, а інші мають, як правило, підрядне значення.

Процеси дроблення вугільної шихти здійснюється у вуглепідготовчих цехах коксохімічних підприємств (КХП) та поділяються на дві стадії – попереднє дроблення вугілля та остаточне подрібнення шихти.

Застосування попереднього дроблення вугілля дозволяє покращити його транспортування, дозування, усереднення, збагачення та полегшити остаточне подрібнення до потрібного ступеня. У табл.1.23 приведені основні характеристики дробарок.

Таблиця 1.3 - Характеристика дробильного обладнання [10]

Стадія підготовки	Тип дробарки	Спосіб дроблення	Принцип дії
Попереднє подрібнення	щокова	роздавлювання, розколювання, злам, часткове стирання	статичний
	валкова	розколювання	динамічний
	барабанна	удар, часткове стирання	
	роторна	удар	
Остаточне подрібнення	молоткова	удар, часткове стирання	
	роторна	удар	
	дезінтегратор	удар	

Для остаточного подрібнення вугілля та шихти на коксохімічних підприємствах застосовуються в основному дробильне обладнання ударної

дії, в якому руйнування матеріалу здійснюється ударом робочих органів. Це молоткові, роторні дробарки та дезінтегратори.

Аналіз впливу конструкції дробильного обладнання на гранулометричний склад вугільної шихти на дробарках валковій, щоковій, роторній, молотковій та дезінтеграторі було проведено в лабораторних дослідженнях авторами [10].

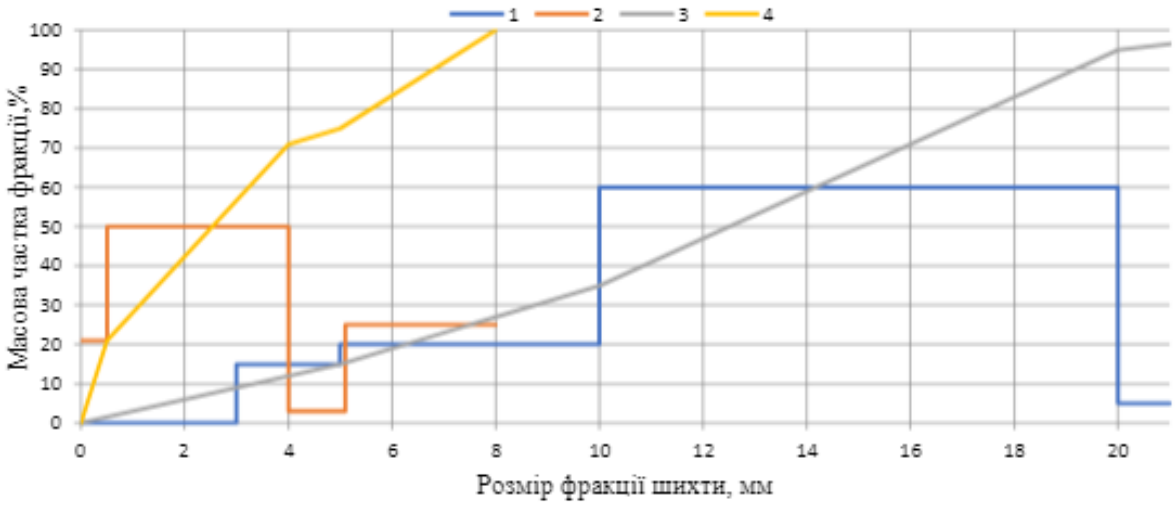
На рисунках 1.5, 1.6 у якості прикладу приведені криві для щокової та роторної дробарок.

При отриманні шихти оптимального гранулометричного складу раціонально використовувати вибіркове подрібнення тільки крупних класів. Цього можна досягти при використанні роторних дробарок. При цьому дрібні фракції проходять через камеру дроблення транзитом, тобто без взаємодії із робочим органом. Для оптимізації процесу подрібнення пропонується збільшити на 20 % кількість обертів у роторний дробарці, так як результат подрібнення на роторний дробарці найбільш наближений до оптимального. Запропоновано скорегований критерій дроблення, якій враховує, що оптимальний вміст фракції (–0,5) мм у підготовленій шихті повинен коливатися у межах від 29 % до 32 %. Відповідно до цього критерію роторна дробарка зі підвищеними на 20 % обертами дає найкращій результат.

Рівень подрібнення вугільної шихти помітно впливає на її технологічні властивості.

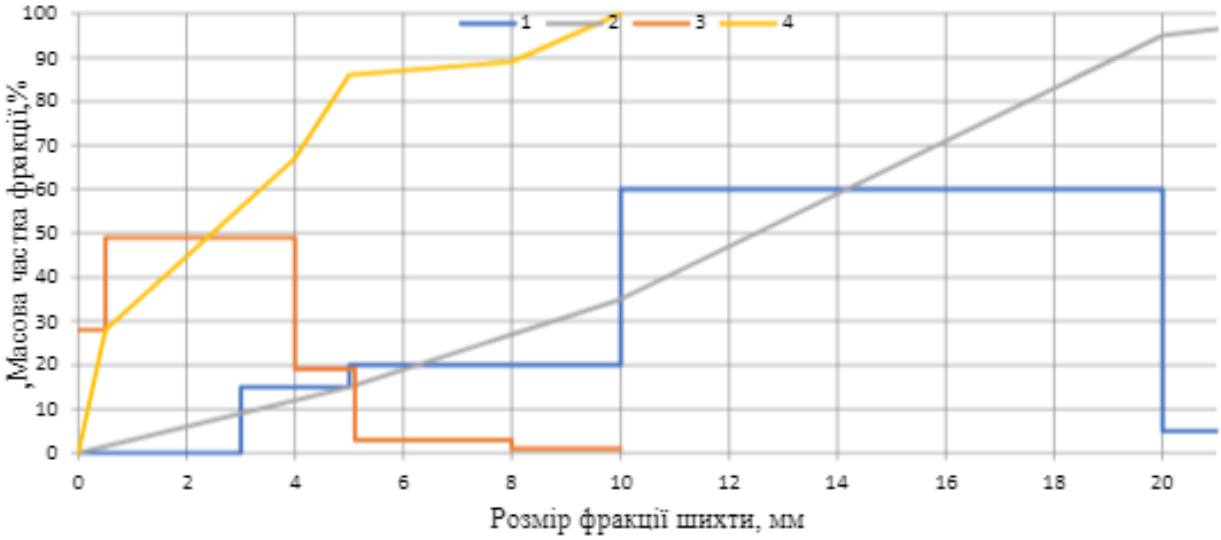
Найбільш цінними із цього погляду є класи крупністю 3-0,5 мм. Більш крупні зерна мають меншу величину питомої поверхні, що дозволяє їм брати активну участь у поверхневій взаємодії з іншими елементами вугільного засипу на стадіях спікання і коксоутворення.

Навпаки, переподрібнення вугільних зерен, призводить до так званого явища «самоопіснення» внаслідок чого утруднюється реалізація так званого потенціалу спікання, що характерно для вугільних шихт.



1 – диференціальна крива для вихідної шихти;
2 – диференціальна крива для подрібненої шихти;
3 3 – інтегральна крива для вихідної шихти;
4 4 – інтегральна крива для подрібненої шихти

Рисунок 1.5 - Диференціальні та інтегральні криві розподілу крупності вихідної та подрібненої шихти для щокової дробарки [10].



1 – диференціальна крива для вихідної шихти;
2 – диференціальна крива для подрібненої шихти;
3 – інтегральна крива для вихідної шихти;
2 – інтегральна крива для подрібненої шихти

Рисунок 1.6 - Диференціальні та інтегральні криві розподілу крупності вихідної та подрібненої шихти для роторної дробарки [10].

Встановлено також, що збільшення вмісту класу 0-0,5 мм в шихті, тобто її переподрібнення, призводить до зниження насипної маси шихти, і як

наслідок, до зниження механічних властивостей коксу. Традиційно в практиці підготовки вугільної шихти до коксування використовуються молоткові дробарки. Однак при їх використанні порівняно важко регулювати ступінь подрібнення шихти.

Таким чином регулювання гранулометричного складу шихти, а саме, зниження вмісту класу 0-0,5 мм до оптимального значення 29-32 % - найбільш дієвий метод поліпшення механічної міцності коксу, внаслідок збільшення насипної маси вугільного завантаження. Традиційний погляд на те, що чим більший розмір має частинка вугілля, тим більші зусилля необхідні для його руйнування є неабсолютним. Це пов'язано з тим, що вугільна шихта надходить на КХП стабілізована за міцністю за рахунок попереднього руйнування в процесі збагачення. У молоткових дробарках реалізуються два способи дроблення: удар і стирання. Наростання дріб’язку відбувається в основному за рахунок стирання. Для зменшення переподрібнення шихти необхідно виключити або знизити вплив сил стирання під час дроблення. Для отримання шихти оптимального гранулометричного складу раціонально використовувати вибіркове подрібнення тільки крупної її частини. Цього можна досягти при використанні роторних дробарок, у яких дрібні фракції проходять через камеру дроблення транзитом, тобто без взаємодії з робочим органом. Отже, заміна молоткових дробарок на роторні у вуглепідготовчому цеху КХП дасть змогу знизити вміст класу - 0,5 мм до оптимального.

1.6 Аналіз основних типів дробарок ударної дії

До подрібнювачів ударної дії відносяться молоткові, ударно-відцентрові, роторні дробарки, які дозволяють досягати високих ступенів дроблення i = 15 ... 20.

Принципові схеми всіх дробарок ударної дії однакові (рис.1.7).

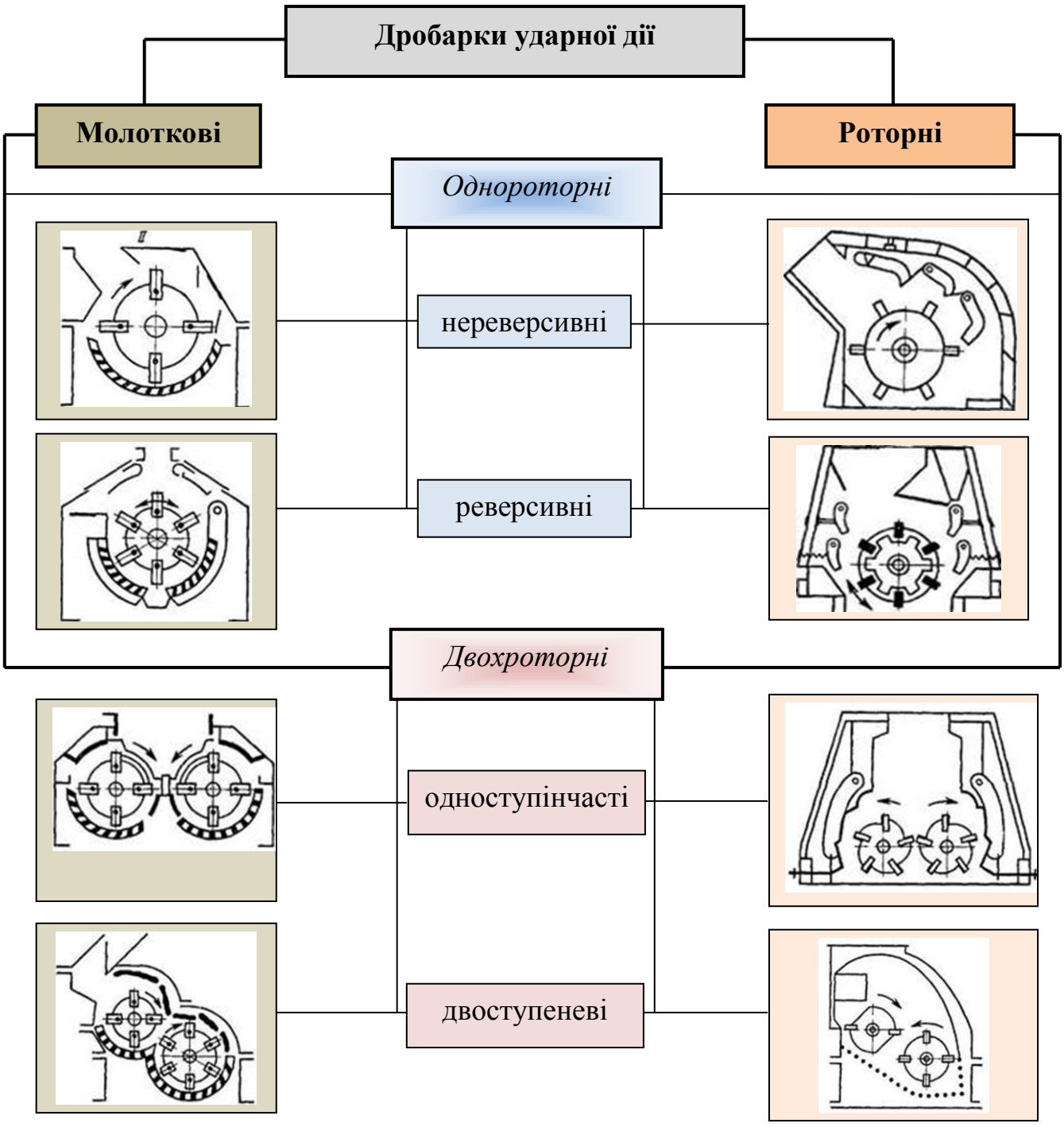


Рисунок 1.7 - Принципові схеми дробарок ударної дії

Дробарки ударної дії поділяють на роторні, в яких дроблення здійснюється ударами бил, жорстко закріплених на роторі, і молоткові, дроблення в яких здійснюється ударами молотків, шарнірно закріплених на роторі.

За кількістю роторів вони бувають одно- і двохроторнні. Найбільшого поширення набули одношроторні дробарки для дроблення малоабразивних матеріалів середньої і малої міцності. Різновид одношроторних дробарок - реверсивні, у яких симетрична камера дроблення і вони можуть працювати при різних напрямках обертання ротора, що дозволяє використовувати била і молотки з двох сторін без переустановлення, тобто збільшується міжремонтний термін роботи машини.

Двохроторнні дробарки бувають одноступінчастого дроблення, коли обидва ротора працюють самостійно і вихідний матеріал надходить рівномірно на кожен з них, і двоступеневого, коли вихідний матеріал надходить спочатку на перший ротор, потім на другий , де остаточно додроблюється.

Основний вузол дробарки - ротор. Для ефективного руйнування дробленого матеріалу підбирають певні окружні швидкості ротора (20 ... 80 м/с), що забезпечують необхідну кінетичну енергію ротора або молотків. При таких високих окружних швидкостях в роторі виникають великі ударні навантаження і навантаження від відцентрових сил, тому конструкція самого ротора, змінних деталей бив і молотків і їх кріплень повинна забезпечувати високу надійність їх роботи і зручність технічного обслуговування.

Головні параметри дробарок ударної дії - діаметр і довжина ротора.

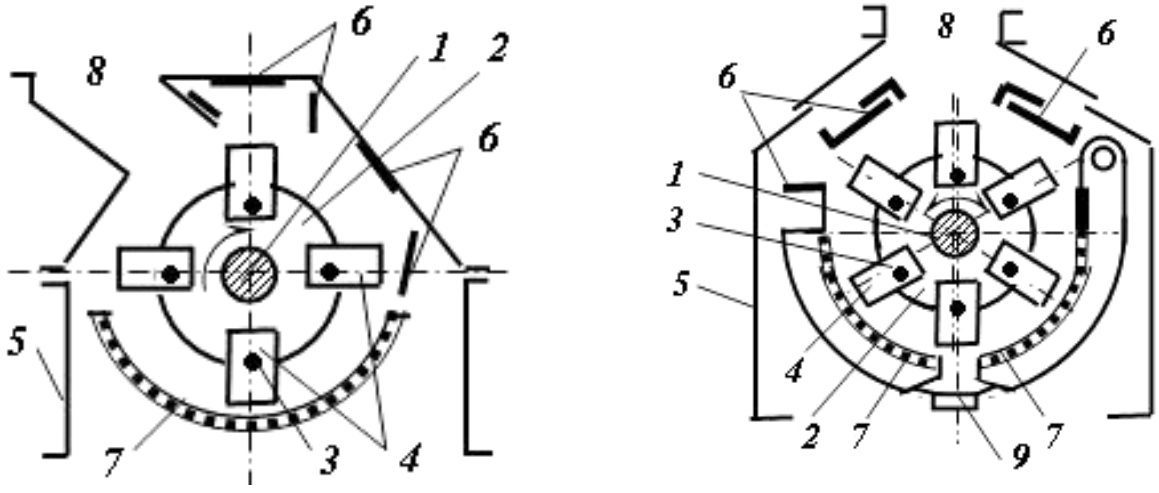
В дробарках ударної дії шматок піддається впливу робочого органу тільки з одного боку. Виникаюча при цьому сила врівноважується силою інерції шматка, яка повинна бути достатньою для створення руйнівних напружень.

Дроблення матеріалу відбувається під впливом механічного удару. При цьому кінетична енергія рухомих тіл частково або повністю переходить в деформації руйнування.

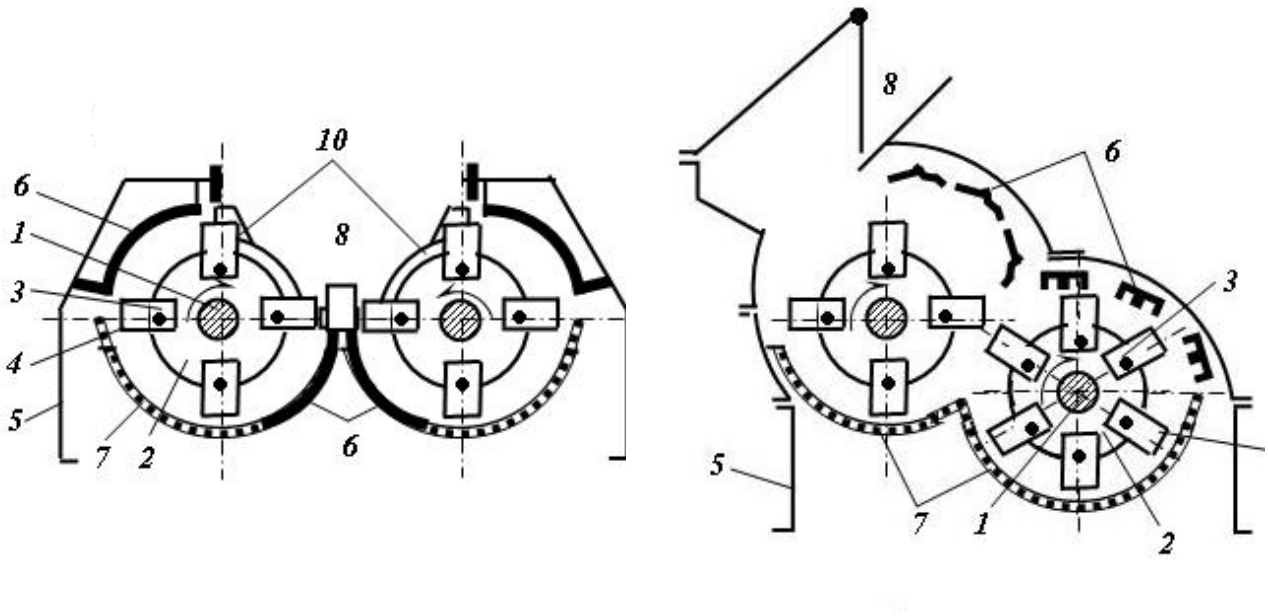
1.5.1 Аналіз основних типів дії молоткових дробарок

У молоткових дробарках процес дроблення визначає лише кінетична енергія самого молотка.

На рис.1.8 наведені схеми основних типів молоткових дробарок. Вихідний матеріал через завантажувальний отвір *8* надходить у робочий простір дробарки, де на горизонтальному валу *1* обертається ротор *2* з молотками *4*, закріпленими шарнірно. Молотки вдаряють по грудках і з силою відкидають їх до стінок корпуса *5* на броньові плити *6*, де грудки додроблюються. Таким чином, руйнування грудок матеріалу здійснюється ударом молотків і ударом об футеровочні плити, а також роздавлюванням і стиранням грудок молотками на колосниковій решітці *7*. Дроблений продукт розвантажується униз під дробарку.



А б



в г

Одноротorні: *а* – нереверсивна; *б* – реверсивна.
Двороторні: *в* – паралельного дроблення; *г* – послідовного дроблення.
1 – горизонтальний вал; 2 – ротор; 3 – осі молотків; 4 – молотки;
5 – корпус дробарки; 6 – футеровочні плити; 7 – колосникова решітка;
8 – завантажувальна лійка; 9 – уловлююча камера; 10 – фігурні колосники.
Рисунок 1.8 – Схеми основних типів молоткових дробарок [11-15]

Молоткові дробарки виготовляються з колосниковими решітками і без них. Дробарки з колосниковими решітками застосовуються в основному для дрібного дроблення, вони призначені для отримання дробленого продукту визначеної крупності. Молоткові дробарки без колосникових решіток видають дроблений продукт заданої крупності внаслідок підвищеної швидкості обертання ротора. Дробарки для дроблення вологих глинистих матеріалів обладнані рухомою відбійною плитою, яка являє собою вбудований у дробарку пластинчатий конвеєр важкого типу.

Таким чином, завдяки конвеєрній подачі в’язкого матеріалу до ротора виключається забивання дробарки.

Молоткові дробарки бувають з обертанням ротора у одну сторону і реверсивні. Можливість зміни напрямку обертання ротора у реверсивних дробарках дозволяє двобічне використання молотків без розбирання дробарки для їхнього повороту.

За числом робочих валів молоткові дробарки розділяються на одно- і двороторні. Двороторні дробарки мають більші в порівнянні з однороторними розміри завантажувального отвору, що дозволяє дробити у них матеріал крупністю до 1200 мм.

Молоткові дробарки призначені для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів низької і середньої твердості, але частіше їх застосовують для середнього і дрібного дроблення. В молоткових дробарках досягається ступінь дроблення до 30 – 40. Вони характеризуються високою продуктивністю і малою питомою витратою електроенергії.

Верхня *1* і нижня *2* частини корпуса роблять литими або зварними з прокатної чи листової сталі. Біля бокових стінок корпуса розташовані підшипники, в яких обертається вал *6* ротора *3*. Ротор являє собою збірну конструкцію: на валу *6* жорстко закріплені диски, в кожному з них є шість отворів, крізь які пропущені стержні *5*, що служать осями для шарнірно підвішених молотків *4*.

Верхня частина корпусу футерується відбійними плитами *7*. У нижній частині корпусу розташована колосникова решітка *8*, яка займає 135 – 180^{o} кола, що описується молотками. Вихідний матеріал руйнується ударами молотків, ударами об футерувальні плити, роздавлюванням і стиранням на колосниковій решітці.

Дроблений продукт розвантажується під дробарку крізь колосникову решітку. Колосники решітки виготовляються з сталі марки 60С2 або 45Х і можуть мати різну форму, але частіше за все – трапецієвидну з розширенням щілини у бік розвантаження під кутом 10 – 20^{o}. Вони нахилені до радіуса ротора під кутом 40 – 50^{o} у бік руху матеріалу, що зменшує залипання решітки при дробленні матеріалів з підвищеною вологістю.

Шарнірне кріплення молотків дозволяє уникати поломок при потраплянні у робочий простір дробарки предметів, що не дробляться, тому що у цьому випадку молотки відхиляються на деяких кут.

Одноротoрна реверсивна молоткова дробарка (рис.1.8,б) типу ДМРЕ складається зі зварного корпуса *5*, ротора *2* і колосникової решітки *7*. Передбачена можливість регулювання положення колосникової решітки за допомогою спеціального механізму.

Вал ротора *1* обпирається на підшипники закріплені на станині дробарки. Обертання вал ротора отримує від електродвигуна, з яким він з'єднується муфтою. На валу *1* нерухомо закріплені диски ротора *2*, крізь отвори *2* яких пропущені стержні із вільно надітими на них молотками *4*. Вихідний матеріал через завантажувальний отвір *8* надходить у робочий простір дробарки, де у результаті багаторазових ударів молотків *4* і ударів об футеровочні броньовані плити *6* відбувається дроблення матеріалу. Остаточне дроблення матеріалу роздавлюванням і стиранням здійснюється у кільцевому зазорі між колосниковою решіткою *8* і кінцями молотків *4*.

Колосникова решітка складається з двох однакових секцій, які зверху підвішені на осях, а знизу опираються на ексцентрики регулювального механізму. Поворот ексцентриків змінює положення колосникової решітки залежно від напрямку обертання ротора.

Для уловлювання металевих та інших предметів, що потрапили у дробарку випадково, передбачена уловлююча камера *9*, яка розвантажується періодично.

Центральне розташування завантажувального отвору *8* дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання молотків без розбирання дробарки для їхнього повороту. Тобто знос молотків у дробарках цього типу рівномірний з двох сторін.

Дробарка призначена для дроблення матеріалів середньої міцності і вологості до крупності 3 – 5 мм.

Молоткова двороторна дробарка з паралельним розташуванням роторів (рис.1.8,*в*) та обертанням роторів назустріч один одному. Вихідний матеріал подається у завантажувальну лійку *8*, яка створена торцевими стінками

корпуса *5* дробарки і фігурними колосниками *10*. При обертанні роторів *2* вільно підвішені молотки *4* проходять у зазори між фігурними колосниками *10* і дроблять грудки матеріалу. Дроблений продукт падає на решітки під роторами, де він дробиться остаточно і розвантажується під дробарку. Вал *1* кожного ротора обертається через клинопасову передачу від окремого електродвигуна. Привідні шківи обважнені і служать також, як маховики. Додатково на вільних кінцях валів роторів також насаджені маховики для вирівнювання ходу дробарки.

Найбільша з дробарок цього типу може приймати грудки довжиною до 2000 мм і масою до 4 т при дробленні до 30 – 35 мм при продуктивності 1000 т/год.

Молоткова двороторна дробарка з послідовним розташуванням роторів (рис.1.8,*г*) складається із зварного корпуса *5*, роторів *2* і колосникових решіток *7*, що розташовані під роторами. Верхній і нижній ротори з молотками *4* обертаються в одному напрямку. Над кожним ротором розміщені відбійні плити *6*, які переміщають при регулюванні дробарки. Привод обох роторів здійснюється через клинопасову передачу від одного електродвигуна. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно із завантажувальної лійки *8*, наносяться удари молотками верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов потрапляють під удари молотків верхнього або нижнього ротора. Нижній ротор ударяє по грудках, відкидає їх на свої відбійні плити і проштовхує матеріал на нижню колосникову решітку. Зона між двома роторами є місцем найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь щілини колосникових решіток. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між молотками і відбійними плитами, а також між молотками і колосниковими решітками.

Одноротрна нереверсивна молоткова дробарка (рис.1.9) типу СМД-135 складається з таких основних вузлів: корпуса *1* з кришкою, ротора *2* з

шарнірно підвішеними кільцевими молотками *3*, приймальної камери, заслінки *4*, пастки *5* для предметів, що не дробляться, і колосникової решітки *6*.

Вихідний матеріал завантажується через люк приймальної камери і захоплюється ротором до колосникової решітки. Руйнування матеріалу здійснюється ударами молотків, а також при ударі об броньові плити або зрізуванням між елементами колосникової решітки і молотками.

При потраплянні предметів, що не дробляться, вони викидаються у приймальну камеру, відбиваються від її верхньої частини, відхиляють заслінку і надходять у пастку.

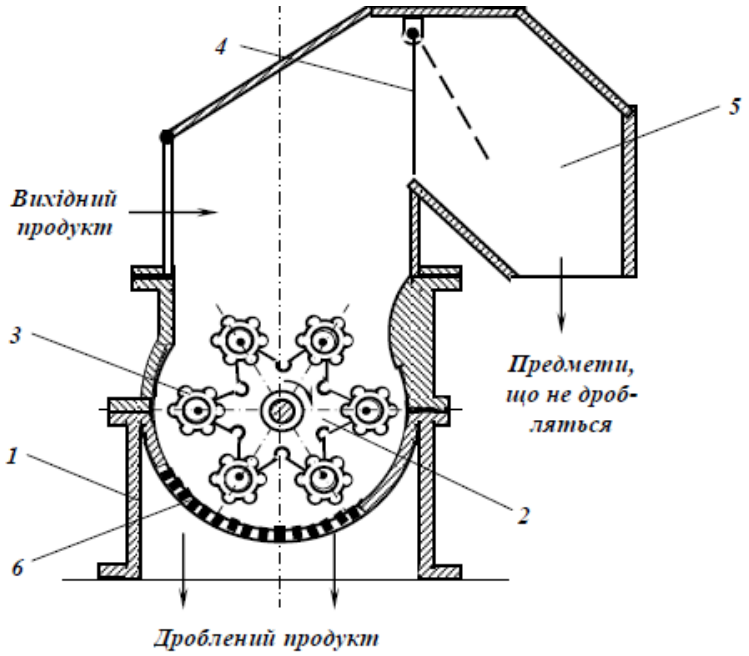


Рисунок 1.9 – Схема молоткової дробарки СМД-135 [14,15]

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – молотки-фрези; 4 – заслінка; 5 – пастка; 6 – колосникова решітка

Молоткові дробарки цього типу застосовуються при дробленні шлаків, металічної стружки, грудкових відходів сплавів кольорових металів, вузлів електричних машин, кабельної продукції, елементів радіоапаратури і ін.

1.5.2 Аналіз основних типів роторних дробарок

Роторні дробарки застосовуються для дроблення вапняку, доломіту, мергелю, гіпсу та інших матеріалів. У порівнянні з щоковими і конусними роторні дробарки більш продуктивні, економічніше за витратами електроенергії, легше за масою, простіше у виготовленні і обслуговуванні, менш чутливі до попадання в камеру дроблення металевих предметів [29,30].

Основний їх недолік необхідність часто замінювати била, які при дробленні абразивних матеріалів швидко виходять з ладу.

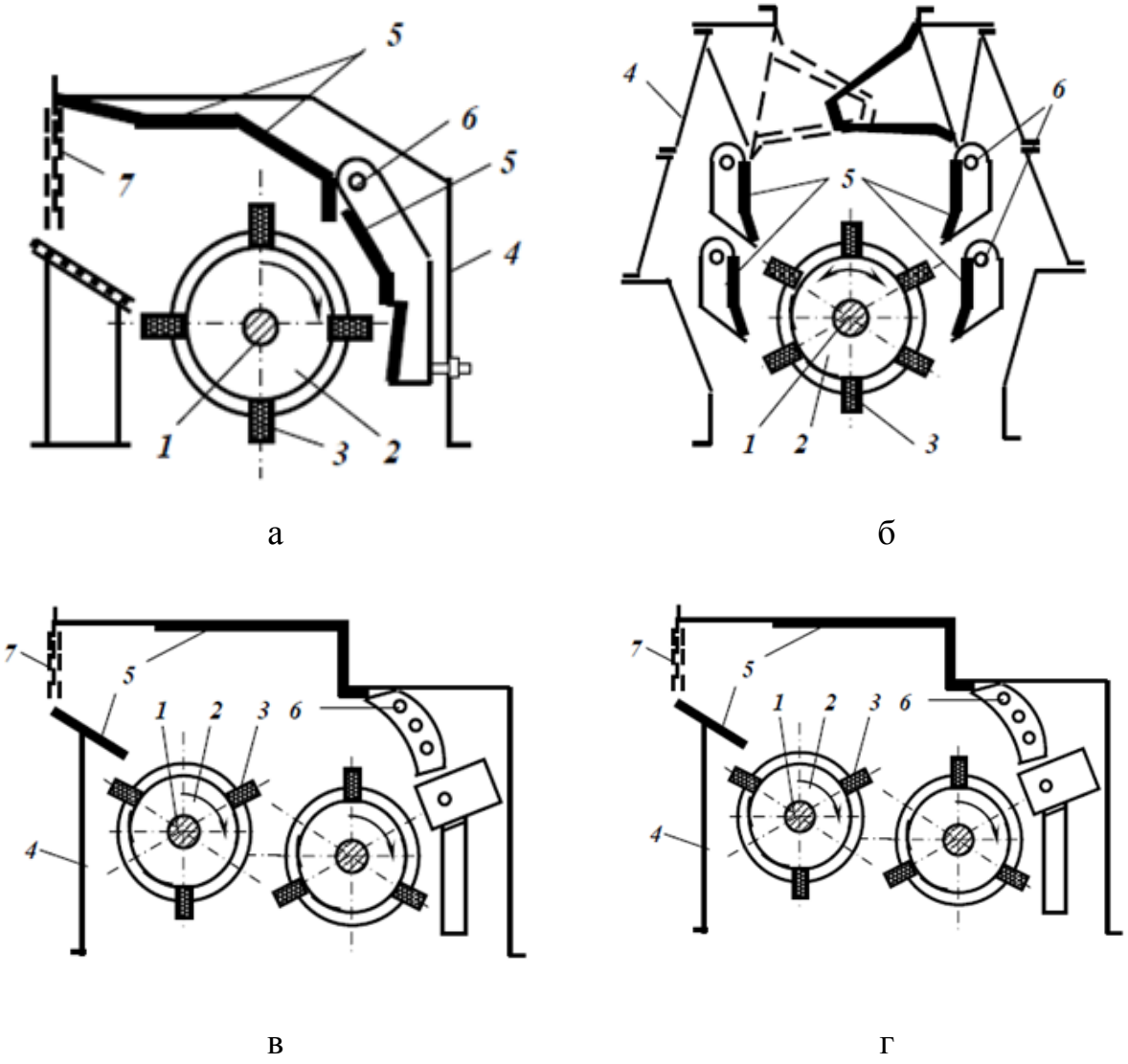
У роторних дробарках матеріал дробиться ударом бил, які жорстко закріплені на роторі, що обертається у робочому просторі дробарки, обмеженому футерованим броньовими плитами корпусом. На рис.1.10 наведені схеми основних типів роторних дробарок.

Принцип дії роторних дробарок аналогічний принципу дії молоткових дробарок. У роторних дробарках дроблення здійснюється жорстко закріпленими на роторі *2* билами *3*. Матеріал завантажується в зону ротора, що обертається з великою швидкістю. Ударами бил грудки руйнуються, і їх уламки відкидаються на відбійні броньові плити *5* або колосники, що утворюють камеру дроблення. Ударяючись об футеровку, грудки руйнуються і знову потрапляють на ротор. Це повторюється доти, поки грудки, досягши визначеної крупності, не вийдуть із дробарки через вихідну щілину або отвори колосникових решіток.

Роторні дробарки бувають одно- і двороторні з послідовним дробленням матеріалу кожним ротором або з одночасним дробленням двома роторами, з колосниковою решіткою і без неї. Однороторні дробарки розрізняють на реверсивні і нереверсивні. Характерною особливістю роторних дробарок є те, що в ударі по грудках вихідного матеріалу бере участь масивний ротор, тому удари значно міцніші ніж у молоткових дробарках. Це дозволяє застосовувати роторні дробарки у першій стадії дроблення (дробарки типу ДРК) для руйнування порівняно твердих гірських

порід. Роторні дробарки застосовують також для середнього та дрібного дроблення (дробарки типу ДРС). Конструкції дробарок ДРК і ДРС аналогічні.

У одноротoрну нереверсивну дробарку (рис.1.10,*а*) типу ДРК матеріал подається на обертовий масивний ротор *4* і дробиться ударами бил *5* і об відбійні плити *7*. Відбійні плити *7* на верхній частині корпуса *2* закріплені нежорстко, тому при потраплянні предметів, що не дробляться, вони відхиляються на осях і пропускають їх.



а б

в г

Рисунок 1.10 – Схеми основних типів роторних дробарок [15-18]

Одноротoрні: *а* – нереверсивна; *б* – реверсивна.

Двороторні: *в* – послідовного дроблення; *г* – паралельного дроблення.
1 – горизонтальний вал; 2 – масивний ротор; 3 – била; 4 – корпус дробарки;
5 – відбійні плити; 6 – осі підвісу відбійних плит; 7 – ланцюгові штори.

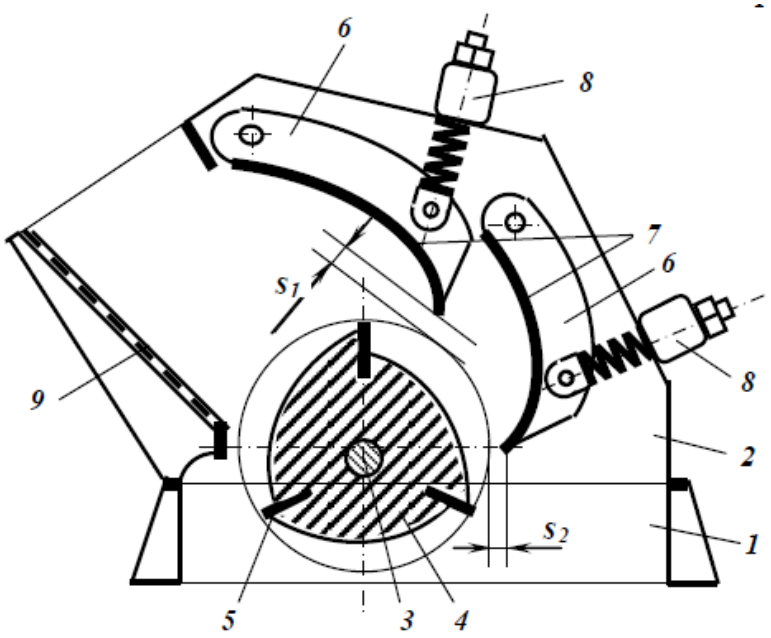


Рисунок 1.11 – Одноротрна дробарка крупного дроблення [14,15]
1 – основа корпуса; 2 – верхня частина корпуса; 3 – вал; 4 – ротор;
5 – била; 6 – відбійні плити; 7 – футеровочні плити;
8 – регулювальний пристрій; 9 – решітка.

У первісне положення відбійні плити повертаються під дією пружин регулювального пристрою *8*. Дробарки типу ДРК мають дві відбійні плити, а дробарки типу ДРС – три відбійні плити, які ділять робочу зону дробарки відповідно на дві або три камери дроблення. Відбійні плити мають криволінійний профіль і повністю або тільки у нижній частині закриті футерувальними плитами 7. Зазори між обертальним ротором і нижньою кромкою відбійних плит є розвантажувальним отвором камери дроблення. Положення відбійних плит фіксується тягами і пружинами регулювального пристрою *8*. Регулювання ширини розвантажувальної щілини камери дроблення здійснюється також за допомогою регулювального пристрою *8*.

Вихідний матеріал надходить на нахилену решітку *9*, де відділяється дріб'язок, що не потребує дроблення. У завантажувальній лійці встановлені ланцюгові штори, які запобігають викиданню матеріалу з робочого простору дробарки. Розвантаження дробленого продукту здійснюється через розвантажувальний пристрій дробарки. Ротор до обертається електродвигуном через клинопасову передачу. Окружна швидкість ротора регулюється зміною приводних шківів.

Одноротoрна реверсивна дробарка (рис.1.10,*б*) завдяки центральному розташуванню завантажувального отвору дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання бил, що забезпечує їх рівномірний знос.

Двороторна дробарка з послідовним розташуванням роторів (рис.1.10,*в*) складається із зварного корпуса *4*, усередині якого розташовані два ротори *2,* що обертаються в одному напрямку. Привод роторів здійснюється через клиноремінну передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно, наносяться удари билами верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил верхнього або нижнього ротора. Зазор між двома роторами є областю найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

Двороторна дробарка з паралельним розташуванням роторів (рис.1.10,*г*) складається із зварного корпуса *4*, усередині якого розташовані два ротора *2,* що обертаються у протилежних напрямках. Над кожним ротором розміщені відбійні плити *5*, які переміщають при регулюванні дробарки. Привод обох роторів здійснюється через клинопасову передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно наносяться удари билами роторів. Грудки частково розколюються, відкидаються кожним ротором на відбійні

плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

Двороторні дробарки в порівнянні з однороторними менш піддані забиванню і звичайно застосовуються для дроблення більш вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, вони також дозволяють завантажувати матеріал більшої крупності. Ширину щілини колосникових решіток і відстань між ними та кінцем бил (молотків) вибирають залежно від необхідної крупності дробленого продукту і вологості матеріалу, що дробиться. При дробленні глинистих вологих руд, щоб уникнути забивання колосникових решіток, відстань між колосниками збільшують. У важких випадках дробарки працюють без колосникових решіток. Без колосникових решіток продуктивність дробарки підвищується, але при цьому в дробленому продукті з'являються зерна крупніші допустимих розмірів [14,15].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ УДАРОМ

2.1 Аналіз гіпотез, що пояснюють механізми подрібнення

Основні фактори, від яких залежить витрата енергії на одиницю продукції, - твердість матеріалу, його вологість, в'язкість, стан поверхні, розмір і форма шматків, розміщення шматків між робочими органами машини та ін.

Єдиної універсальної теорії подрібнювання немає. Минулого сторіччя було зроблено перші спроби теоретично обґрунтувати процеси подрібнювання. Істотний внесок у вирішення цієї проблеми належить таким вітчизняним і зарубіжним науковцям та інженерам, як Л. Б. Левінсон, В. Л. Кірпічов, П. Риттінгер, Ф. Кік, Г. Г. Єгоров, З. В. Канторович та ін.

Щоб визначити кількість енергії, потрібної для подрібнювання матеріалу, є два теоретичні підходи: поверхнева теорія подрібнювання, запропонована 1867 року П. Риттінгером, та об'ємна теорія, запропонована 1874 року В. Л. Кірпічовим.

Поверхнева теорія (закон Ріттінгера): робота, затрачувана на подрібнювання тіла, прямо пропорційна площі новоутворених поверхонь.

Пояснити цей закон можна так. Нехай на поділ кубика (рис.2.1) з ребром, що дорівнює одиничному розміру, по одній площині витрачають роботу A. Для поділу такого самого кубика на дрібніші зі стороною в 1/2 потрібно розділити його по трьох площинах. При цьому витрачена робота дорівнює $3A$.

Аналогічно, якщо розділити кубик на ще дрібніші зі сторонами 1/3, 1/4, …, $1/n$, … $1/m$, то площин поділу буде 6, 9, …, $3(n-1)$, …, $3(m-1)$.

Робота, затрачувана на подрібнювання, становитиме $6A$, $9A$, …, $3A(n-1)$, …, $3A\,(m-1)$.

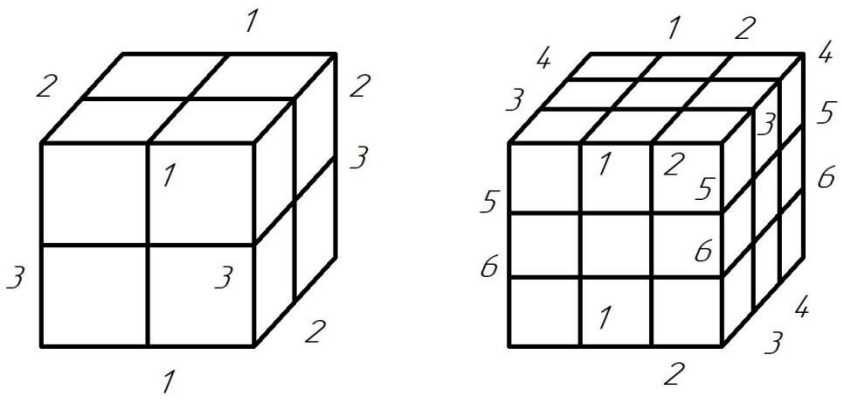


Рисунок 2.1 – Схема подрібнення кубика [7]

Отже, відношення робіт, витрачених на поділ матеріалу у формі куба на кубики зі сторонами 1/*n*, 1/*m*, таке:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{(n-1)\cdot 3A}{(m-1)\cdot 3A} = \frac{n-1}{m-1} \qquad (1.1)$$

За досить великих *n* і *m* одиницею можна знехтуваити, тоді:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{n}{m} \qquad (1.2)$$

тобто за досить великого ступеня подрібнювання робота дроблення прямо пропорційна ступеню подрібнювання.

Ріттінгер запропонував свою гіпотезу, але не підтвердив її дослідним шляхом. Інші дослідження привели до висновку, що закон Ріттінгера можна використовувати за певних умов, а саме – у разі помелу твердих матеріалів. Закон Ріттінгера має ще і той недолік, що дає змогу тільки порівняти витрати енергії при різному ступені подрібнення і не дає можливості розрахувати абсолютну величину роботи.

Об’ємна теорія (Закон Кірпічова–Кіка) основана на тому, що на подрібнюваний шматок матеріалу діють зовнішні сили, які зумовлюють у

матеріалі напругу, що дорівнює межі міцності під час стискання. Отже, робота витрачається на деформацію матеріалу.

Згідно із законом Кірпічова–Кіка робота подрібнення пропорційна об'єму деформованих шматків, що подрібнюються.

З теорії пружності відомо, що робота деформації під час стискання

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} \tag{1.3}$$

де σ - межа міцності під час стискання;

V - об’єм подрібнюваного матеріалу;

E - модуль пружності.

За об’ємною теорією відношення робіт, затрачуваних на подрібнювання геометрично подібних тіл того самого складу, дорівнює відношенню об’ємів цих тіл:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{1.4}$$

Розглянутий закон не враховує ступеня подрібнення. Крім того, під час розрахунків роботи подрібнення для різних машин необхідно знати величину V.

Об’ємну теорію варто застосовувати для опису процесів подрібнювання, у яких енергія витрачається на деформацію, а поверхневу теорію - для описання процесів помелу, у яких переважає стирання з інтенсивним утворенням нової поверхні.

Узагальнена теорія подрібнення (Закон Ребіндера) деякою мірою об'єднує поверхневу і об'ємну теорії. Закон Ребіндера математично можна записати так:

$$A = \sigma_\Delta F + K_\Delta V, \tag{1.5}$$

де А – робота, яка затрачується на руйнування твердого тіла, Дж;

K і σ - коефіцієнти пропорційності: (питома поверхнева енергія, Дж/м^2 та питома робота пластичної і пружної деформації, Дж/м^3 відповідно;

$_{\Delta}V$ і $_{\Delta}F$ - деформований об'єм і новоутворена поверхня.

Коли під час подрібнення знов утворені поверхні невеликі, що постерігається під час дроблення, першою складовою $K_{\Delta}V$ рівняння можна нехтувати і $A = \sigma_{\Delta}F$, тобто отримали закон Кірпічова–Кіка. Під час помелу, навпаки, $_{\Delta}V$ – мала величина і $A = \sigma_{\Delta}F$. Розглянуті теорії подрібнення характеризують лише загальні теоретичні основи процесів подрібнення і не дають змогу із достатньою точністю розраховувати витрати енергії. Тому під час розрахунків потужності приводів подрібнювальних машин у більшості випадків використовують практичні дані.

Аналізуючи поверхневу, об'ємну й узагальнену теорії подрібнення, можна зробити висновки про їх застосування.

Поверхневу теорію застосовують для пояснення процесу різання тіла (щодо подрібнювання відповідає процесу стирання), а також опису процесів дрібного дроблення і помелу, тому що вона враховує співвідношення між ступенем подрібнювання і витратою енергії. Недолік – труднощі визначення питомої роботи, затраченої на утворення нової поверхні.

Об'ємна теорія пояснює процеси подрібнювання роздавлюванням і ударом, які застосовують переважно для крупного і середнього дроблення. Вона дає можливість визначати роботу руйнування, але не враховує впливу ступеня подрібнювання на витрату енергії. Узагальнена теорія, з інженерного погляду, непридатна для вирішення конкретних завдань, тому що потребує точного визначення коефіцієнтів для кожного матеріалу.

Великого поширення набули формули, що поєднують поверхневу й об'ємну теорії, зокрема у працях Ф. Бонда, А. К. Рундквіста та ін.

Заслуговує на увагу формула потужності процесу подрібнювання В.Ф. Дубовицького:

$$N = \frac{\sigma^2 П_V}{2{,}4E} \cdot (i-1) \qquad (1.6)$$

де σ - межа міцності, МН/м^2;

$П_V$ - об'ємна продуктивність технологічної лінії, м^3/год;

E - модуль пружності матеріалу, МН/м^2.

Формулу (1.6) отримано в результаті об'єднання поверхневої й об'ємної теорії для процесів подрібнення роздавлюванням, вона дає можливість (якщо відомо ККД процесу) визначити потужність урухомника (приводу) багатьох дробарок [7].

Розглянуті теорії подрібнення характеризують лише загальні теоретичні основи процесів подрібнення і не дають змогу із достатньою точністю розраховувати витрати енергії. Тому під час розрахунків потужності приводів подрібнювальних машин у більшості випадків використовують практичні дані.

2.2 Фактори, що впливають на процес подрібнення дробарками ударної дії

Ефективність роботи дробарки оцінюють за продуктивністю, якістю подрібнення, питомою енергоємністю та матеріаломісткістю. Ці показники значною мірою зумовлені конструктивно-режимними параметрами дробарки [4-6]. Роторна дробарка дозволяє якісно подрібнювати матеріали та отримувати готовий продукт, вирівняний за гранулометричним складом до 98%, з мінімальною кількістю 1-3% пилоподібних фракцій [19]. У ній використовуються принципи руйнування вихідних матеріалів, закладені в конструкціях молоткових, відцентрово-роторних та вальцьових подрібнювачів.

До основних параметрів, що характеризують ефективність її роботи, відносять: частоту обертання ротора, робочий зазор, інтенсивність та

щільність заповнення дробильної камери, тривалість впливу на вихідний продукт, конструктивні особливості робочих органів та геометричне виконання їх рифлених поверхонь.

Сукупність факторів, які впливають на ефективність роботи дробарок ударної дії, умовно можна розділити на технологічні, механічні та конструктивні (рис.2.4) [19,20].

Виявлено, що суттєво впливають лише 11 факторів. Серед них є фактори, фіксовані для даної конструкції: кількість молотків, конструкція деки, кут обхвату решета і т.д. Крім того, від крупності помелу залежить діаметр отворів решета, а вологість матеріалу обмежена вимогами стандарту [20].

Основними змінними факторами, що визначають витрати енергії та якість подрібнення є подача матеріалу, зазор між молотками і декою, швидкість молотків. Змінні фактори можна поділити на регульовані - подача матеріалу в камеру подрібнення, установочний зазор між молотками та декою, швидкість обертання ротора, і нерегульовані - ті, що змінюються внаслідок відносного коливального руху молотків: зміна зазору та швидкості удару молотків внаслідок їх відхилення від радіально - рівноважного положення.

Таким чином, коливання шарнірно підвішених молотків спричиняє зміну основних факторів, що впливають на параметри процесу подрібнення, отже є змінним нерегульованим фактором.

Основними змінними факторами, що визначають витрати енергії та якість подрібнення є подача матеріалу, зазор між молотками і декою, швидкість молотків. Змінні фактори можна поділити на регульовані - подача матеріалу в камеру подрібнення, установочний зазор між молотками та декою, швидкість обертання ротора, і нерегульовані - ті, що змінюються внаслідок відносного коливального руху молотків: зміна зазору та швидкості удару молотків внаслідок їх відхилення від радіально - рівноважного положення.



Рисунок 2.1 – Основні фактори, що впливають на ефективність роботи дробарок ударної дії [20].

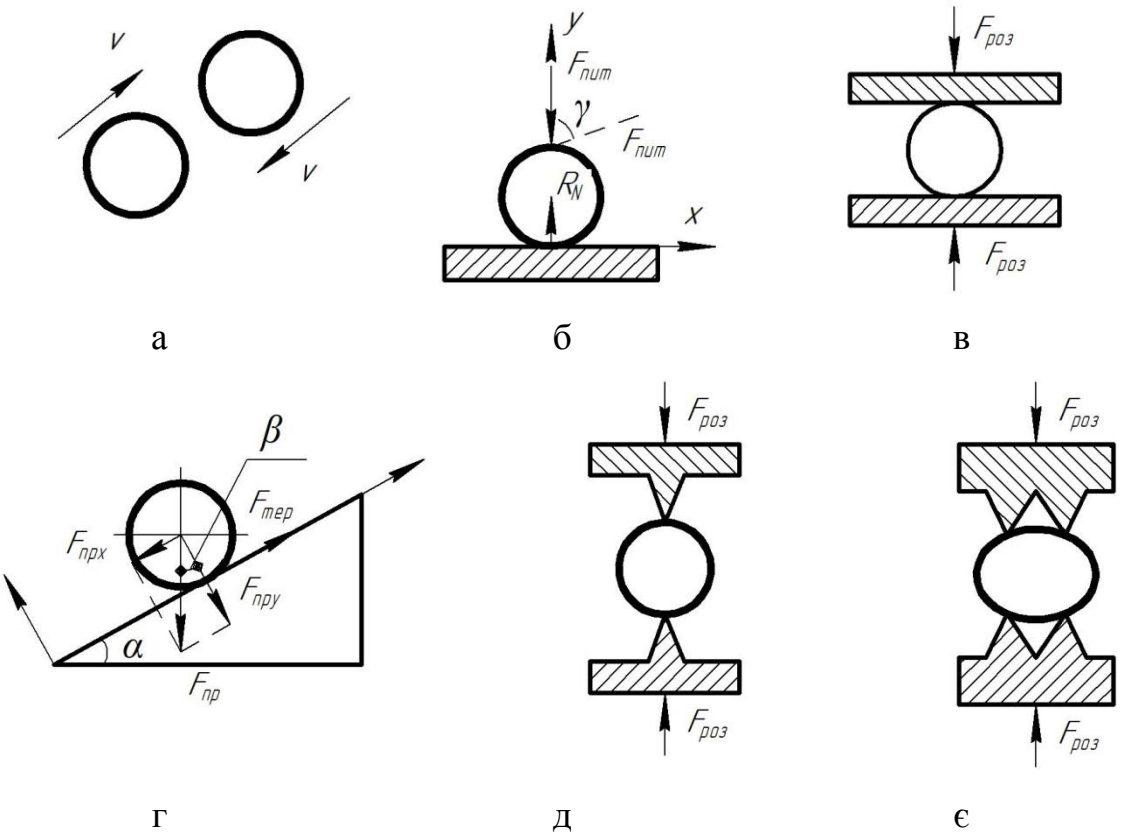
Процес подрібнення є важливою складовою виробничого процесу. Це пов'язано з необхідністю руйнування матеріалу до певної крупності (як правило, від 1 мм до десятків мікронів) або певного гранулометричного складу. Процес подрібнення на сьогоднішній день є надзвичайно енергоємним та дорогим. Підвищення ефективності процесів подрібнення є надзвичайно актуальним і досягається розробкою та впровадженням подрібнювальних машин з покращеними показниками функціонування. У процесі подрібнення твердих матеріалів частки руйнуються внаслідок невиконання умов міцності нормальних σ і дотичних τ напруг, що виникають у матеріалі при утворенні наступних видів деформацій: стиснення, розтягування, вигину та зсуву, тобто:

$$\sigma = \frac{F}{S} > \sigma_{\lim} \tag{2.1}$$

$$\tau = \frac{F_\tau}{S} > \tau_{\lim} \tag{2.2}$$

де σ_{lim} , τ_{lim} – граничні значення відповідно нормальних та дотичних напруг подрібнюваного матеріалу [20].

Для забезпечення відповідного виду деформації застосовуються стирання, роздавлювання, розколювання, злам, зріз, а також ударну дію як найбільш поширені методи подрібнення різних видів матеріалів (рис.2.2) [21].



а б в

г д є

Рисунок 2.2 – Поширені види руйнівної дії при подрібненні [22]

2.3 Аналіз способів руйнування матеріалов

Розглянемо визначення ефективного руйнівного впливу за критеріями максимальних питомої поверхні S та продуктивності W, а також мінімальної споживаної потужності P.

Як правило, при механічному диспергуванні оброблюваного матеріалу за допомогою деформації стиснення, останній піддається одиночної або комплексної дії сил статичного роздавлювання, стирання та удару. В результаті стиснення відбувається поступове підвищення внутрішньої напруги, при якому при досягненні значення вище границі міцності стиснення матеріал руйнується. Це супроводжується появою тріщин, що поширюються у напрямку стиснення, і не призводять, як правило, до повного руйнування матеріалу. Дане явище пояснюється тим, що частинки будуть утримуватися разом з внутрішніми зв'язками, що ще збереглися, а також силами тертя, що виникають між частинками і стискуючими поверхнями. При продовженні стиснення тріщини збільшуються, від тіла відокремлюються дрібні частинки, але його основна маса залишиться в компактному стані навіть і тоді, коли навантаження, що стискає, буде знято.

Процес руйнування частинок за допомогою ударного впливу може бути здійснений у двох варіантах:

1) вільний удар (рис.2.2,а), при якому на частинку з масою m діє сила $F_{уд}$ чисельне значення якої визначається з умови виникнення рівносповільненого прискорення в момент удару (другий закон Ньютона):

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} \qquad (3)$$

за відсутності опорної реакції R_N ($R_N \neq 0$).

2) стиснутий удар (рис.2.2,б), що характеризується ударним впливом $F_{уд}$ на частинку, що знаходиться на опорі. При цьому слід констатувати, що при

організації даного виду удару ефект подрібнення зростає у 2 рази у зв'язку із впливом на частку додаткового впливу опорної реакції

$$R_N = F_{num} \cos \gamma \qquad (4)$$

де кутовий параметр γ враховує ефективність удару в залежності від відхилення вектора сили $F_{уд}$ на кут γ від горизонтальної або вертикальної осей, перпендикулярних опорній площині. Отже, при розробці та обґрунтуванні параметрів подрібнювальних машин необхідно при стисненому ударі конструктивно забезпечити виконання умови: $\gamma = 0$.

При роздавлені під дією навантаження, що створюється силою $F_{розд}$, матеріал деформується по всьому об'єму (рис.2.2,в). Подальше стиснення тіла може призвести до спресування частинок, тобто до процесу, зворотного подрібненню [22].

Процес стирання застосовується при тонкому помелі. Цей процес здійснюється під впливом на матеріал сил стиснення, розтягування та зрізу, що виникають за рахунок притискання частки робочим органом до опори та його переміщенням у протилежні сторони. Для встановлення факторів, що впливають на ефективність стирання, слід розглянути класичну схему сил, що діють на частинку, що знаходиться на похилій площині в момент зіткнення робочого органу з часткою (рис.2.2,г).

Спроектувавши всі сили на вісь абсцис, можна отримати аналітичний вираз сили стирання:

$$F_{тр} = F_{пр} \sin \beta \qquad (2.3)$$

З формули (2.3) слід, що підвищення ефективності руйнування матеріалу стиранням необхідно забезпечити необхідну силу притискання $F_{пр}$ з напрямом вектора цієї сили, перпендикулярної осі X, тобто $\beta = 90°$.

Процес розколювання здійснюється за рахунок створення великих концентрацій навантажень у місцях контакту матеріалу з клиноподібним робочим елементом, на який впливає сила $F_{роск}$ (рис.2.2,д).

Процес зламу здійснюється за рахунок впливу на матеріал згинальних сил $F_{зл}$ (рис.2.2,е). Розміри та форма одержуваних частинок приблизно такі ж, як і при розколюванні.

Враховуючи фізичні особливості процесів розколювання та зламу, а також невідповідне співвідношення розмірів робочого органу машини та частки, слід зазначити, що зазначені способи руйнування слід виключити з досліджуваної вибірки.

Для підвищення ефективності подрібнення необхідно застосувати комбінований підхід до вибору виду руйнівного впливу. У зв'язку з цим, в умовах підвищеної потреби розробки подрібнювального обладнання з раціональними критеріями функціонування, завдання вибору найкращої комбінації способу руйнування є актуальним.

Керуючись математичною формулою комбінаторики

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!} \qquad (2.4)$$

теоретична кількість поєднань з $m=4$ застосовуваних методів руйнування по $n=2$ у групах становить, а при $n=3$ – $C_4^3 = 4$ унікальних поєднань.

Однак, зважаючи на особливості фізичного процесу деяких способів руйнувань, застосування всіх можливих поєднань методів диспергування частинок при створенні машин є недоцільним. У зв'язку з цим принцип роботи більшості машин для подрібнення матеріалів заснований на застосуванні наступного основного комплексу видів руйнування: роздавлювання та стирання, удар з роздавлюванням та стиранням, а також у певних випадках до головних зусиль приєднуються побічні – згинальні, розрізні та вільний удар [23].

Застосування комплексного способу руйнування при подрібненні вимагає врахування додаткових факторів, що впливають на ефективність дезінтеграції частинок матеріалу:

1) одночасність дій видів руйнівної дії, що у свою чергу мінімізує витрати часу на подрібнення t і характеризується функціональною залежністю енергії E від часу t:

$$E(t) = \min; \qquad (2.5)$$

2) ступінь прояву способів руйнівної дії при комбінованому вигляді руйнування, що визначає максимальну продуктивність подрібнення:

$$W(\Omega) = \max; \qquad (2.6)$$

3) ступінь прояву способів руйнівної дії Ω залежно від питомої поверхні матеріалу S з урахуванням основних законів механіки руйнування матеріалів, що встановлює обмеження на залежність (8) у зв'язку з підвищенням міцності матеріалів при збільшенні їх питомої поверхні внаслідок зменшення кількості їх внутрішніх дефектів. Звідси випливає, що з проектуванні подрібнювальної машини існує можливість повної втрати впливу («відключення») деяких видів на процес подрібнення із зменшенням діаметра частки матеріалу. Даний факт підтверджується дослідженнями процесу подрібнення матеріалу в відцентровому млині, в якому удар як спосіб руйнування поступився своїм провідним значенням стирання, що виникає вздовж стінок подрібнювальної камери за умов максимальної величини структурної міцності $\sigma = \sigma_{max}$ матеріалу і мінімального значення діаметра d і маси m частинки [24].

Теорія та практика подрібнення показує, що при комбінованій організації руйнівного впливу є переважання певних способів дезінтеграції

частинок залежно від конструктивних особливостей подрібнювальних машин (табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Способи руйнівної дії в деяких існуючих подрібнювачах тонкого помелу

№	Вид подрібнювальної машини	Способи руйнівної дії		Переважний спосіб
		№1	№2	
1	Кульовий млин	стирання	стиснутий удар	стирання
2	Відцентровий млин	стирання	вільний удар	вільний удар
3	Вібраційний млин	стирання	стиснутий удар (за певних умов)	стирання
4	Ролико-кільцевий млин	роздавлювання	стирання	стирання
5	Струменевий млин	стирання	вільний удар	вільний удар

З проведеного аналізу (табл.2.1) видно, що принцип роботи кожного млина базується на комбінованому підході до руйнування з явним переважанням одного із способів руйнування, що, негативно впливає на показник ступеня подрібнення. Як наслідок слід зазначити, що при створенні подрібнювальної машини високої ефективності необхідно забезпечити рівність ступенів впливу кожного виду руйнування:

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \ldots = \Omega_n \qquad (2.7)$$

Від переважання відповідного способу руйнування певної комбінації залежить кількість енергії W, що витрачається на утворення одиниці нової поверхні. Енергія процесу подрібнення повинна бути достатньою для створення такої напруги, яка при досягненні граничних значень призведе до руйнування матеріалу з утворенням дрібних фракцій. При цьому витрата енергії, необхідної для створення граничної напруги, може істотно різнитися в залежно від фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу та способу застосування руйнівних сил.

Виходячи з проведених оглядово-теоретичних досліджень, виконання умови (9) ймовірно призведе до підвищення потужності, що у свою чергу при відповідній організації процесу подрібнення повинно компенсуватися за рахунок посилення кожного виду впливу. Тоді вираз (2.7) можна записати так:

$$\sum\Omega = (1+x) \cdot (\Omega_1 + \Omega_2 + \ldots + \Omega_n) \qquad (2.8)$$

Таким чином, має виникнути так званий синергетичний ефект, виражений у зростанні ефективності подрібнення в результаті інтеграції окремих компонентів у єдину систему та взаємне посилення дії кожного з них.

Отримані висновки можуть бути основою для розробки інноваційної подрібнювальної машини з поліпшеними показниками функціонування.

2.4 Аналіз руйнівних впливів та конструктивні принципи створення дробарок ударної дії

Академік Ребіндер на основі відкритого ним явища динамічного зниження міцності тіл вважає, що подрібнення частинок необхідно здійснювати деформуванням їх високочастотними знакозмінними впливами, наприклад, що стирають і роздавлюють. Однак простий аналіз механічних впливів показує, що подрібнення частинок роздавлюванням, стиранням, розколюванням та зламом без контакту робочих органів між собою здійснити дуже важко внаслідок їх малих розмірів [24]. Ударний вплив може здійснюватися як по частинкам, що знаходяться на твердій поверхні, так і зваженими, і його ефективність залежить від розмірів частинок, причому ефективність і енергонасиченість ударного руйнування не властива більше жодному виду руйнівного впливу. При подрібненні ударним впливом можна

створити високочастотні знакозмінні навантаження, причому, набагато більші за величиною, ніж при стиранні.

Ці переваги машин ударної дії перед стираючими можна пояснити тим, що в машинах ударної дії вся дія робочих органів спрямована тільки на матеріал. Під час аналізу роботи подрібнювачів ударної дії встановлено, що основне ударне руйнування частинок може доповнюватися такими впливами, як розколювання, зріз та розрив.

Розглянемо механічні моделі основних руйнівних впливів при подрібненні частинок ударом з метою оцінки їх ефективності.

Введемо деякі припущення: частка має форму кулі; при деформації зминання зруйнований матеріал повністю видаляється з частки, не впливаючи на перебіг руйнування; частка взаємодіє з недеформованим робочим органом, який щодо маси частки приймається нескінченно важким; при гасінні швидкості під час удару прискорення уповільнення вважаємо постійним.

Розглянемо механічну модель руйнування частинок чистим ударом.

Удар є основною руйнівною дією. Причина ефективності процесу ударного руйнування полягає в тому, що великі значення сил (F, Н), що виникають при ударі, є наслідком надзвичайно високих прискорень уповільнення (a, м/с^2), що розвиваються тілом, які є наслідком малості часу (t, с), протягом якого триває взаємодія:

$$m(v - v_0) = Ft \tag{2.9}$$

звідки

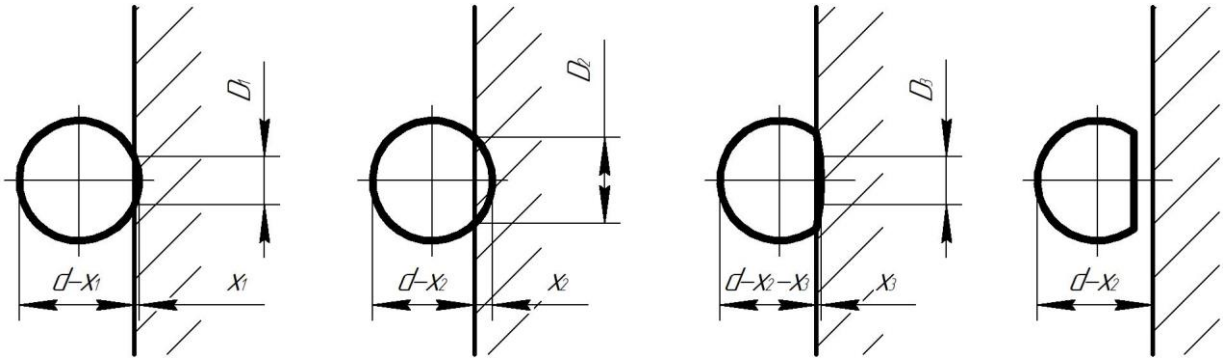
$$F = \frac{m(v - v_0)}{t} = ma \tag{2.10}$$

де v і v_0 – відповідно, початкова і кінцева швидкості ударної взаємодії, м/с.

З цих формул слідує, що при $v_0=0$ та $t \to 0$, $F \to \infty$.

Розглянемо процес деформації кулястої частинки при її ударі об плоску поверхню нескінченної маси, який можна умовно розділити на чотири стадії (рис.2.3).

$$F = \sigma \frac{\pi D_1^2}{4} \qquad F = ma > \sigma \frac{\pi D_2^2}{4} \qquad F < \sigma \frac{\pi D_3^2}{4} \qquad F = 0$$



а б в г

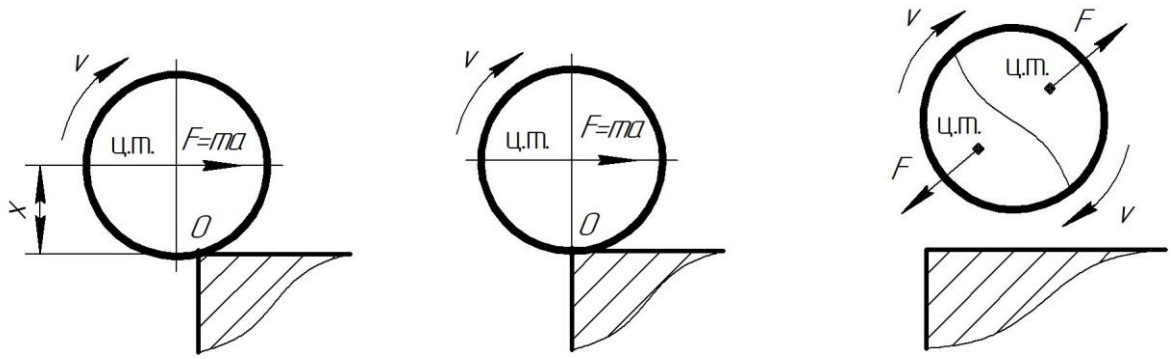
Рисунок 2.3 – Етапи деформації частки при ударі [25]

На першій стадії (рис.2.3,а) частка зі швидкістю *v* стикається з поверхнею робочого органу, починається гальмування частки і вона починає стискатися пружно. У точці контакту виникає нормальна до поверхні контакту сила, яка зростатиме, поки не буде перевищено межу міцності при зминанні для матеріалу частинки. Після цього починається друга стадія (рис.2.3,б) – руйнація матеріалу. У міру руйнування частки площа поверхні контакту стає більшою, а тиск на неї падає. Руйнування триває доки питома навантаження знову стане менше межі міцності при зминанні. Третя стадія (рис.2.3,в) починається коли зусилля, що діє на площу контакту, знову стане менше граничного, частка знову починає деформуватися пружно. На четвертій стадії (рис.2.3,г) швидкість частки падає до нуля, відбувається відскок частки від поверхні удару за рахунок відновлення пружної деформації залишкового зусилля.

Згідно з вищенаведеною механічною моделлю руйнування частинки відбувається шляхом послідовного відколювання від неї при кожному ударі робочого органу малих об'ємів матеріалу [26]. Тому, якщо знати обсяг матеріалу, що втрачається часткою при одному ударі, то можна математичним шляхом орієнтовно визначити необхідну для подрібнення частинки до необхідного розміру кількість впливів на неї робочого органу, що зараз визначається лише експериментально.

Руйнування частинок розколюванням і крезом хоч і можливе, але їх виникнення малоймовірне внаслідок трохи розмірів частинок, що перешкоджають появі умов, необхідних для руйнування (наприклад, достатніх плечей дії сил). Тому вважатимуться, що це на результат подрібнення істотного впливу не надають.

Інтерес представляє модель руйнування частинок розривом, який можна створити, приклавши до них відцентрові сили. Руйнування від дії відцентрових сил (рис.2.4) виникає в моменти, коли частка при взаємодії з робочим органом подрібнювача отримує дотичний удар, набуваючи при цьому тангенційного прискорення. При дотичному ударі частки про робочий орган (рис.2.4,а) момент від сили F повертає частинку щодо точки O (рис.2.4,б), і вона починає обертатися щодо власного центру з дуже високою швидкістю, що викликає в її тілі виникнення значних відцентрових сил, які будучи віднесеними до малого перерізу частинки, формують напруги, що перевищують границю міцності матеріалу на розрив (розтягування), яка, як правило, для крихких матеріалів значно нижча, ніж границя міцності при стисканні, що і призводить до руйнування частки (рис.2.4,в) по умовно прийнятим слабким перерізам h-h_1 так, що площею розриву є площа поперечного перерізу частинки.



а б в

Рисунок 2.4 – Руйнування частки від дії центр відцентрових сил [25]

Для випадку руйнування розривом від дії відцентрових сил за відомими формулами механіки були розраховані швидкості, необхідні для руйнування частинок матеріалу з наступними параметрами: границя міцності на розтяг - 40 МПа, питома вага - 2000 кг/м^3, діаметр - від 0,1 до 1 мм . Результати розрахунку надані у додатку В.

Як видно з таблиці, швидкість робочого органу, необхідна для руйнування частинок розривом від дії відцентрових сил, є постійною для матеріалу певної міцності та питомої ваги і не залежить від крупності частинок, а це означає, що, по-перше, при досягненні робочим органом цієї швидкості на ньому, теоретично, можуть руйнуватися частинки будь-якого розміру, по-друге, регулювати ступінь подрібнення можна простою зміною швидкості робочого органу, причому залежність між ступенем подрібнення і швидкістю відома.

Зважаючи на вищевикладене, руйнування частинок відцентровим розривом дуже перспективно і має великий потенціал для застосування, хоча і є в даний час важко здійсненним і більш випадковим процесом [25].

Ще одним важливим моментом підвищення ефективності процесу подрібнення є дотримання при створенні подрібнювачів певних конструктивних принципів. Так, можна рекомендувати поділ зони подрібнення на контур, що володіють різною енергією подрібнення, у кожному з яких подрібнюються частинки придатної для нього крупності.

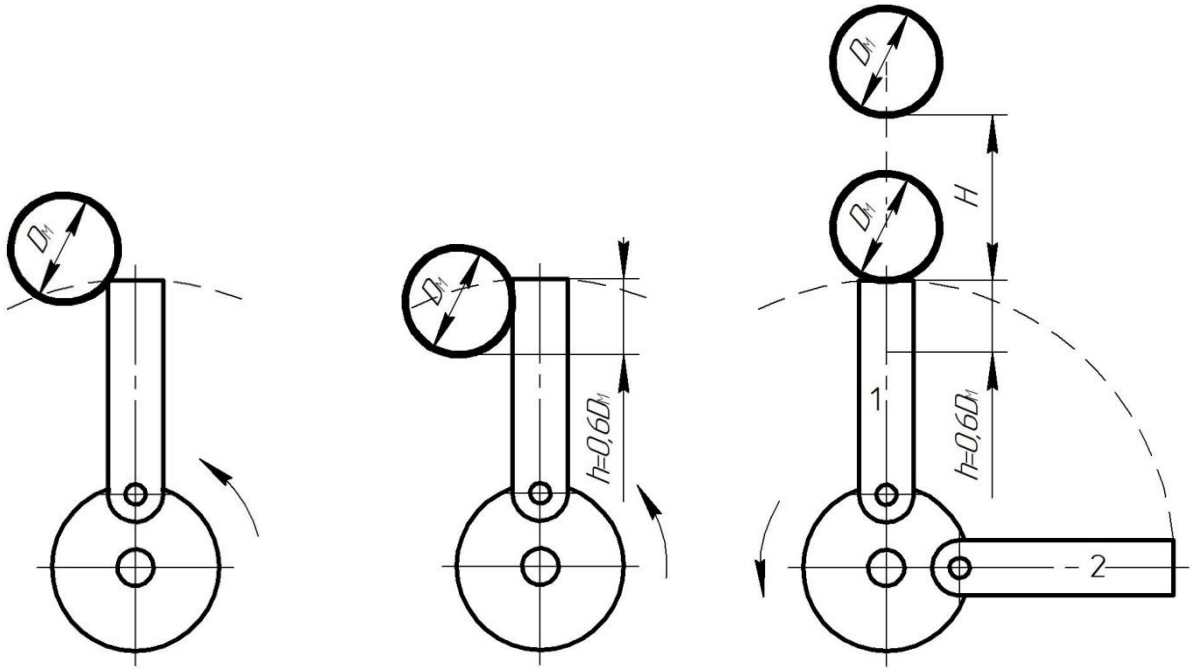
Непередбачуваним процесом досі є досягнення часткою необхідної крупності за час перебування у подрібнювачі. тому, якщо не можна гарантовано подрібнити частинку до потрібної крупності на одному ступені подрібнювача, а тримати її в зоні подрібнення далі деякого часу не можна, наприклад, за умовами продуктивності, тоді можна створити на шляху частинки стільки впливів (ступенів), скільки необхідно для її гарантованого подрібнення.

У випадку створення сучасних подрібнювачів ударної дії має спиратися на такі принципи: висока швидкість робочих органів (бил); високе енергонасичення всього обсягу дробарки і багатократний вплив на частинки в одиницю часу; подрібнюючи дія, яка гарантує подрібнення частинки до необхідної крупності; можливість роздільного подрібнення частинок різної крупності; забезпечення інтенсивного руху подрібнених частинок обсягом подрібнювача; забезпечення додаткових зсувних і розривних впливів на частинки, що подрібнюються.

2.5 Технологічні характеристики дробарок ударної дії

До основних технологічних характеристик молоткових і роторних дробарок належать: глибина проникнення грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора h, розміри ротора (довжина L і діаметр D), продуктивність Q і потужність електродвигуна N. Глибина проникнення грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора h впливає на гранулометричний склад дробленого продукту, продуктивність дробарки, витрату електроенергії при дробленні і знос молотків та бил. Залежно від глибини проникнення грудка піддається ковзному або центральному удару (рис.2.5). При ковзних ударах відбувається обколювання і стирання грудок по місцю удару. У цьому випадку дроблений продукт містить велику кількість дріб’язку, ударні деталі (молотки або била) швидко зношуються,

продуктивність дробарки знижується. Проникнення грудки у зону обертового ротора на глибину не менше 0,6 максимального розміру грудки при дробленні у молоткових дробарках або на глибину рівну висоті била при дробленні у роторних дробарках забезпечують руйнування грудки центральним ударом. Дроблення здійснюється в усьому об'ємі грудки при мінімальному стиранні матеріалу, що дробиться, а також зносі ударних деталей. Вміст тонких класів у дробленому продукті менше, а продуктивність дробарки вища ніж при дробленні ковзними ударами [15,17].



А б в

а – ковзний; б – центральний; в – підліт грудки до молотка.

Рис. 2.5 – Схеми удару молотка по грудці [17]

Необхідна глибина проникнення грудки у зону обертання ротора забезпечується швидкістю падіння матеріалу при завантаженні його у дробарку. Для того щоб проникнути у зону обертання ротору (рис.2.5,в) на глибину $h=0,6D_{max}$, грудка максимального розміру D_{max}, яка підлетіла до молотка 1, що обертається, повинна за час t (час приближення до грудки молотка 2, що набігає) при падінні з висоти H набути швидкості $V_{гр}$:

$$V_{гр} = \frac{h}{t} = \frac{0{,}6D_{\max}}{t}. \qquad (2.11)$$

Час t переміщення молотка з положення 2 у положення 1 дорівнює:

$$t = \frac{60}{nz}, \qquad (2.12)$$

де n – частота обертання ротора, хв$^{-1}$;

z – число подовжніх рядів молотків на роторі, тоді

$$V_{гр} = \frac{0{,}6D_{\max} nz}{60} = 0{,}01D_{\max} nz. \qquad (2.13)$$

Для грудки, що рухається з швидкістю $V_{гр}$, висоту H падіння визначають з формули:

$$V_{гр} = \sqrt{2gH} \qquad (2.14)$$

З використанням формул (2.12) і (2.13) отримуємо рівняння для визначення висоти H необхідної для потрапляння грудки під центральний удар:

$$H = \frac{V_{гр}^2}{2g} = \frac{(Dnz)^2 \cdot 10^{-4}}{2g} \approx 0{,}5 \cdot 10^{-5}(Dnz)^2, \text{ м.} \qquad (2.15)$$

У роторних дробарках висота била звичайно менше $0{,}6D_{max}$, тому усі грудки, що досягли тіла ротора потрапляють під центральний удар. Однак, особливості форми тіла ротора приводять до того, що не усі грудки можуть потрапити під ефективні центральні удари. Для підвищення частоти ударів і, відповідно, ефективності ударного дроблення, встановлюють відбивальні плити або решітки, які втримують ці грудки у дробарці до тих пір, поки вони не потраплять під центральний удар.

Розміри ротора (діаметр D_p, довжина L) визначаються розміром максимальної грудки вихідного матеріалу і продуктивністю дробарки.

Діаметр ротора відповідно до прийнятих стандартів визначається у залежності від максимального розміру грудки вихідного матеріалу:

– для молоткових дробарок:

$$D_p = (3{,}2...4) \cdot D_{\max}. \qquad (2.16)$$

Найбільша величина ($D_p=4D_{max}$) відповідає малим дробаркам з діаметром ротора до 600 мм;

– для роторних дробарок крупного дроблення:

$$D_p = (1{,}7...2) \cdot D_{\max}. \qquad (2.17)$$

Менша величина ($D_p=1{,}7D_{max}$) відноситься до дробарок найбільших розмірів. Для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$D_p = 3{,}3D_{\max}. \qquad (2.18)$$

З умов продуктивності і завантаження дробарки довжина ротора відповідно до прийнятих стандартів визначається пропорційно до його діаметра:

– для молоткових дробарок:

$$L = (0{,}7...1{,}5) \cdot D_p; \qquad (2.19)$$

– для роторних дробарок крупного дроблення:

$$L = 0{,}8D_p; \qquad (2.20)$$

– для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$L = D_p. \qquad (2.21)$$

Продуктивність молоткових і роторних дробарок залежить від їхніх конструктивних і механічних параметрів (діаметра, довжини і частоти обертання ротора; кількості, маси і числа молотків; розташування і форми

відбійних плит; способу завантаження і глибини проникнення грудок у зону ротора).

Продуктивність також залежить від фізичних властивостей матеріалу, що дробиться (міцності, вмісту глинистих речовин, вологи, крупності вихідного і дробленого продуктів). Між продуктивністю дробарки, подрібнюваністю вихідного матеріалу, ступенем дроблення і потужністю електродвигуна існує взаємозв'язок. При постійних умовах дроблення з підвищенням продуктивності знижується ступінь дроблення і навпаки. Теоретична формула для розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок відсутня. Для орієнтованого розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок застосовують різні емпіричні формули.

Об'ємна продуктивність молоткових і роторних дробарок може бути розрахована з використанням таких формул:

– молоткових дробарок:

при $D_p > L$ $Q_p = 0{,}1 D_p^2 L n$, м^3/год; (2.22)

при $D_p < L$ $Q_p = 0{,}1 D L^2 n$, м^3/год; (2.23)

– роторних дробарок:

$$Q_o^{max} = 47 k (D_p L)^{1,6} \text{ , м}^3\text{/год;} \quad (2.24)$$

$$Q_o^{min} = 22 k (D_p L)^{1,3} \text{ , м}^3\text{/год,} \quad (2.25)$$

де n – частота обертання ротора, хв$^{-1}$;

Q_o^{max} і Q_o^{min} - граничні значення продуктивності, м^3/год;

k – коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей дробарки (k=0,6 ÷ 1,4);

D_p і L – розміри ротора, м.

При підвищенні міцності, в'язкості і вологості матеріалу, що дробиться, і зменшенні крупності дробленого продукту продуктивність молоткової дробарки знижується. При рівномірному живленні забезпечується більш висока продуктивність дробарки.

Потужність електродвигуна молоткових і роторних дробарок визначається за емпіричними формулами:

– молоткових дробарок:

$$N = 0{,}125 D_p L n \text{, кВт;} \quad (2.26)$$

$$N = 0{,}15 D_p^2 L n \text{, кВт;} \quad (2.27)$$

– роторних дробарок:

крупного дроблення $N = 80 D_p L$, кВт; (2.28)

середнього і дрібного дроблення $N = 120 D_p L$, кВт. (2.29)

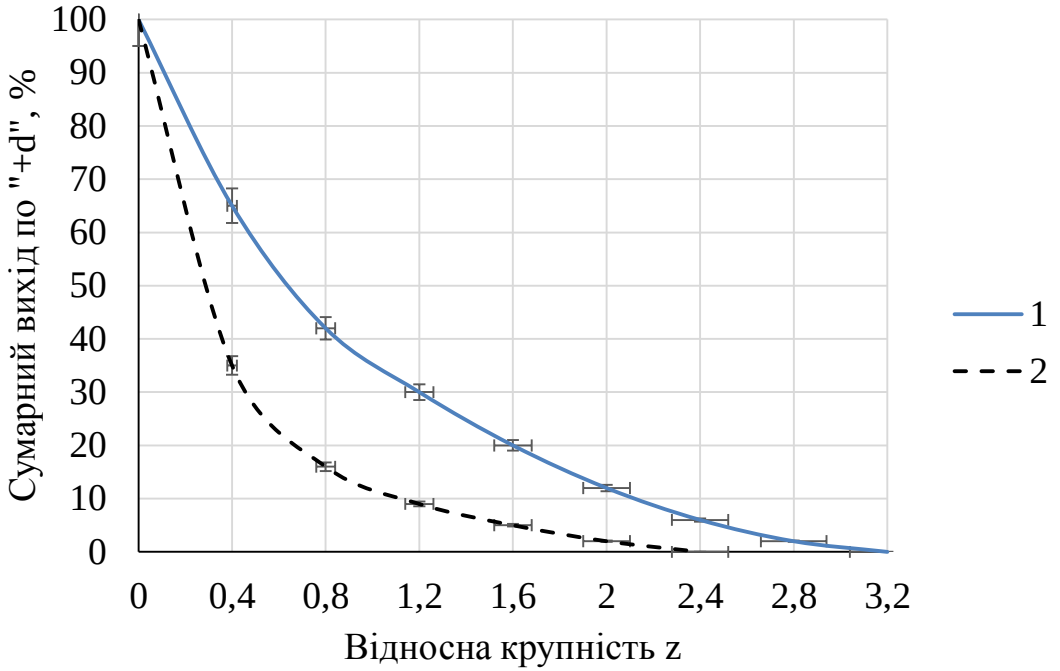
Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок для руд середньої міцності наведені на рис.2.6. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен *z* (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по *«+d»*.

Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок наведені у табл.2.2.

Молоткові і роторні дробарки вимагають ретельного балансування ротора. Швидкість завантаження вихідного матеріалу повинна вибиратись у залежності від швидкості обертання ротора.

Ширину щілини між колосниками і відстань між решіткою і кінцями молотків вибирають у залежності від необхідної крупності дробленого продукту і вологості вихідного матеріалу. Ширина щілини між колосниками повинна бути у 5 – 6 разів більше розміру зерен дробленого продукту при дробленні до 6 мм і у 1,5 – 2 рази при дробленні до 50 мм. При дробленні

вологих матеріалів з глинистими домішками відстань між колосниками збільшують або працюють без них.



1 – дроблений продукт роторної дробарки;

2 – дроблений продукт молоткової дробарки.

Рисунок 2.6 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок (для руд середньої міцності) [14,27]

Таблиця 2.2 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок [27]

Тип руди	Розрахункова формула	Формула вірна
Дроблений продукт молоткових дробарок		
Середньої міцності	$b^{+z} = (1\text{-}1{,}93z + 1{,}88z^2 - 0{,}88z^3 + 0{,}15z^4)\cdot 10^2$ (2.30)	при $z \leq 2{,}4$
Дроблений продукт роторних дробарок		
Середньої міцності	$b^{+z} = (1\text{-}1{,}02z + 0{,}44z^2 - 0{,}10z^3 + 0{,}01z^4)\cdot 10^2$ (2.31)	при $z \leq 3{,}0$

До переваг дробарок ударної дії слід віднести високу продуктивність, 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.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ УДАРУ І ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ РУЙНУВАННЯ

По теорії дроблення матеріалу в роторній дробарці важливим є вплив удару на характер руйнування цього матеріалу, які характеризують якість продукту і ефективність дробарки й ефективність дроблення, тобто:

а) гранулометричний склад продукту дроблення;

б) ступінь дроблення;

в) кількість дрібних матеріалів в продукті дроблення.

Мета досліджень:

а) визначення кількості енергії, що поглинається матеріалом при ударі;

б) вплив поглиненої енергії на характер продукту дроблення.

3.1 Обладнання й матеріал експериментальних досліджень

У якості обладнання для експериментальних досліджень застосовано копер маятниковий. Загальний вид стенду копра маятникового приведено на рисунку 3.1 [40].

Конструкція копра складається з наступних елементів: основою для складання всіх частин копра є корпус складається з масивної чавунної плити з закріпленими на ній захисним огородженням і стиками. Під запресованих в верхній частині стойок втулками, знаходяться підшипники осі маятника, до яких прикріплена штанга маятника зі змінним молотком. Зупинка маятника – за допомогою гальма.

У верхній частині стойок закріплені:

а) відліковий пристрій – для зняття показань випробування зразка;

б) запобіжний пристрій – для запуску попередньо зведеним маятником.

Технічні дані копра:

а) тип - маятниковий;

б) підйом маятника – вручну;

в) спосіб установки випробовуваних зразків - ручний за допомогою пристосування; відстань між опорами – 60мм;

г) радіус заокруглення ножа в поперечному перерізі – 2 + 0,5 мм;

д) кут загострення ножа молота – 300 ± 10;

е) відстань від осі маятника до висота центру ваги маятника щодо точки зустрічі бойка зі зразком – 825мм;

ж) ціна ділення шкали звітного механізму – 0,2кгм;

з) межа допустимої абсолютної похибки вимірювання – ± 0,2кгм;

и) втрата енергії при вільному гойданні маятника за половину повного коливання – не більше ± 0,5%.

Зразки для вивчення енергетики удару і гранулометричного складу продукту руйнування – вапняк, бо він представляє інтерес як матеріал, найбільш придатний для подрібнення в роторних дробарках ударної дії та такий, що застосовується в металургійній промисловості.

Розміри зразків були відповідно:

а) поперечний переріз: 50х50 мм;

б) довжина: 40, 50 і 60 мм.



Рисунок 3.1 – Копер маятниковий

3.2 Проведення експерименту

Випробуваний зразок встановлюють на губки і руйнують ударом ножа молота, який закріплений на штанзі і, обертаючись навколо вісі, вільно падає з висоти Н, яка визначається кутом зарядки.

Випробування на маятниковому копрі засноване на принципі вимірювання енергії, витраченої на руйнування зразка (рис.3.2). Основними характеристиками копра є: запас енергії, який визначається як добуток маси маятника 5 на відстань від осі його гойдання до центра ваги l, і відстань від осі хитання маятника до центру удару L. Маятник масою G, піднятий на кут зарядки α і має висоту центру ваги H, буде володіти запасом енергії. Після вільного падіння і зустрічі ножа молота маятника 4 з зразком 6, який встановлено на губки 3, маятник 5, витративши на руйнування зразка частина збереженої енергії, підніметься на кут β, при якому його центр ваги займе висоту h.

Енергію, витрачену на руйнування зразка, визначають як різницю запасів енергії маятника до і після удару [40]:

$$E = m \cdot g \cdot (H - h) = P \cdot \ell \cdot \left(cos\beta - cos\alpha\right), \qquad (3.1)$$

де: E – енергія, витрачена на руйнування зразка, Дж;

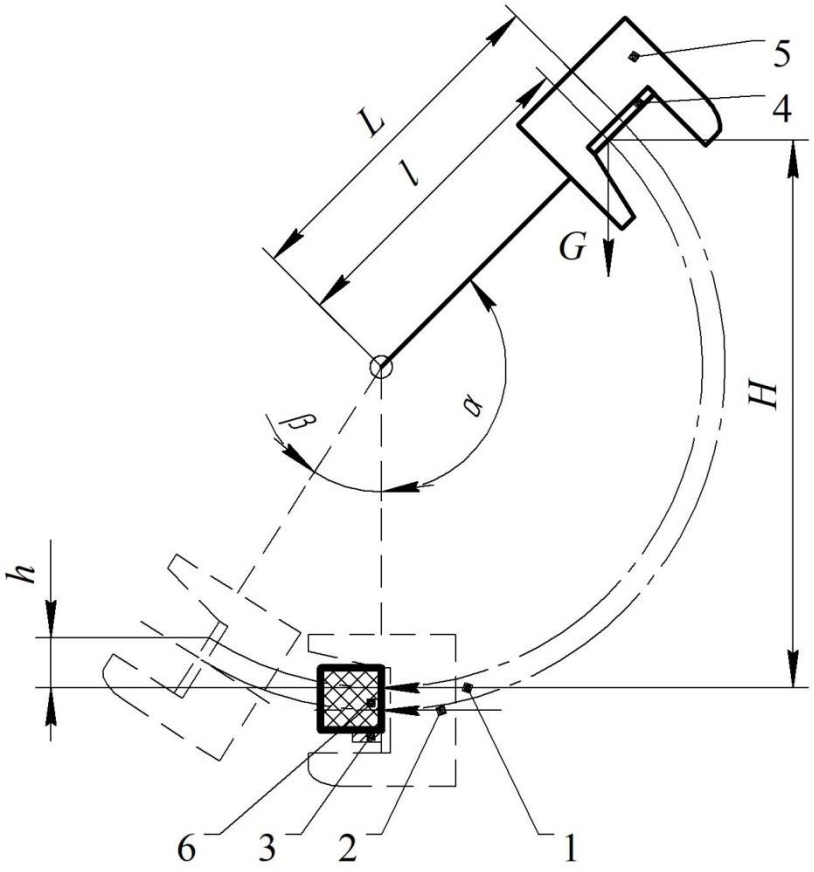
m – маса маятника, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2;

H – висота центра ваги маятника щодо точки зустрічі бойка з зразком до удару, м;

h – висота центра ваги маятника щодо точки зустрічі бойка зі зразком після удару, м;

ℓ – відстань від осі хитання маятника до центру ваги, м;



1 – центр мас маятника; 2 – центр удару; 3 – губки; 4 – ніж молота маятника; 5 - маятник; 6 – випробуваний зразок дробленого матеріалу

Рисунок 3.2 – Схема випробувань на копрі маятниковому

Фактична енергія удару, передана бойком зразком матеріалу, визначається по формулі:

$$E_1 = m_1 \cdot \left(v_0^2 - v_1^2\right)/2, \qquad (3.2)$$

де: m_1 – маса бойка, кгс/м;

v_0 – швидкість бойка до удару в м/с;

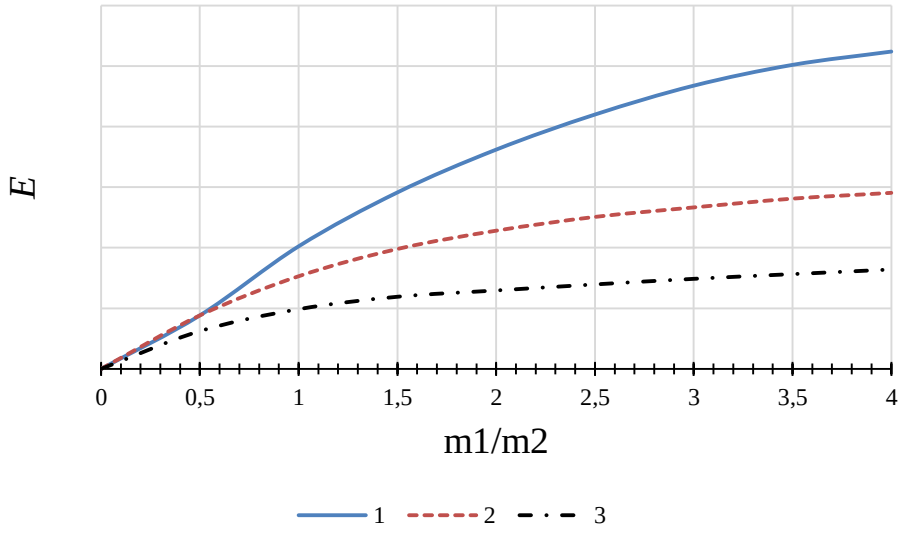
v_1 – швидкість бойка після удару в м/с.

Енергія, яка могла бути передана матеріалу при цілком пружному ударі і початкової швидкості бойка до удару визначається по формулі:

$$E_{1y} = 2 \cdot v_0^2 \cdot m_1^2 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)^2, \quad (3.3)$$

3.3 Результати експерименту

Основні експерименти, в яких значення E_1 і E_{1y} показали, що для всіх випадків енергія, що поглинається матеріалом масою m_2 на руйнування і зміну швидкості осколків від 0 до v_2 менше енергії, що поглинається тілом масою m_2 при цілком пружному ударі, і більше енергії, що поглинається тілом масою m_1 при не пружному ударі (рис.3.3) [40].



1 – при цілком пружному ударі; 2 – при не пружному ударі;
3 – енергія руйнування при не пружному ударі

Рисунок 3.3 – Залежність енергії, відданої зразком вапняку, від співвідношення мас

За здатністю поглинати енергію матеріал, що руйнується, а саме вапняк, стоїть ближче до пружних тіл, ніж до пластичних.

Якщо вираз (3.4), відношення енергії, відданої бойком при ударі, до розрахункової величини енергії цілком пружного удару становить вираз (3.5). Якщо вираз (3.6), значення цього відношення енергії становить вираз (3.7).

$$m_1/m_2 > 1, \tag{3.4}$$

$$E_1/E_{1У} = (0,9\ -\ 0,95), \tag{3.5}$$

$$m_1/m_2 < 1, \tag{3.6}$$

$$E_1/E_{1У} = (0,9\ -\ 0,98), \tag{3.7}$$

$$K_1 = (0,9\ -\ 0,95), \tag{3.8}$$

Отже, кількість енергії, що поглинається матеріалом E_2, можна в першому наближенні прийняти рівним енергії, переданої при цілком пружному ударі $E_{1У}$, з урахуванням коефіцієнта (3.8)

$$E_2 = K_1 \cdot E_{1У} = 2 \cdot K_1 \cdot v_0^2 \cdot \left(m_1^2 \cdot m_2 / \left(m_1 + m_2 \right)^2 \right). \tag{3.9}$$

Оскільки в порівнянні з масою матеріалу m_2 масу ротора m_1 відомим наближенням можна прийняти нескінченно великий.

$$E_2 = 2 \cdot K_1 \cdot m_2 \cdot v_0^2 \cdot \left(m_1^2 \Big/ \left(m_1^2 \cdot \left(m_1/m_2 + m_2/m_1 \right)^2 \right) \right) = 2 \cdot K_1 \cdot m_2 \cdot v_0^2. \tag{3.10}$$

За результатами дослідів швидкість, яку отримують уламки вапняку, також займає проміжне положення між швидкостями тіла масою m_2 після цілком пружного і не пружного ударів. Велика частина, що поглинається матеріалом, енергії витрачається на зміну швидкості уламків, менша – на руйнування, так як за механічними властивостями руйнується вапняк ближче до пружним тіл, ніж до пластичних.

Якщо відповідно до закону кількості руху прийняти середню швидкість уламків, що розлітаються, матеріалу з масою m_2 після удару рівною v_2 (3.10) то енергія, що йде на руйнування, становить 50%...80% енергії, що поглинається на деформацію пластичного тіла з тієї ж масою m_2 при тих же умовах удару.

Можна припускати, що в ударних дробарках, де уламки матеріалу зазвичай вдаряються об відбивні плити або один об одне, що знаходяться в дробильному просторі, зі швидкістю, достатньою для подальшого руйнування, то ця енергія більше.

Аналіз гранулометричних складів продукту руйнування зразків вапняку показав, що ступінь руйнування зразків залежить від кількості поглиненої ними енергії незалежно від того, чи досягнута ця кількість енергії первісної швидкістю бойка або його масою.

Дослідження по дробленню зразків показали, що визначальним параметром руйнування зразків є енергія, поглинена зразком. Тоді, якщо прийняти лінійну залежність новоствореної поверхні від кількості поглиненої енергії зразком, то основна частина енергії, що йде на руйнування, буде пропорційна добутку зворотної величини розміру дрібних частинок на їх кількісний вміст в продукті дроблення. Це підтверджується графіками (рис.3.4), де по осі абсцис відкладена енергія E_{1y}, при умові (3.11) на підставі пропорційності (3.12)

$$m_1/m_2 > 1, \tag{3.11}$$

$$E_{1y} = E_2/K_1 . \tag{3.12}$$

Крива залежності, наближено виражена прямою й перетинається з віссю абсцис в точці, що відповідає такій кількості енергії E_0, яке майже повністю витрачається на зміну швидкості матеріалу і не руйнує його. Відстань між початком координат і точкою перетину осі абсцис з кривою, а також нахил кривої до осі абсцис залежать від роду матеріалу.

Графік на (рис.3.3) дійсний для випадку – де переріз зразка дорівнює 25см^2. Оскільки на практиці зразки вапняку мають довільне поперечний переріз, доцільніше розглядати не всю енергію E_2, що припадає на поперечний переріз 25см^2, а енергію e, що припадає на 1см^2 поперечного перерізу шматка вапняку

$$e = E_2/25, \tag{3.12}$$

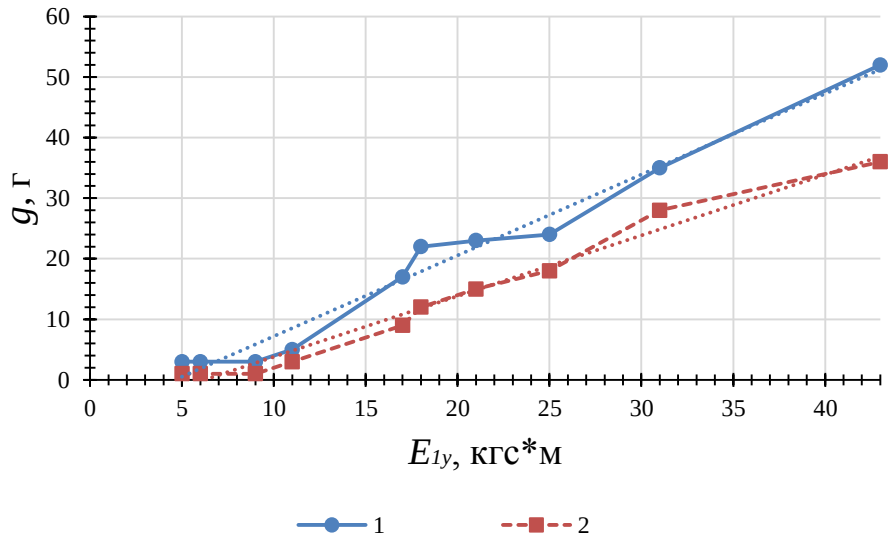
$$e_0 = E_0/25. \tag{3.13}$$

Залежність буде в цьому випадку відповідати наведеній на (рис.3.4), а її аналітичний вираз має вигляд:

$$g_i = g_1 \cdot (e_i - e_0)/(e_1 - e_0), \tag{3.14}$$

де: g_i - кількість матеріалу продукту дроблення, що проходить через будь-яке дрібне контрольне сито, при питомій поглиненої енергії e_1;

g_1 - кількість матеріалу, певне дослідним шляхом для будь-якого значення e_1.



1 – фракція: 0 - 6,3 мм; 2 – фракція: 0 - 3,2 мм

Рисунок 3.4 – Залежність утворення дрібних фракції від величини енергії, поглиненої зразком

Баланс енергії, поглиненої вапняком при ударі, може бути представлений у вигляді графіка (рис.3.5), на якому по абсциси відкладається енергія, віддана бойком при ударі, а по ординати – її розподіл на руйнування

вапняку E_p і на зміну швидкості каменю або його уламків E_v. Злам кривої витрати енергії в пояснюється тим, що до точки, що енергія $E_1=a$ витрачається тільки на зміну швидкості, а вище цієї точки частина її йде на руйнування матеріалу.

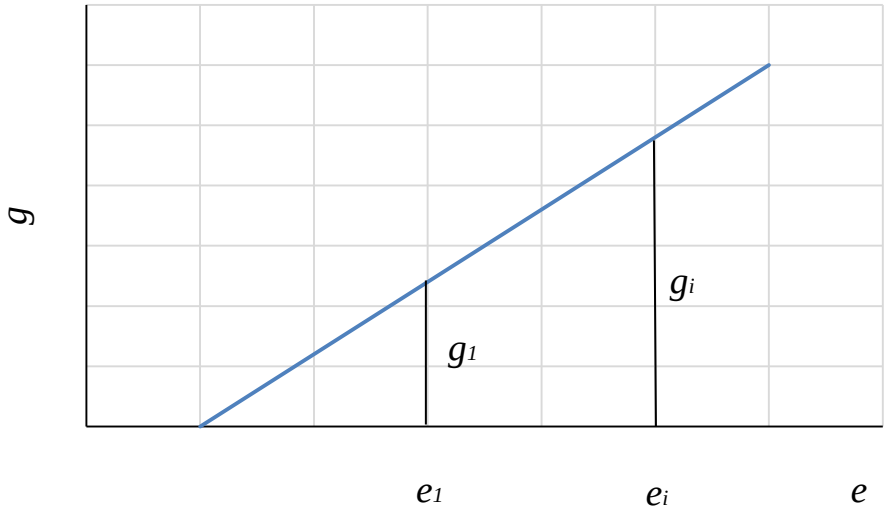


Рисунок 3.5 – Залежність $g_i=f(e)$

Дослідження по дробленню зразків показали, що визначальним параметром руйнування шматків матеріалу є енергія, поглинена цим самим матеріалом.

Якщо прийняти лінійну залежність новоствореної поверхні від кількості поглиненої енергії матеріалом, то основна частина енергії, що йде на руйнування – буде пропорційна добутку зворотної величини розміру дрібних частинок на їх кількісний вміст в продукті дроблення.

Завдяки проведеним експериментам можна прогнозувати на скільки ефективно буде встановлення відбивної плити під прямим кутом так і інших елементів – для поліпшення процесу дроблення.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз теоретичних та експериментальних досліджень дозволив встановити, що:

1 Кокс, як і раніше, залишається важливим джерелом тепла, відновником і розпушувачем. Рівень подрібнення вугільної шихти помітно впливає на її технологічні властивості. При цьому якість шихти погіршують як крупні куски так і дрібні. Найбільш цінними із цього погляду є класи крупністю 3-0,5 мм. Регулювання оптимального гранулометричного складу шихти – найбільш ефективний метод поліпшення якості доменного коксу.

2 Гранулометричний склад коксу повинен бути близьким до гранулометричного коксу іншої частини шихти. В перспективі основною вимогою до гранулометричного складу буде вміст в ньому класу 40-60 мм, сукупність механічних властивостей якого в найбільшому ступені відповідає вимогам доменного процесу. В той же час немає достатніх підстав для відмовлення від використання в доменній плавці коксу крупністю 60-80 мм і від сортування товарного коксу крупністю 25-80 мм на вузькі класи 25-40 і 40-80 мм з роздільною їх подачею в доменні печі. Міцність коксу визначається ступенем зміни його гранулометричного складу під дією руйнівних зусиль.

3 Від вибору типу дробарки залежить забезпечення оптимального гранулометричного складу вугільної шихти.

4 Проведений аналіз роботи дробарки і розрахунок продуктивності в залежності від конструктивних та технологічних параметрів показав, що важливою частиною є камера дроблення.

5 Основні фактори, від яких залежить витрата енергії на одиницю продукції,
- твердість матеріалу, його вологість, в’язкість, стан поверхні, розмір і форма шматків, розміщення шматків між робочими органами машини та ін.

6 Проведені дослідження по дробленню зразків на копрі показали, що визначальним параметром руйнування шматків матеріалу є енергія, поглинена цим самим матеріалом.

Якщо прийняти лінійну залежність новоствореної поверхні від кількості поглиненої енергії матеріалом, то основна частина енергії, що йде на руйнування – буде пропорційна добутку зворотної величини розміру дрібних частинок на їх кількісний вміст в продукті дроблення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сайт Метинвест: https://metinvest.media/ua/page/koks.
2. Хромоногіх О., Рибак В., Лисюк Р., & Куцик І. (2016). Оцінювання якості доменного коксу. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*, (6), 143–144. https://doi.org/10.20535/2519-450x.6.2015.63367
3. Гугіс М.М. Про необхідність регулювання крупності твердого палива при спіканні руд та концентратів. *Чорна металургія*. 1990. №11. с. 8-10.
4. Карабасов Ю.С., Валавін В.С., Воропаєв У.М. Вплив гранулометричного складу палива на показники аглопроцесу. *Чорна металургія*. 1972. № 23. С. 17 - 19.
5. Єфименко Г.Г., Єфімов С.П., Арделян А.А., Гришин Н.М. До питання про крупність агломераційного палива. *Чорна металургія*. 1969. №4. З. 23-26.).
6. Єфімов С.П., Нікітін В.Д., Покотилів А.Г. Про доцільну крупність агломераційного палива. Металург, та гірничорудна промисловість.
7. Коваленко І.В., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв : Підручник. Київ : Інрес : Воля, 2005. 255 с.
8. Михайлов В.Г., Рязьких А.А., ПутілінЄ.А. Вплив крупності коксової дрібниці на комкуемість агломераційної шихти. Сучасна металургія початку нового тисячоліття: Зб. наук. тр. / ЛДТУ, 2007. ч. 2. с. 200-205.).
9. Берштейн Р.С. Підвищення ефективності агломерації. Металургія, 1979, 144 с.).
10. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering" Published Vol. 1 No. 1 (2023) : *Economics and technical engineering*. 2023-10-25. с.105-114.
11. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. 284 с.

12. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин. Донецк : Східний видавничий дім. 2000.
13. Гірничий енциклопедичний словник / За ред. В.С.Білецького. тт. 1-3, 2001-2004.
14. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик : посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2002. 296 с.
15. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин : посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2004. 272 с.
16. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / Сокур М. І., Кіяновський М. В., Воробйов О. М., Сокур Л. М., Сокур І. М. Кременчук : видавництво ПП Щербатих О. В., 2014.304 с.
17.Сокур М. І., Білецький В. С., Ведмідь І. А., Робота Є.М. Рудопідготовка: дроблення, подрібнення, грохочення : монографія. Кременчук : ПП Щербатих О. В. 2020. 494 с.
18.Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л.В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Київ : Ліра-К 2020. 634 с.
19.Дацишин О.В., Ткачук А. І, Чубов Д.С. Машини та обладнання переробних виробництв : навч. посібник. Київ : Вища освіта, 2005. 159 с.
20.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.
21.Олевський В.А. Розмольне обладнання збагачувальних фабрик: довід. посібник з конструкцій, розрахунку та експлуатації кульових та стрижневих млинів. 1963. 448 с.
22. Турушин В.О., Ленич С.В. Закономірності руйнування сипких матеріалів в подрібнювачах ударної дії . *Вісник СНУ ім. В. Даля*. 2009, № 5 (135). С. 11–1923.Ходаков Г.С. Физика измельчения. Москва : Наука, 1972. 307 с.
24. Ребіндер П.А. Фізико-хімічна механіка: Вибрані праці. Наука, 1979. 384 с.

25.Гур'янов Г.А., Гульчеєв А.Є., Янковський Л.В. Аналіз руйнівних впливів та конструктивні принципи створення подрібнювачів при надтонкому ударному подрібненні твердих частинок. Вісник пермського національного дослідницького політехнічного університету. Охорона навколишнього середовища, транспорт, безпека життєдіяльності №2, 2012. с.148-157.

26.Сергєєв К.Ф. Крихке руйнування твердих тіл. 1989. 241 с.

27.Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О. І., Воробйов О. М., Смирнов В.О., Божик Д.П. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с. https://en.ppt-online.org/429739

28.ДСТУ 2411-94. Дробарки. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1994. 16 с. (Інформація та документація).

29.ДОСТ 12376-71. Дробарки одноротрні середнього та дрібного дроблення. Технічні умови.1985. 18 с.

30.Барабашкін В.П. Молоткові та роторні дробарки (конструкція, розрахунок, монтаж та експлуатація). Надра, 1973. 194 с.

31.Барон Л.І., Хмєльковський І.А. Руйнування гірських порід вільним ударом. Надра, 1971. 431 с.

32.Інтернет ресурс http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення_і_подрібнення.

33.Інтернет ресурс https://uk.wikipedia.org/wiki/Молоткова_дробарка.

34.Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 655 с. ISBN 5-11-004083-4.

35. 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.

36.Васильченко Т.О., Шевченко І.А., Кобрін Ю.Г. Аналіз процесу руйнування крихких матеріалів ударом. *Металургія* : 2(38). Запоріжжя : ЗДІА, 2017 с.116-121.

37.Васильченко Т.О., Шевченко І.А., Кобрін Ю.Г., Гречаний О.М. Теоретичні дослідження процесу дроблення крихких матеріалів в молоткових дробарках. *Сучасні проблеми металургії. НАУКОВІ ВІСТІ.* вип.22. Національна металургійна академія України : ІВК «Системні технології». 2019/3. с.22-29.

38.Кобрін Ю.Г., Кононов Д.О., Васильченко Т.О., Горобецб І.В. Визначення енергії руйнування дробимого матеріалу пекового коксу. МАТЕРІАЛИ Міжнародної науково-технічної конференції ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ ІТММ 2019, 2019/3. с.11

39. Кононов Д.О., Кобрін Ю.Г., Шевченко І.А., Васильченко Т.О. Теоретические исследования динамичесих характеристик молотковой дробилки. *Металургія*, вип.2. Запоріжжя : ЗДІА, 2019. с.120-123

40. Кобрін Ю.Г. Дослідження дробимих матеріалів ударним навантаженням *Металургійна та гірничорудна промисловість*, 2018.

ДОДАТОК В

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 (компіляції).

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 (компіляції) є підставою для застосування відповідних дисциплінарних стягнень.

Студент _____ _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали) (дата)