

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 ефективності процесу дроблення в дробарках ударної дії»

Виконав: магістрант групи 6.1332

Борисов А.С.

(ПІБ)

  
(підпис)

спеціальності 133 Галузеве машинобудування»

(шифр і повна назва)

спеціалізація

(шифр і повна назва)

освітньо-професійна програма

133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і повна назва)

Керівник Шевченко І.А.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Запоріжжя – 2023 року

Запорізький національний університет

(повна назва університету зазначається в заголовку)

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

Кафедра Металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр

(другий (магістерський) рівень)

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.С.Григорук

\_\_\_\_\_ 2023 року

ЗАВДАННЯ  
ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Борисов Артем Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження ефективності процесу дроблення в дробарках ударної дії  
керівник роботи Шевченко І.А., к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом вищого навчального закладу від "09" 10 2023 року №1580-с
2. Термін подання студентом роботи 10.12.23
3. Вихідні дані до роботи: Технологічні вимоги до процесу подрібнення крихких матеріалів; ефективність процесу дроблення молотковими дробарками; моделювання молоткової дробарки. 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. Теоретичні основи моделювання процесу дроблення; 2. Моделювання молоткової дробарки; 3. Експериментальні дослідження за темою роботи.
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

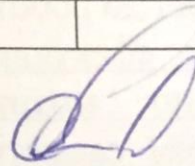
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання	видав
1	Шевченко І.А.		
2	Шевченко І.А.		
3	Шевченко І.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

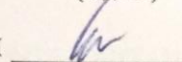
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

  
(підпис)

Керівник роботи

  
(підпис)

Борисов А.  
(прізвище та ініціали)

Шевченко І.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Борисов А.С. Дослідження ефективності процесу дроблення в дробарках ударної дії.

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

В роботі на основі аналізу стану питання по темі, дослідження та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів молоткової дробарки обґрунтовано підвищення ефективності процесу дроблення для фракційної підготовки вапняку у виробництві агломерату.

Ключові слова: ДРОБАРКА, МОЛОТОК, ЕНЕРГІЯ ПОДРІБНЕННЯ, СТУПІНЬ ПОДРІБНЕННЯ, ЗНОС, МОДЕЛЬ.

## ABSTRACT

Borysov A.S. Research on the effectiveness of the crushing process in impact crushers.

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

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

Keywords: CRUSHER, HAMMER, CRUSHING ENERGY, CRUSHING DEGREE, WEAR, MODEL.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	7
ВСТУП .....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ДРОБЛЕННЯ .....	10
1.1 Аналіз необхідності подрібнення флюсів у металургії .....	10
1.2 Аналіз основних типів дробильних машин .....	14
1.4 Огляд досліджень основних процесів, що протікають при дробленні матеріалів .....	17
1.4.1 Енергетичні показники та продуктивність процесу дроблення ...	18
1.4.2 Зношування молотків .....	21
1.4.3 Фактори, що впливають на технологічні показники процесу дроблення .....	29
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ .....	35
2.1 Етапи дроблення матеріалу в молотковій дробарці .....	35
2.2 Дослідження основних параметрів руху частки та молотка .....	36
2.2.1 Аналіз руху сировини живильнику .....	37
2.2.2 Проникнення матеріалу у робочу зону молотків .....	38
2.2.3 Ударний контакт молотків із матеріалом .....	40
2.2.4 Рух шматка матеріалу по поверхні молотка після повторного проникнення до робочої зони .....	45
2.2.5 Кінематичний аналіз руху матеріалу до відбійної плити та повернення в робочу зону молотків .....	47
2.2.6 Аналіз умов ударного контакту молотків із матеріалом .....	59
2.3 Основні критерії, що впливають на ступінь подрібнення крихких матеріалів .....	65
2.4 Обґрунтування закономірності процесу зношування молотків .....	68

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОШЕННЯ МАТЕРІАЛУ МОЛОТКІВ .....	76
3.1 Методика експериментальних досліджень .....	76
3.2 Опис стенду для дослідження матеріалів на тертя та знос .....	78
3.3 Результати досліджень ступеня зносу бил на показники процесу дроблення .....	82
ВИСНОВКИ .....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
ДОДАТОК А.....	90
ДОДАТОК Б.....	92
ДОДАТОК В.....	93

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$n$	число обертів ротора за хвилину
$z$	кількість рядів молотків
$R$	радіус кола осей підвісу молотка
$l$	довжина молотка
$h_m$	висота молотка
$b_1$	товщина ніжки молотка
$l_1$	довжина ніжки молотка
$s$	ширина молотка
$b_2$	товщина бойка
$l_2$	довжина бойка
$\beta$	кут повороту ротора за час удару
$R_{зовн}$	зовнішній радіус ротора
$D_p$	діаметр робочої зони ротора
$D$	діаметр кола підвісу молотка
$v_p$	окружна швидкість ротора
$ZC$	відстань від осі ротора до точки контакту молотка зі шматком
$v_m$	швидкість молотка до удару
$v_m'$	швидкість молотка після удару
$v_{m2}$	швидкість молотка наприкінці удару
$v_{ч3}$	швидкість частки після зіткнення
$J_m$	момент інерції молотка
$E$	модуль пружності
$i$	ступінь подрібнення матеріалу
$d_{cp}$	середній діаметр частинок подрібнювального матеріалу після дроблення вільним ударом
$F_{уд}$	сила удару
$\Delta l_2$	деформація шматка матеріалу під час удару молотками

$A$	енергія
$HB$	твердість за Брінеллем
$\sigma_m$	теоретичне значення межі міцності матеріалу
$\rho_c$	щільність подрібнювального матеріалу
$\gamma_i$	вихід шматків $i$ -й фракції
$d_i$	середній розмір шматків $i$ -ї фракції
$V_\Sigma$	сумарний об'ємний знос ударного елемента



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Процеси дроблення широко поширені і зустрічаються практично у всіх галузях виробничої діяльності людини.

Щорічно в світі декілька мільярдів тонн різних сипких матеріалів, таких як корисні копалини, цемент, мінеральні добрива, піддають дробленню і подрібненню. Одним з визначальних чинників, що впливають на ефективність подрібнення, є спосіб руйнування матеріалів.

Широке застосування вони знаходять у металургії при дробленні різних матеріалів, де широке застосування знайшли молоткові дробарки, проте вони мають ряд недоліків. Так, поряд із значним зносом (у ряді випадків термін служби окремих робочих елементів становить 72–530 годин), велика частина енергії, що підводиться, витрачається на подрібнення саме за рахунок стирання (до 83%), а не удару, що призводить до зайвого зростання питомих енерговитрат, що досягають 50–60 кВт·год/т.

Таким чином, дослідження та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів процесу дроблення матеріалів у молотковій дробарці з метою підвищення продуктивності, зниження енерговитрат та ступеня зносу робочих вузлів є актуальними науково-технічними завданнями металургійного виробництва.

*Мета роботи.* Підвищення ефективності процесу дроблення матеріалів у молотковій дробарці на основі аналізу та обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів.

Завдання дослідження:

- аналіз конструкцій молоткових дробарок, їх робочих органів та особливостей реалізації технологічних операцій дроблення;
- дослідження математичної моделі взаємодії ударних органів з матеріалом на основних технологічних етапах його подрібнення в молотковій дробарці;
- дослідження впливу умов ударної взаємодії молотків з матеріалом на інтенсивність їх зносу та ступінь дроблення в молотковій дробарці;

- експериментальне дослідження зношення матеріалів молотків.

*Предмет дослідження:* конструкція молотка для підвісу на осі ротора ударної дробарки та основні динамічні, кінематичні та технологічні показники процесу подрібнення матеріалів під час її реалізації.

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес дроблення матеріалів в ударній 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.

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

*Публікації.* За матеріалами магістерської роботи опубліковано тези:

1. Борисов Артем. Огляд досліджень основних процесів, що протікають при дробленні матеріалів. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2023»: у 5 т. / Запорізький національний університет. – Запоріжжя : ЗНУ, 2023. Т.5. с.357.

*Структура та обсяг магістерської роботи.* Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 93 сторінках машинописного тексту, містить 3 таблиці, 31 рисунків, список використаних джерел з 42 найменувань.

## 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ДРОБЛЕННЯ

Виробництво залізорудного агломерату освоєно на більшості металургійних підприємств повного циклу, проте його якість не завжди задовольняє збільшеним вимогам доменної плавки. Враховуючи зростаючу конкуренцію н виробників чавуну, будь-яка можливість інтенсифікації агломераційного процесу та покращення показників роботи доменних печей є вкрай важливим завданням. Техніко-економічні показники агломераційного виробництва мають істотне значення при оцінці загальної ефективності металургійного виробництва у вигляді того, що виробництво агломерату у світі досягає в даний час 900 млн. т [1].

В останні роки вимоги виробників чавуну до якості агломерату різко зросли. Це пов'язано з освоєнням нового промислового обладнання для завантаження доменних печей та необхідністю більш чіткої стабілізації агломерату по гранулометричному складу та зниження агломераційної дрібниці в доменній шихті.

### 1.1 Аналіз необхідності подрібнення флюсів у металургії

Агломерація є одним із сучасних, широко поширених способів окускування руд та концентратів для доменного виробництва [2].

Останнім часом у доменних печах широко застосовують офлюсований агломерат замість неофлюсованого [3]. Виробництво такого агломерату має такі переваги перед застосуванням звичайного агломерату:

- збільшена продуктивність агломераційних машин (рис. 1.1) [4];
- вища відновлюваність агломерату (рис. 1.2) [5]; [6].
- зниження витрати дорогого металургійного коксу на виплавку чавуну, покращення теплового балансу доменної печі та збільшення її продуктивності (рис. 1.3) [6].

Флюси вводяться в шихту у вигляді вапняку, вапна, вапняного молока та доломіту. Кожна із цих добавок інтенсифікує процес спікання по-різному та вимагає своїх вимог до підготовки [7].

Відмінною особливістю офлюсованих агломератів є менший вміст фаяліту ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) та схильність до розпаду (руйнування) з часом, що пояснюється модифікаційним перетворенням ортосилікату кальцію та наявністю вільного вапна [8].

Проте такий агломерат схильний до розтріскування та розпаду при зберіганні та транспортуванні.

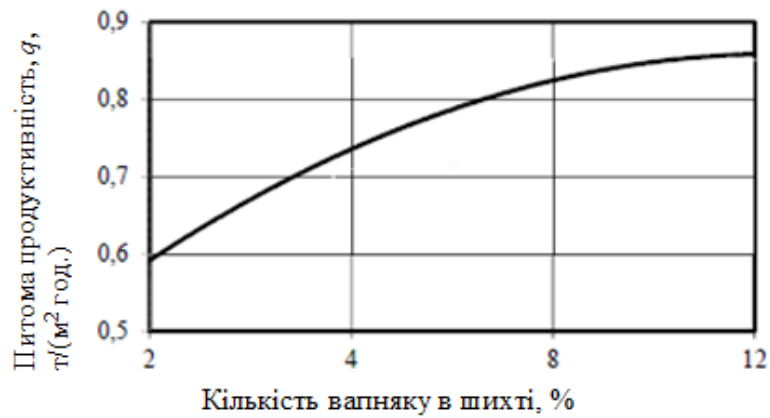


Рисунок 1.2 - Вплив вмісту вапняку в шихті на питому продуктивність агломераційної машини

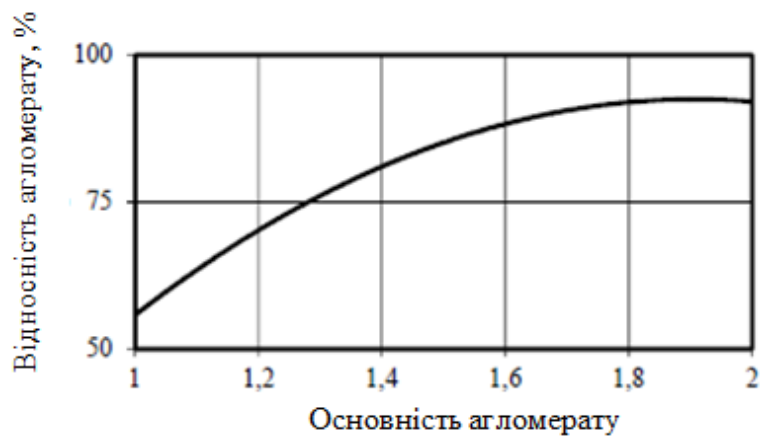
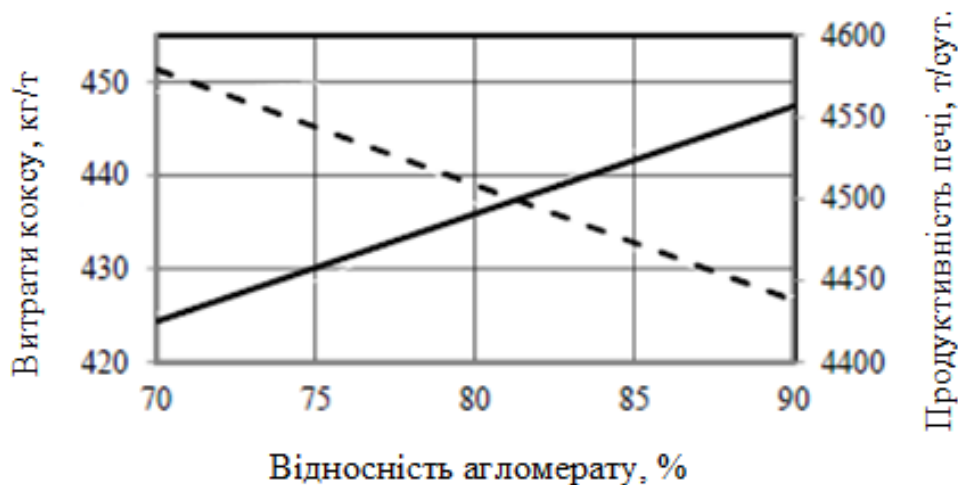


Рисунок 1.2 - Вплив основності на відновлюваність агломерату



( — — — ) - витрата коксу, (—) - продуктивність

Рисунок 1.3 - Вплив відновлюваності агломерату на витрату коксу та продуктивність доменної печі

Флюси вводяться в шихту у вигляді вапняку, вапна, вапняного молока та доломіту. Кожна із цих добавок інтенсифікує процес спікання по-різному та вимагає своїх вимог до підготовки [7].

Відмінною особливістю офлюсованих агломератів є менший вміст фаяліту ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) та схильність до розпаду (руйнування) з часом, що пояснюється модифікаційним перетворенням ортосилікату кальцію та наявністю вільного вапна [8].

Проте такий агломерат схильний до розтріскування та розпаду при зберіганні та транспортуванні.

Питаннями впливу крупності фракції флюсу, що вводиться, в шихту на фізичні властивості агломерату займалися Коротич В.І., Мансурова Н.Р., Свириденко Ж.В. та інші.

В результаті було виявлено, що зниження розміру частинок вапняку, що додається в агломераційну шихту, потребує меншого часу на повне розкладання окремого зерна, що ефективніше утворює кальцієвий силікат за короткий період дії високих температур зоні спікання [2, 9, 10]. Міцність та

стійкість залізородного агломерату в залежності від крупності флюсу та ступеня основності показана у таблиці 1.1 [1, 10].

Таблиця 1.1 - Фракційний склад агломерату при введенні в шихту різної фракції вапняку

Тривалість зберігання, доба	Використання в шихті вапняку фракцією, мм								
	0-1			0-3			0-5		
	Вихід фракцій агломерату, %								
	+12	12-6	5-0	+12	12-6	5-0	+12	12-6	5-0
1	100	-	-	100	-	-	100	-	-
6	96,1	0,9	3,0	95,8	0,7	3,5	90,2	4,8	5,0
12	93,7	2,2	4,1	90,4	3,5	6,9	85,4	10,2	4,4
18	87,3	3,5	9,2	85,2	8,4	6,4	71,0	18,3	10,7
24	85,6	6,4	8,0	82,3	10,2	6,5	62,1	25,4	12,5
30	78,7	10,2	11,1	77,8	11,2	11,0	42,1	32,3	25,6
Зміст дрібниці (0-5 мм) агломераті, %	2,5-3,5						2,5-3,5 8-9		

Міцні властивості та стійкість агломерату, отриманого з використанням флюсів крупністю 0-1 і 0-3 мм, значно краще за порівняно з показниками, отриманими із застосуванням вапняку фракцією 0-5 мм, який після тридцяти денного зберігання перетворюється на 60% на дрібницю. З цього випливає, що розмір шматків вапняку не повинен перевищувати 3 мм, а бажано його знизити до 0-1 мм або навіть 0-0,5 мм. З дослідження стану агломерату видно, що причиною його розпаду є вкраплення флюсу, що при поглинанні вологи спричиняє руйнування агломерату [10].

За наявності у шихті більших шматків вони не встигають прореагувати з кремнекислотою рудного матеріалу і залишаються в агломераті у вигляді включень вільного окису кальцію, який при подальшому зберіганні гаситься з утворенням гідрату окису кальцію і, розширюючись в обсязі, руйнує агломерат [1]. Залишок вапняку, що не розклався, або скупчення незасвоєного вапна є однією з причин зниження міцності офлюсованого агломерату, що можна попередити збільшенням тонкості помелу флюсів (до 0-2 мм) та покращенням змішування шихти.

При відкритому видобутку (це переважний їх спосіб видобутку) розміри шматків флюсу досягають 800-1000 мм і більше, що визначається характером буро вибухових робіт і застосовуваними засобами механічного навантаження [1, 2]. Тому флюси після відокремлення від покладу піддають необхідній доведення по крупності 3-5 мм.

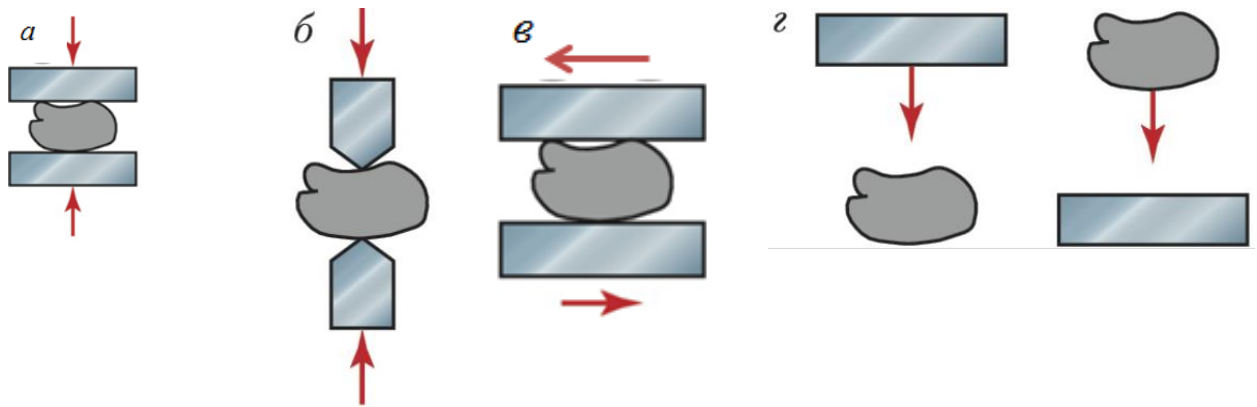
## 1.2 Аналіз основних типів дробильних машин

Умовно під дробленням та подрібненням розуміються процеси руйнування шматків (зерен) крихких матеріалів на дрібніші зерна шляхом дії зовнішніх сил, що долають внутрішні сили зчеплення між шматками. При цьому умовно дробленням вважається отримання матеріалу на виході зерна крупністю більше 5 мм, а подрібненням - менше 5 мм [1, 4, 5].

Спосіб руйнування залежить від виду впливу руйнівної сили на шматки матеріалу (рис. 1.4) [5, 6].

Спосіб дроблення вибирається залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу та крупності його шматків до та після дроблення [1, 8, 9]. Розрізняють гірські породи певної міцності, твердості, в'язкості та крихкості, для яких застосовують різні способи руйнування або їх поєднання [20].

Існують такі види дроблення та подрібнення по крупності матеріалу до та після диспергування [1, 2]:



*а - роздавлювання, б - розколювання, в - стирання, г - вільний удар*

Рисунок 1.4 - Основні способи руйнування крихких твердих матеріалів

- 1) крупне дроблення, коли матеріал крупністю 1500-500 мм руйнується до розмірів 400-125 мм;
- 2) середнє дроблення, коли з вихідного продукту розмірами 400-125 мм одержують матеріал крупністю 10-25 мм;
- 3) дрібне дроблення - матеріал фракцією 100-25 мм дробиться до 25-5 мм;
- 4) дрібне подрібнення - зменшення крупності з 25-5 мм до 1-0,2 мм;
- 5) тонке подрібнення - одержання розмірів менше 0,2 мм.

Необхідні для руйнування шматків матеріалу зусилля реалізуються дробильних машинах, конструкція яких забезпечує здійснення певного способу руйнування. З урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів (таких як твердість, міцність, крихкість тощо) у сучасній практиці застосовуються такі види дробарок: щоківі, молоткові, роторні, валкові, конусні, а також млини [18, 19, 20, 21, 22].

Залежно від виду руйнування сировини крупно рекомендується використовувати такі типи машин (табл. 1.2) [1].

Найчастіше в умовах агломераційного виробництва металургійних комбінатів для фракційної підготовки флюсів застосовуються однороторні реверсивні молоткові дробарки з шарнірним способом встановлення молотків типу ДМР (рис. 1.5) [28].



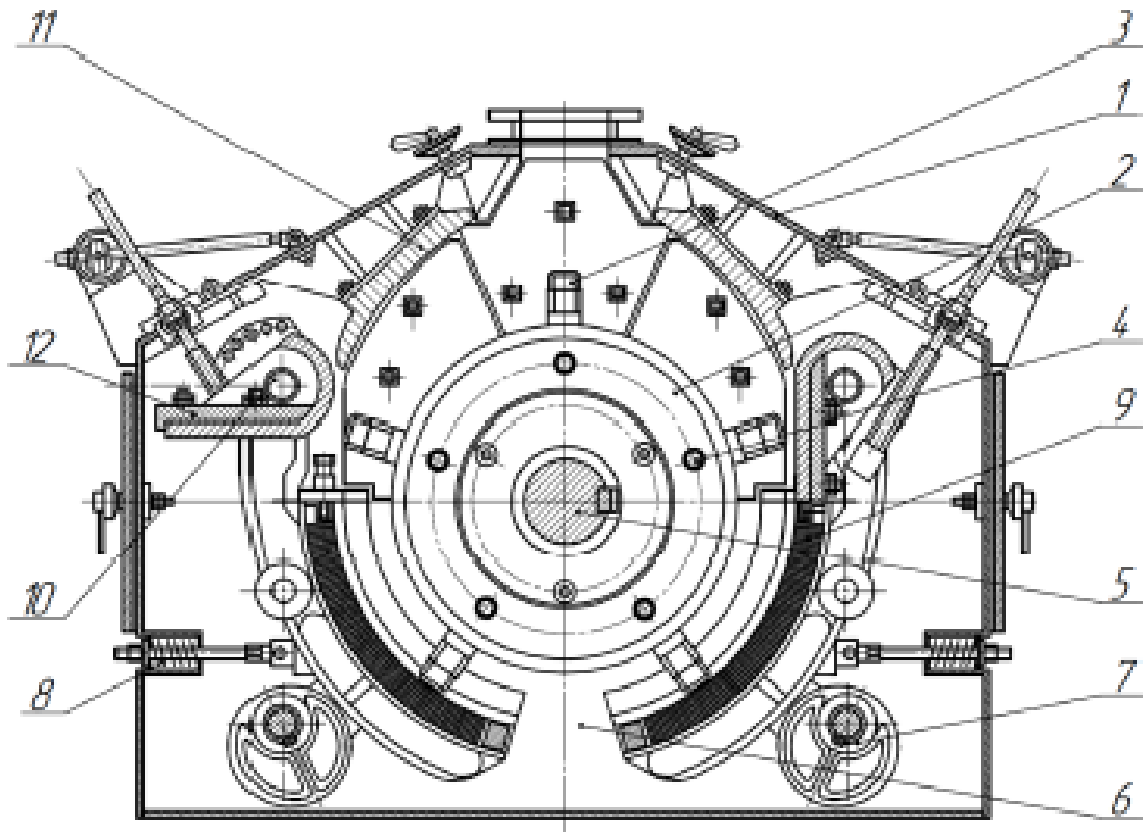


Рисунок 1.5 - Загальний вид дробарок типу ДМР

У молоткових дробарках типу ДМР використовується принцип дроблення матеріалів за рахунок ударів, розколювання та стирання між молотками 3 і колосниковими гратами 9. Дробарки випускають з центральним завантаженням матеріалу через отвір у корпусі 1, з встановленими на ньому відбійними 11 та поворотними плитами 12. Молотки на осях 4 шарнірно встановлені в отворах 2 дисків, які набрані на приводному валу ротора 5. Привід ротора здійснюється безпосередньо від двигуна. Колосникові решітки 9 закріплені шарнірно в корпусі на осях 10.

Дроблений продукт частково вивантажується через щілини в колосникових гратах, а основна маса матеріалу - через розвантажувальний отвір 6. Для регулювання зазору між колосниковими гратами і молотками з метою отримання необхідного ступеня дроблення матеріалу служить ексцентриковий механізм 7. Притискання колосникових грат до ексцентрика здійснюється пружинами 8.

З аналізу дробильно-подрібнювальних ударних машин з жорстким кріпленням бив ротора з точки зору енергозбереження випливає, що вони є кращими, ніж дробарки з шарнірним кріпленням молотків.

Однак, незважаючи на явні переваги роторних дробарок, одним з головних їх недоліків є велика ймовірність виходу з ладу робочих органів і швидке зношування поверхонь бив через їх відхилення при контакті з недрібними предметами, що обумовлено жорстким кріпленням на роторі, коли концентрація впливу руйнівних зусиль на робочі органи швидко зростає та різко знижує ресурс їх працездатності.

#### 1.4 Огляд досліджень основних процесів, що протікають при дробленні матеріалів

Основні показники роботи молоткових дробарок залежать не тільки від фізико-механічних та технологічних властивостей подрібнюваного матеріалу, його фракції до та після подрібнення, але також від конструктивних та механічних особливостей самої дробильної машини: радіальної швидкості молотків, конструктивних особливостей та маси ударних елементів, форми та площі поверхні колосникових грат та відбійних плит, розмірів отворів решітки та її кута охоплення робочої камери.

Встановлено, що одним із найважливіших робочих органів, що впливають на показники роботи дробарки, є молотки, зокрема їх форма, схема і спосіб установки на осі підвісу ротора, відстань від кінців молотків до поверхні колосникових грат, ступінь зносу і т.д.

У вирішення проблем теорії дроблення та подрібнення матеріалів молотковими дробарками, підвищення продуктивності процесу подрібнення, зносостійкості, надійності та довговічності окремих вузлів та деталей дробильних машин великий внесок зробили П.А. Ребіндер, П. Рітінгер, Ф. Кік, Ф. Бонд, В.А. Олевський, Є.Є. Серго, Б.В. Клушанцев, В.П. Барабашкін, С.Є. Андреев, А.М. Абаліхін, О.М. Моїсеев, А.А. Петров та ін., які

встановили, що процес подрібнення характеризується безліччю техніко-експлуатаційних факторів.

До найістотніших з них належать: витрати енергії, продуктивність та знос робочих органів дробарки.

#### 1.4.1 Енергетичні показники та продуктивність процесу дроблення

Витрати енергії на подрібнення шматка матеріалу може бути визначені з кількох існуючих гіпотез [3].

Згідно з першим законом дроблення (гіпотеза Ретінберга) необхідна повна робота для утворення нової поверхні при подрібненні пропорційна її зміні [2]:

$$A = k_p \Delta F = k_p (i - 1) \frac{Q}{D_{cp}}, \quad (1.1)$$

де  $k_p$  - коефіцієнт пропорційності між витраченою роботою та новоствореною поверхнею;

$\Delta F$  - новостворена поверхня;

$i$  - ступінь подрібнення матеріалу;

$Q$  - обсяг матеріалу;

$D_{cp}$  - середній розмір шматків перед дробленням.

За гіпотезою Кирпичева-Кіка, корисна робота процесу дроблення пропорційна зменшенню обсягу або маси шматків твердого матеріалу, коли зміна обсягу шматка пропорційно його початковому обсягу, а обсяг пропорційний третього ступеня його характерного обсягу  $D_{cp}$  [4]:

$$A = k_K D_{cp}^3, \quad (1.2)$$

де  $k_K$  - коефіцієнт пропорційності.

Цей закон справедливий для процесів дроблення, де основна енергія витрачається деформацію матеріалу. Рівняння (1.2) виражає гіпотезу, яка застосовується при визначенні роботи на дроблення великого шматка з низьким ступенем подрібнення і [6].

З гіпотези Ребіндера випливає, що залежність витрати енергії при подрібненні враховує роботи, що витрачаються на деформацію шматків, що руйнуються, і на утворення нових поверхонь подрібнювального матеріалу [14]:

$$A = k_R \Delta V + \sigma' \Delta F, \quad (1.3)$$

де  $k_R$ ,  $\sigma'$  - коефіцієнти пропорційності;

$\Delta V$  - зміна обсягу шматка, що руйнується.

За гіпотезою Бонда, необхідна елементарна робота пропорційна збільшенню середньо геометричного між об'ємом і новоствореною поверхнею [4]:

$$A = k_B \sqrt{\Delta V \Delta F} = k_B D_{cp}^{2.5}, \quad (1.4)$$

де  $k_B$  - коефіцієнт пропорційності.

Недоліком даних гіпотез (1.1)-(1.4) є неможливість обчислення абсолютного значення роботи подрібнення, оскільки не відомі коефіцієнти пропорційності. Численні поправки та доповнення до розглянутих основних гіпотез, висловлені різними авторами, а також деякі нові припущення лише ускладнюють методи розрахунку енерговитрат на дроблення при неповній достовірності результатів. Тому ці залежності використовуються лише для оцінного порівняння процесів дроблення та подрібнення.

Безліч робіт присвячено дослідженню продуктивності молоткових та роторних дробарок.

За В.П. Барабашкіним фактична продуктивність може бути визначена лише досвідченим шляхом [2, 5], оскільки цей показник впливає безліч

чинників. До того ж вона пов'язана ще й зі ступенем подрібнення та потужністю, що споживається.

В.І. Сироватка [6] зазначає, що основний параметр, що впливає на продуктивність дробарки - це діаметр ротора, від якого залежить швидкість руху матеріалу в робочому просторі дробильної камери.

На думку авторів [1-5], основним параметром молоткових дробарок, що визначає ефективність процесу подрібнення, є колосникові грати, при цьому збільшення відстані між колосниками або розміру отвору решета та коефіцієнта живого перерізу впливають на зростання продуктивності.

Питання впливу зазору між зовнішньою гранню молотка та робочою поверхнею колосникових грат розглянуті в роботах [1-2], де зазначено, що цей параметр має значне впливом геть продуктивність всього процесу підготовки загалом.

В.П. Барабашкін [27] вказує, що ефективність роботи ударного органу залежить від його кінетичної енергії [37, 38, 62]. Її можна регулювати шляхом зміни маси молотка та зміни швидкості обертання ротора. При цьому дробить здатність молотка малої маси, що обертається з великою швидкістю, і молотка більшої маси, що обертається з меншою швидкістю, не буде однаковою при рівній за величиною кінетичної енергії. Але так як зростання лінійної швидкості біл досягається за рахунок підвищення кутової швидкості обертання ротора, то це тягне за собою посилення вимог до балансування частин дробарки, що обертаються [3-5].

Збільшення числа молотків та його рядів на роторі підвищує продуктивність дробильної установки, але, своєю чергою, викликає зростання витрати енергії на холостий хід ротора, а також знижує ступінь використання енергії удару молотка внаслідок зменшення маси шматка матеріалу, що співпадає з одним молотком [4-7].

Формі молотка та її впливу на основні показники процесу дроблення, у тому числі продуктивність, присвячені наступні роботи [9], де теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що зміна форми

молотка дозволяє досягти зниження ефекту прослизання матеріалу по поверхні бойка та забезпечити умови виконання центрального удару молотків з шматком матеріалу, що дозволить підвищити ефективність процесу подрібнення.

Значний вплив на продуктивність процесу дроблення знос молотків.

Питаннями дослідження зносу робочої поверхні молотків займався В.І. Грицаєнко [7], який дійшов висновку, що «... молоток є робочим органом дробарки, що найбільш зношується. Ступінь зносу залежить від фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу, ступеня подрібнень, конструкції молотка...». Також у його роботі відзначено, що ступінь зношування робочих органів значно впливає на технологічний процес дроблення.

А.А. Зеленев [1] встановив вплив зносу молотків у процесі експлуатації на ефективність роботи дробарок. Однак увага приділялося лише його впливу на питому витрату енергії, а ступінь зношування не визначалася. Також впливом зносу робочих органів на якість подрібнення матеріалу у дробарці займався С.В. Мельников [2], який вивчав надійність і довговічність робочих органів та їх вплив на показники роботи дробарки. Безліч робіт присвятив О.І. Сидашенко [3, 4, 5] вивченню процесу зношування молотків та його впливу на якість та ефективність дроблення матеріалу, що розглянуто у розділі 1.5.5.

#### 1.4.2 Зношування молотків

Питаннями зношування робочих органів займалася А.А. Золотова [6], яка не досліджувала процес зносу, а лише констатувала сам його факт та негативний вплив на балансування ротора залежно від часу експлуатації дробарки.

П.М. Лузії вивів залежність питомого зношування ударних елементів від часу, на підставі якої встановив, що зношування молотків залежить від типу подрібнювального матеріалу, а не від продуктивності дробарки [7].

П.В. Андреев [8] запропонував методику виміру інтенсивності наростання зношування ударної частини молотка. При цьому для дослідження характеру кривої граничного зносу проводилися виміри кількох партій зношених молотків, а криві зносу ударної поверхні, описувані емпіричною формулою, будувалися за середніми значеннями радіус-векторів.

Б.І. Костецький [7] та низка інших авторів прийшли до рішення, що зношування має місце при терті кочення шматка поверхні молотка, що виникає, коли на поверхневий шар бойка молотка впливають циклічне навантаження. Це відбувається при контакті бив з шматком матеріалу при взаємодії з поверхнею колосникових ґрат дробарки.

С.В. Мельников у своїй роботі вважає, що найважливішими є експлуатаційні вимоги, спрямовані на підвищення довговічності роботи органів машин та надійності їх роботи, яка визначається тим, наскільки вони забезпечують одержання якісних показників продукту за номінальної продуктивності дробарки. Підвищення надійності молотків досягається головним чином вибором матеріалу їх виготовлення, і навіть режимів термообробки чи армуванням робочих кромek твердими сплавами» [2].

Ю.А. Власов, розглядаючи аналогічні процеси [8], розглянув знос останнього ступеня ступінчастого молотка та запропонував залежність щодо визначення зношування від кількості переробленого матеріалу, проте вона не враховує фізико-механічні властивості подрібнювального матеріалу.

Питання випробувань на зносостійкість молотків дробарок були розглянуті та у роботі В.І. Рубльова [81]. Автор проводить дослідження динаміки зношування і приходять до висновку, що знос прямо пропорційний напрацюванню.

Ф.Є. Ялпачик досліджував вплив зношування молотків на передачу ударів осям підвісу на роторі, і стверджує, що: «...знос молотків

супроводжується зміною їх наведеної довжини, відповідно, порушенням умов роботи молотків без передачі ударних імпульсів їх осям.

Отже, необхідно заздалегідь знати, скільки матеріалу повинен переробити молоток, щоб не порушилася умова роботи без удару» [16,17].

Аналіз публікацій, присвячених вивченню зносу, показав, що з відхиленні молота від радіального становища виникають умови інтенсивного прослизання зерна з його грані. Внаслідок мінімізації ефекту прослизання матеріалу по молотку його знос різко знижується [3].

Дослідження у роботі Савченко В.М. [4] полягали у встановленні геометричних параметрів зносу молотків дробарок для подальшого обґрунтування локального зміцнення ділянок робочої поверхні молотка. В результаті було отримано формулу, що визначає втрату маси ударного елемента в залежності від часу:

$$dM = m_{\psi} \omega^2 \left( R_F + \frac{P \cos \xi}{1 + \cos \xi} \right)^2 k q_3 \cos \left( \gamma - \arctg \frac{P}{\rho_p \sin \xi} \right) \cos \psi dt, \quad (1.5)$$

де  $m_{\psi}$  - маса шматків матеріалу;

$\omega$  - кутова швидкість обертання ротора;

$R_F$  - радіус обертання фокусу зношеної частини бойка;

$P$  - параметр параболи, що описує форму зносу робочої грані;

$\xi$  - кут нахилу полярного радіусу параболи;

$k$  - кількість молотків;

$q_3$  - щільність подрібнювального матеріалу;

$\gamma$  - кут нахилу молотка при ударному контакті зі шматком матеріалу;

$\rho_p$  - полярний радіус профілю молотка;

$\psi$  - кут нахилу полярного радіусу параболи в площині перпендикулярній поверхні робочої грані

Недоліком методики, запропонованої Савченком В.М., є те, що вона актуальна лише після аналізу геометричних параметрів, які набувають



молотки в процесі їхнього спрацьовування при дробленні. З часом експлуатації (після закінчення початкового періоду, пов'язаного з приробіткою поверхні молотків) вона може бути описана встановленими геометричними залежностями [85].

Абаліхін А.М. та Колобов М.Ю. [2-4] отримали рівняння для визначення величини зносу поверхні робочого органу ударно відцентрового подрібнювача:

$$y = \frac{8cm_q \omega}{\pi d_{вих}^2} \frac{r^2 k_1^2 k_2^2}{(k_1 - k_2)^2} \left[ \frac{e^{2k_3 t}}{2k_2} - \frac{2e^{(k_1+k_2)t}}{k_1 + k_2} + \frac{e^{(k_1+k_2)t}}{k_1 + k_2} \right] - \frac{4cm_q \omega r^2 k_1 k_2}{\pi d_{вих}^2 (k_1 + k_2)}, \quad (1.6)$$

де  $c$  - коефіцієнт пропорційності;

$r$  - відстань від осі ротора до точки контакту молотка зі шматком;

$k_1 = -\omega(f - \sqrt{f^2 + 1})$ ,  $k_2 = -\omega(f + \sqrt{f^2 + 1})$  - коріння характеристичного рівняння;

$f$  - коефіцієнт тертя вапняку по сталі;

$d_{вих}$  - середній діаметр вихідної частки;

$t$  - час взаємодії частки з молотком.

Ця формула застосовна визначення зносу робочої поверхні молотків, але, на жаль, вона враховує кут їх відхилення при ударному взаємодії зі шматком. Також ця залежність враховує знос протягом часу, але не дозволяє оцінити вплив кількості переробленого матеріалу у дробарці.

Моїсеєв О.М. та Петров А.А. у своїх роботах [68, 69] встановили, що ступінь зношування робочої поверхні молотка  $dy$  за час  $dt$  може бути визначений за аналітичною залежністю, що включає в себе функції розподілу шматків матеріалу при ударі  $L_1(x_0)$  та при їх ковзанні  $L_2(x_0)$ :

$$dy = dt \int_{x_1}^{x_2} [H_1(x, x_0)L_1(x_0) + H_2(x, x_0)L_2(x_0)] dx_0, \quad (1.7)$$

де  $H=c \cdot p \cdot u$ ,

тиск  $p$  і відносна швидкість  $u$  визначаються залежностями (1.8), (1.9), (1.10) для процесу зіткнення, і за співвідношенням (1.11) - для процесу ковзання по робочій поверхні;

$[x_1, x_2]$  - відрізок, на якому відбувається взаємодія молотка з частинками.

$$p = \left[ mV^2 (s+1) \frac{g^{\frac{1}{s}}}{2} \right] \frac{s}{s+1}, \quad (1.8)$$

де  $V$  - швидкість зіткнення;

$s, g$  - коефіцієнти, що залежать від деформаційних властивостей матеріалів.

$$u = \omega \left[ (x + R \cos \gamma) \sin(\gamma + \beta) + \left( R \sin \gamma + \frac{b}{2} - f(x) \right) \cos(\gamma + \beta) \right], \quad (1.19)$$

$$u = \frac{[-fT + m\omega^2(x+R)]^{3,218} \left(\frac{m}{g}\right)^{\frac{2}{5}} [\omega(x+R)]^{-\frac{1}{5}}}{m}, \quad (1.10)$$

де  $R$  - радіус підвісу молотка;

$\beta$  - кут нахилу дотичної до ударної поверхні молотка;

$b$  - ширина молотка;

$f(x)$  - форма ударної поверхні молотка;

$T$  - критичне напруження, у якому частка руйнується.

$$\begin{cases} u' = F(u, x, f(x), f', f'') \\ N = F(u, x, f(x), f', f'') \end{cases} \quad (1.11)$$

Або:

$$u' = \frac{1}{u(1+f'^2)} \left[ \omega^2 \left\{ (1+f_{ck}f')(x+R\cos\alpha) + (f_{ck}-f') \left( \frac{b}{2} + R\sin\alpha - f(x) \right) \right\} \times \right. \\ \left. \times xu^2(f_{ck}-f')f'' - 2\omega u f_{ck}(f'^2+1) \right];$$

$$N = \frac{m}{\sqrt{1+f'^2}} \left[ \left\{ -zf'' - \omega^2 [f'(x+\cos\alpha) + \left( \frac{b}{2} + R\sin\alpha - f(x) \right) + 2\omega u(1+f'^2)] \right\} \right];$$

Для вирішення даних залежностей за часом необхідний тривалий покроковий процес інтегрування залежності (1.7) зі знаходженням форми  $f(x)$  ударної поверхні молотка на кожному кроці. Як крок за часом необхідно вибрати час, кратний одному обороту молотка. Тобто, як і у співвідношенні (1.5) необхідно визначити залежність форми зносу молотка у процесі роботи експериментально, і лише після цього можливе прогнозування ресурсу молотка під час експлуатації.

Формули (1.5), (1.6) та (1.11) застосовні для умов зносу ударних поверхонь робочих елементів при зміщенні шматка по поверхні молотка в процесі вільного ударного контакту, що зустрічається тільки в безрешітних молоткових та роторних дробарках.

Таким чином, питання взаємодії ударних елементів з подрібнювальним матеріалом та умови роботи молотка вивчені поки що не повною мірою. Деякі припущення та їх результати мають досить суперечливий характер. Прогнозування ресурсу молотків та вивченню їхнього зносу приділялося недостатньо уваги. Усе це свідчить про необхідність продовження досліджень, вкладених у підвищення ефективності використання молоткових дробарок при дробленні різних типів матеріалу.

У процесі експлуатації при ударній взаємодії з матеріалом, що подрібнюється, робочі органи дробильних машин піддаються зношуванню, яке може досягати 3-3,5 мм/год. При взаємному ударному контакті виникають різні види взаємодії поверхонь, що впливають на вигляд механічного зношування (згідно з ДСТУ 2823-94 [38]).

У багатьох роботах, присвячених процесу зношування ударних

робочих органів молоткових дробарок [1-9], вид зношування визначається як абразивний або втомний механічний, що виникає при ковзанні окремих шматків по поверхні молотка в процесі удару. Для визначення його інтенсивності згідно [8, 9, 14, 29] була використана гіпотеза Престона [9]:

$$h = \int_0^t AVP \partial t, \quad (1.12)$$

де  $h$  - товщина шару знятого матеріалу;

$A$  - коефіцієнт, що визначає технологічні фактори процесу;

$V$  – швидкість відносного руху;

$P$  - контактний тиск;

$t$  – час взаємодії.

Однак згідно з теорією удару Герца [9], центр контактної взаємодії залишається нерухомим до закінчення процесу зіткнення і тіла після нього мають різні швидкості (причому менше тіло рухається швидше більшого), а значить, у процесі дроблення матеріалу в молотковій дробарці ковзання по поверхні молотка не відбувається. Також можна припустити, що молоток працює в умовах поверхневого руйнування під впливом динамічного потоку твердих шматків, лише за умови, що він рухається з великою швидкістю у потоці.

За цих умов можна скористатися моделлю ерозійного зносу, представивши шматок сировини як макротіло, що складається з безлічі дисперсних частинок [2, 3].

Теорія ерозійного зносу ґрунтувалася на роботах І.К. Лебедева, В.М. Братчикова, Фінна (I. Finnie), Нільсона (Neilson F.H.) та Гілхриста (Gilchrist A.).

За І.К. Лебедеву, інтенсивність ерозійного зносу визначається співвідношенням [4]:

$$V = \frac{f(1-k)}{2g\rho_T\varepsilon^m} v_0^2 \sin^2 \alpha_0 (ctg \alpha_0 - fk) \quad (1.13)$$

де  $V$  - обсяг зношеного матеріалу, що припадає на 1 кг абразиву;

$\alpha_0$  - кут атаки;

$v_0$  - швидкість частинок;

$g$  - прискорення вільного падіння;

$f$  - коефіцієнт тертя;

$k$  - коефіцієнт відновлення (по Ньютону);

$p_T$  - середній тиск плинності матеріалу;

$\varepsilon$  - коефіцієнт потовщення стружки;

$m$  - константа.

Фіннай запропонував наступні рівняння для розрахунку зносу [95]:

$$V = \frac{v_0^2}{8g\sigma_{TY}} (\sin 2\alpha_0 - 3\sin^2 \alpha_0), \quad \alpha_0 \leq 18,5^\circ, \quad (1.14)$$

$$V = \frac{v_0^2}{24g\sigma_{TY}} \cos^2 \alpha_0, \quad \alpha_0 > 18,5^\circ, \quad (1.15)$$

де  $\sigma_{TY}$  – межа плинності при ударі.

Нільсон і Гілхрист запропонували такі формули [96]:

$$I_{ep} = \frac{1}{2\psi} (v_0^2 \cos^2 \alpha_0 - v_p^2) + \frac{1}{2\varepsilon} (v_0 \sin \alpha_0 - v_{el})^2, \quad \alpha_0 \leq \alpha_p, \quad (1.16)$$

$$I_{ep} = \frac{1}{2\psi} v_0^2 \cos^2 \alpha_0 + \frac{1}{2\varepsilon} (v_0 \sin \alpha_0 - v_{el})^2, \quad \alpha_0 \geq \alpha_p, \quad (1.17)$$

де  $I_{ep}$  - інтенсивність зношування при ерозії (відношення зношеної маси до маси абразиву);

$\psi$ ,  $\varepsilon$  - граничні значення енергій, необхідних для руйнування одиниці маси

тіла, що зношується при деформаційному знос і знос мікрорізання відповідно;

$v_{el}$  - максимальне значення вертикальної компоненти швидкості, при якій матеріал, що зношується, деформується пружно;

$v_p$  - горизонтальна компонента швидкості абразивної частки після зіткнення з поверхнею, що зношується;

$\alpha_p$  - мінімальний кут, при якому  $v_p = 0$ .

У формулах (1.13), (1.16) та (1.17) безліч складових, які у виробничих умовах визначити практично неможливо, тому для визначення зносу молотків при ерозійному зносі краще скористатися залежностями Фінна (1.14) та (1.15).

#### 1.4.3 Фактори, що впливають на технологічні показники процесу дроблення

На основні показники роботи дробарки впливають режим роботи (швидкість і час обробки), характеристика подрібнюваного матеріалу (абразивність, твердість, вихідна фракція, вологість, тріщинуватість), форма, фізико-хімічні властивості та спосіб зміцнення поверхні молотка.

Також істотне значення мають кінематичні показники процесу взаємодії шматка з молотком (відстань вільного руху шматка в робочій зоні молотків та кут відхилення робочого органу). При ковзаючих ударах, що спостерігаються при проникненні шматків у зону обертового ротора на глибину менше 0,6 максимального розміру шматка, що не забезпечується руйнування шматків центральними ударами [16]. Також у процесі ударного зіткнення відбувається відхилення молотка на осі підвісу ротора від радіального положення, що призводить до прослизання матеріалу по поверхні молотка та до зменшення частки кінетичної енергії, спрямованої на руйнування матеріалу, яке, у свою чергу знижує зносостійкість ударних органів та ступінь дроблення матеріалу [22, 35], згідно з дослідженнями у

роботах Позднякова В.Д. та Маліча Н.Г. [3-6], відображених на графіку (рис. 1.6).

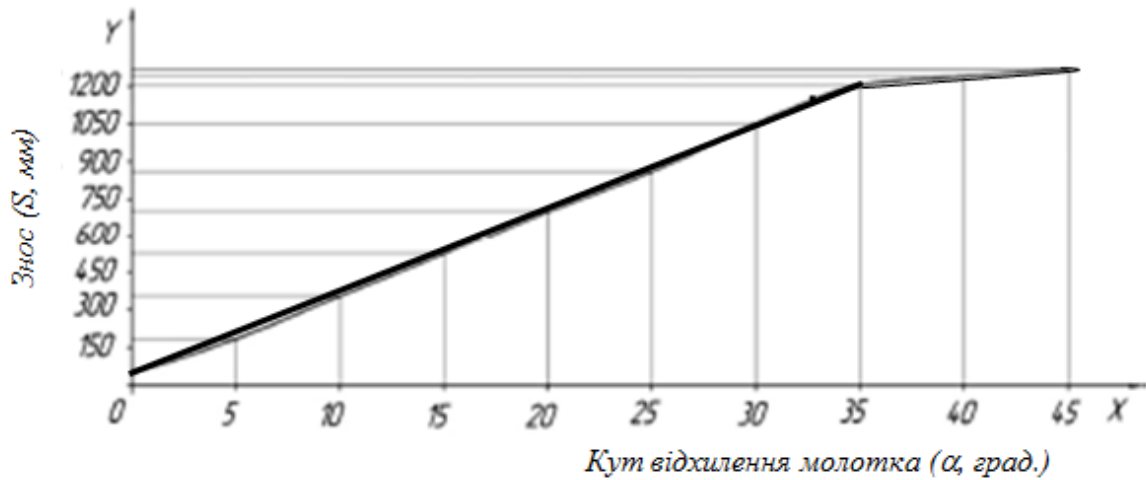


Рисунок 1.6 - Залежність зносу робочої поверхні молотка від кута відхилення молотка від радіального становища

Глибину проникнення можна визначити за формулою [9]:

$$c = \frac{54}{nz} \left( 1 - \frac{z(B + d_M)}{2\pi R} \right) \cdot \sqrt{2gh}, \quad (1.18)$$

де  $n$  - число обертів ротора за хвилину;

$z$  - кількість рядів молотків;

$B$  - довжина робочої грані молотка по зовнішньому радіусу;

$d_M$  - максимальний розмір шматка;

$R_{вн}$  - зовнішній радіус ротора;

$h$  – висота падіння.

За формулою (1.18) неможливо з достатньою точністю визначити глибину проникнення, оскільки вона не враховує швидкість виходу шматка матеріалу з живильника під час завантаження.

Формула Б.В. Клушанцева для визначення глибини проникнення (вільного руху частки у робочій зоні дробарки – радіуса обертання

зовнішньої поверхні молотків) [22] включає швидкість руху матеріалу по лотку  $v_K$ :

$$h_{\max} = \frac{v_K}{v_p} \left( \frac{\pi D_p}{z} - B - \frac{d_M}{2} \right) \cdot \sqrt{2gh}, \quad (1.19)$$

де  $v_K$  - швидкість руху матеріалу в момент торкання кола ротора при подачі по лотку:

$$v_K = \sqrt{2gh(1 - \mu \operatorname{ctg} \varphi_l)}, \quad (1.20)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя матеріалу по лотку;

$\varphi_l$  - кут нахилу лотка;

$v_p$  - окружна швидкість ротора;

$D_p$  - діаметр робочої зони ротора.

При застосуванні вібраційних живильників, що використовуються на більшості аглофабрик для подачі сировини в дробильну установку, необхідно визначити швидкість закінчення потоку матеріалу з них.

За запропонованою К.Ф. Іванченко методиці [4] швидкість руху матеріалу у вібраційному живильнику приблизно визначається як:

$$v_K = (k_1 + k_2 \sin \beta) \alpha \omega_E \cos \beta' \sqrt{1 - T^2}, \quad (1.21)$$

де  $k_1$ ,  $k_2$  - коефіцієнти, що враховують властивості матеріалу, що транспортується;

$\beta$  - кут нахилу трубоконеєра;

$\alpha$  - амплітуда коливань труби;

$\omega_E$  - кутова швидкість ексцентрикового валу (циклічна частота);

$\beta'$  - кут напрямку коливання;



$T$  - коефіцієнт режиму роботи трубоконвеєра.

Проте на практиці використання формули (1.21) важко, тому що амплітуду коливань труби та їх кут напряду визначити досить проблематично.

Існує досить багато робіт, присвячених розрахункам кута відхилення при контактній взаємодії зі шматком матеріалу в робочому просторі молоткової дробарки.

Одна з перших спроб обґрунтування дії молотка як робочого органу молоткової дробарки, в якій розглядається рівняння руху молотка та вказується, що ударний елемент може відхилитися від радіального положення у процесі зіткнення, зроблено І.В. Макаровим [4].

Гернет М.М. запропонував формулу для визначення кута відхилення молотка при зіткненні з шматком матеріалу, де враховується робота в його відносному русі [5]:

$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{A_1}{PL}\right) = \arccos\left(1 - \frac{D_1(v_M - v'_M)^2}{4v^2\left(D_1 - \frac{D}{2}\right)}\right), \quad (1.22)$$

де  $A_1$  - робота у відносному русі молотка;

$P$  - відцентрова сила, що діє на молоток;

$L$  - плече молотків;

$m_M$  - маса молотка, зосереджена в точці зіткнення (зведена маса молотка);

$v_M$  - швидкість молотка до удару;

$v'_M$  - швидкість молотка після удару;

$D_1$  - діаметр кола, в зоні якого відбувається зіткнення;

$D$  - діаметр кола підвісу молотка.

А.А. Петровим [8] запропоновано залежність для визначення кута нахилу молотків при взаємодії з повітряно-продуктовим шаром, отриману на

підставі закону збереження моменту кількості руху щодо точки підвісу молотка:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{2m_M \omega^2 ZC}{h_M \xi_{1M} \rho_C \mu_1^2(r)} = \operatorname{arctg} \frac{2m_M \omega^2 ZC}{h_M \xi_{1M} \rho_C (\omega r - v_M(r))^2}, \quad (1.23)$$

де  $m_M$  - маса молотка;

$ZC$  - відстань від осі ротора до точки контакту молотка зі шматком

$h_M$  - висота молотка;

$\xi_{1M}$  - коефіцієнт гідравлічного опору руху молотків у повітряно-продуктовому шарі;

$\rho_C$  - щільність повітряно-продуктового шару;

$u_1(r)$  - швидкість обтікання;

$v_n$  - окружна швидкість потоку.

Проте формула (1.23) застосовна в умовах встановленого режиму роботи дробарки, а не в момент ударного контакту молотка зі шматком матеріалу. Тому найбільш справедливою визначення кута відхилення є формула залежності кута нахилу осі молотка від маси шматка подрібнювального матеріалу А.І. Сидашенко [10], заснована на законі збереження моментів кількості руху до та після удару:

$$\gamma = \frac{R+l-a}{(l-a) \left( 1 + \frac{m_M(l-a)^2 - a^2}{m_M(l-a)^2} \right) \sqrt{\frac{3(R+r)^2}{(l-a)^2 - a^2}}}, \quad (1.24)$$

де  $l$  - довжина молотка;

$a$  - довжина ділянки ніжки нижче осі підвісу;

$r$  - радіус до зовнішньої грані.

А.І. Сидашенко у своїй формулі (1.24) відштовхувався від закону

збереження імпульсу, не враховуючи закон збереження кінетичної енергії за пружного удару. Також у цій формулі не враховано вплив відстані вільного руху шматка у робочій зоні молотків.

### Висновки

1. Підвищення ефективності роботи молоткових дробарок для агломераційних флюсів шляхом збільшення терміну служби та підвищення ефективності ударного впливу молотка на вихідний матеріал за рахунок впровадження нової конструкції, що дозволяє зменшити кут відхилення та втрату кінетичної енергії удару в процесі роботи, на даний час є актуальним напрямком розвитку технології підготовки сировини для металургійного виробництва.
2. Промислова експлуатація діючих молоткових дробарок дозволяє практично вирішувати завдання фракційної підготовки агломераційних флюсів із забезпеченням необхідної техніко-економічної ефективності дроблення сировини. Однак ці типи машин не повною мірою відповідають вимогам довговічності робочих органів та ступеня дроблення, що викликано відхиленням молотків від радіального положення при взаємодії зі шматком матеріалу та втрата кінетичної енергії удару.
3. У методологічному забезпеченні конструкторських робіт щодо вдосконалення існуючих конструкцій молотків при розгляді їх як ударних робочих елементів молоткових дробарок не приділяється достатня увага впливу ступеня дроблення та зношування ударних елементів на ефективність подрібнення. При цьому відомі рекомендації, як правило, не повною мірою розкривають особливості роботи, наприклад ударної взаємодії молотків з матеріалом у робочій зоні.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ

Метою роботи є дослідження причин виникнення зносу та втрат кінетичної енергії та ударного імпульсу при взаємодії шматка подрібнювального матеріалу з молотками, що зумовлює зміну форми ударної частини та обліку комплексного впливу факторів, від яких прямо чи опосередковано залежить ефективність роботи молотків. До цих факторів слід віднести відстань вільного проникнення подрібнювального матеріалу в робочу зону молотків дробарки, кут їх відхилення від радіального положення при ударному зіткненні з шматком, швидкість ковзання матеріалу по поверхні бойка на всіх стадіях дроблення.

### 2.1 Етапи дроблення матеріалу в молотковій дробарці.

Основними факторами, що впливають на показники роботи в процесі дроблення матеріалу в ударній безрешітній молотковій дробарці, є швидкість  $V_k$  і напрямок руху  $T_k$  подрібнюваного матеріалу в робочому просторі, а також кут відхилення молотків  $\gamma_k$  від радіального положення при ударній взаємодії зі шматками матеріалу.

До факторів, що характеризують даний технологічний процес окремо, відносяться [20]:

- 1.1 - вихід матеріалу з трубоконвеєра;
- 1.2 - проникнення в робочу зону молотків;
- 1.3 - зіткнення з молотками;
- 1.4 - рух подрібнювального матеріалу у напрямку до відбійної плити;
- 1.5 - взаємодія шматків з відбійною плитою.

Для вивчення впливу різних елементів дробильного комплексу (у даному випадку використовувалося технологічне обладнання корпусу дроблення агломераційних флюсів ділянки підготовки шихтових матеріалів агломераційного цеху, що включає і вібротрубоконвеєр і реверсивну

молоткову дробарку (з демонтованими колосниковими ґратами) [103], розглянута її структура, що складається з п'яти основних елементів - підсистем.

Кожна з підсистем виконує певні функції і переводить систему з попереднього стану стану  $S_i$  з параметрами  $V_k, T_k, \gamma_k$  в наступний стан  $S_{i+1}$  з параметрами  $V_{k+1}, T_{k+1}, \gamma_{k+1}$ .

Подача вихідної сировини трубоконвеєром характеризується її швидкістю пересування  $v_{ч1}$ , яка впливає напрямом закінчення матеріалу  $T_1$  і на місце розташування точки входу в робочу зону молотків (етап 1.1).

На наступній стадії здійснюється зіткнення матеріалу з молотками (етап 1.2), в процесі якого відбувається зміна лінійної швидкості  $v_{м2}$  бил та їх відхилення на деякий кут  $\gamma_2$ , а також придбання шматком певної швидкості  $v_{ч3}$  після удару.

Від кута відхилення молотка та місця розташування точки ударного контакту залежить траєкторія руху матеріалу  $T_3$  до відбійної плити (етапи 1.3).

Наступним етапом (етап 1.4) є повернення подрібнювального матеріалу в робочу зону молотків, що характеризується швидкістю руху шматка після удару об відбійну плиту  $v_{ч4}$  та його траєкторією  $T_4$ .

При повторному ударному контакті (етап 1.5)  $T_5$  молотки стикаються при швидкості  $v_{м5}$  зі шматком, що рухається зі своєю швидкістю  $v_{ч5}$  під кутом  $\gamma_5$ .

## 2.2 Дослідження основних параметрів руху частки та молотка

Параметри, що характеризують рух при контакті шматка матеріалу та молотків до та після удару, безпосередньо впливають на показники більшості процесів, пов'язаних із взаємодією сировини та ударних органів. Для оцінного аналізу впливу параметрів кожного етапу підготовки шихтових

матеріалів у ударній молотковій дробарці необхідно дослідити кінематику шматків та ударних органів у її робочому просторі.

Для визначення параметрів кінематичного руху молотка і шматка матеріалу при математичному моделюванні прийняті такі припущення:

- шматок матеріалу представляється у вигляді кулі;
- силами тертя у шарнірах нехтують (внаслідок їх незначного впливу);
- молоток представлений у вигляді стрижня із зосередженою масою у центрі тяжіння;
- відбійна плита абсолютно нерухома.

### 2.2.1 Аналіз руху сировини у вібраційному живильнику

Характер проникнення сировини у робочу зону дробарки залежить від стадії завантаження та входження шматка матеріалу в зону зіткнення з молотками.

Для достовірного виявлення значення кута  $\beta$ , а відповідно, та швидкості руху шматків, використовується метод, заснований на визначенні амплітуди вертикальних  $\alpha_1$  та горизонтальних  $\alpha_2$  коливань (рис. 2.3).

З рисунку 2.3 значення амплітуди результуючих переміщень під час руху матеріалу по вібраційній трубі визначається значення амплітуди результуючих переміщень при русі матеріала по вібраційній трубі визначається як:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}. \quad (2.1)$$

Кут між напрямом коливань труби та нормаллю до поверхні:

$$\beta' = \arccos\left(\frac{\alpha_1}{\alpha}\right) - \beta, \quad (2.2)$$

де  $\beta$  - кут нахилу осі вібротруби.

Підставивши у формулу (1.21) залежності (2.1) та (2.2), швидкість транспортування вантажу живильником і відповідно закінчення матеріалу в робочу зону дробарки, приблизно може бути визначена за формулою [16]:

$$V_{v1} = \omega_E (k_1 + k_2 \sin \beta) \sqrt{1 - \frac{1}{T_k^2}} (\alpha_2 \cos \beta - \alpha_1 \sin \beta) \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Проникнення матеріалу у робочу зону молотків

Другою стадією процесу подачі дрібної сировини в дробарку є проникнення шматка матеріалу в зону зіткнення з молотками (етап 1.1).

Розташування точки зіткнення з контактною поверхнею робочого органу впливатиме на процеси удару та подальшого руху шматка до відбійної плити.

Позиціонування центру зіткнення шматка та молотка залежатиме від глибини впровадження  $s$  та відстані вільного руху шматка в робочій зоні  $l$  шматка до точки реалізації ударного контакту (рис. 2.1).

Відстань, яка долається шматком до центру удару з молотками у горизонтальній площині, визначається системою рівнянь руху матеріалу щодо вертикальної осі обертання ротора дробарки:

$$\begin{cases} l = V_{v1} \cos \beta t, \\ h = V_{v1} \sin \beta t - \frac{gt^2}{2}, \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $h$  - відстань від точки вивантаження матеріалу з вібраційного живильника до радіального положення зовнішньої грані молотків  $R_0$  (рис. 2.4);

$t$  - час падіння шматка матеріалу.

Рішення системи рівнянь (2.4) дає результат як залежність [16]:

$$l = \frac{\sqrt{V_{ч1}^2 \sin^2 2\beta + 8ghV_{ч1}^2 \cos \beta} - V_{ч1}^2 \sin 2\beta}{2g} . \quad (2.5)$$

Припустимо, що шматок дробленого матеріалу знаходиться на однаковій відстані між сусідніми молотками і проникає в зону ротора, що обертається, де піддається впливу наступного молотка.

Тоді відстань вільного руху шматка в робочій зоні молотків [16]:

$$c = (V_{ч1} \sin \beta + \sqrt{2gh}) \frac{\pi}{z\omega} , \quad (2.6)$$

де  $z$  - кількість рядів молотків у дробарці;

$\omega$  - кутова швидкість обертання ротора.

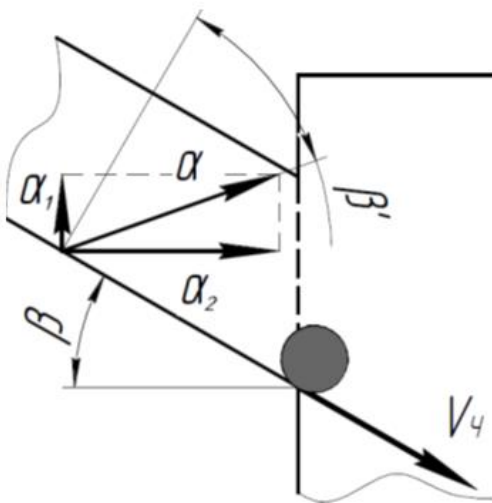


Рисунок 2.1 - Схема проникнення шматка в робочу молоткову зону дробарки

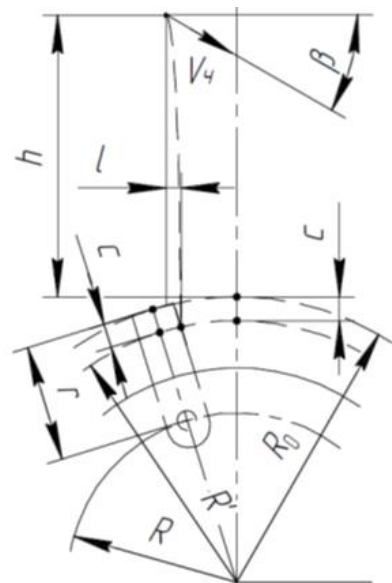


Рисунок 2.2 - Схема для розрахунку швидкості руху матеріал в трубо конвеєрі

Виходячи з цього, радіус зіткнення шматка матеріалу з молотком визначається за формулою:



$$R' = R + r - c, \quad (2.7)$$

де  $R$  - радіус осей підвісу молотків;

$r$  - відстань від осі кріплення молотків на роторі до зовнішньої грані бойка.

### 2.2.3 Ударний контакт молотків із матеріалом

Для визначення кута відхилення молотків необхідно досліджувати процес їх одиночних ударів у момент контакту робочих органів із шматком вапняку при завантаженні в молоткову дробарку (етап 1.2), для чого сформулюємо математичну модель, засновану на використанні другого закону Ньютона (диференціального закону механічного руху) [27] та статичної теорії удару Герца [28].

Класична теорія удару пружних тіл передбачає, що їхня відносна швидкість при взаємному ударному контакті дорівнює нулю, а центр зіткнення (точка А, рис. 2.2) залишається відносно нерухомим [34, 36].

У разі застосування цієї теорії до умов молоткової дробарки використовується система, що складається з двох взаємопов'язаних шарнірів, що обертаються щодо центрів обертання ротора (робоча зона молотків з радіусом обертання  $r'$ ) та осі підвісу молотків, де положення точки зіткнення в координатних осях  $x$  і  $y$  залишається незмінним.

Розглянемо зворотне завдання - шматок матеріалу з певною швидкістю вдаряє по нерухомому молотку. При цьому робочий орган отримує початкову швидкість, що залежить від масових характеристик шматка матеріалу, швидкості його руху та моменту інерції самого молотка. Припустимо, що відбувається абсолютно непружний центральний удар, модель ударного контакту якого зображена на схемі (рис. 2.3).

Представимо шматок подрібненого матеріалу у вигляді умовно зосередженої маси у певній точці шару матеріалу  $m_c$ , що вступає в ударну

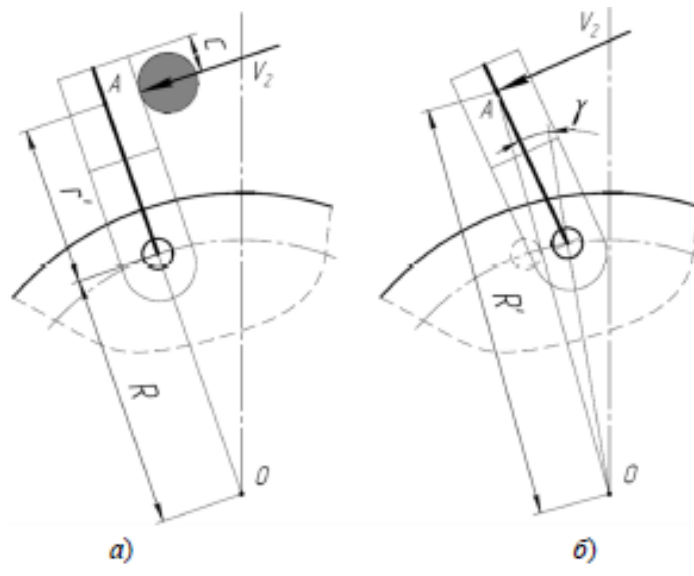
взаємодію з молотками, а самі молотки як умовного стрижня масою  $m_{\Sigma M}$ . У цьому випадку центр зіткнення буде розташований у точці  $A$ .

Для визначення швидкості, що купується молотком після удару про шматок зі швидкістю  $v_{ч2}$ , скористаємося законом збереження кінетичної енергії та законом збереження імпульсів тіл, що вступають у взаємодію [20]:

$$\begin{cases} \frac{m_ч v_{ч2}^2}{2} = \frac{m_{\Sigma M} v_{M2}^2}{2} + \frac{m_ч v_{ч3}^2}{2}, \\ m_ч v_{ч2} = m_{\Sigma M} v_{M2} + m_ч v_{ч3} \end{cases}, \quad (2.8)$$

де  $v_{M2}$  - швидкість молотка наприкінці удару;

$v_{ч3}$  - швидкість частки після зіткнення.



*a - в початковій стадії удару; б - в кінцевій стадії удару*

Рисунок 2.3 - Розрахункова схема визначення кута відхилення молотка у момент зіткнення зі шматком матеріалу

Виходячи з рішення системи рівнянь (2.8), формула для визначення швидкості руху молотка в кінцевій стадії зіткнення (коли центри мас віддаляться один від одного) виглядає як [20]:

$$v_{m2} = v_{q2} \frac{2m_q}{m_q + m_{\Sigma M}}. \quad (2.9)$$

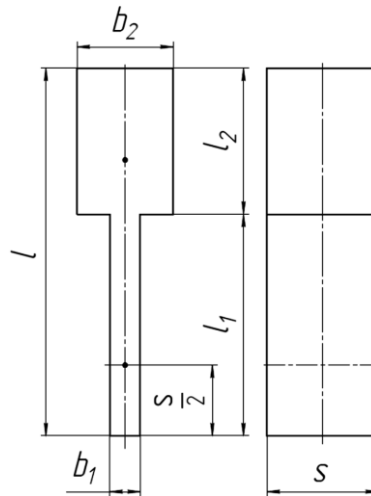


Рисунок 2.4 - Схема визначення радіуса інерції молотка щодо осі підвісу ротора

Визначивши швидкість ударного елемента в момент закінчення зіткнення, молоток відхиляється на певний кут  $\gamma_2$ , який може бути визначений виходячи з основного диференціального рівняння руху:

$$J_M \cdot \ddot{\gamma}_2 + m_{\Sigma M} \omega^2 R'(r - c) \sin \gamma_2 = 0, \quad (2.10)$$

де  $J_M$  - момент інерції молотка.

Для визначення моменту інерції молотка щодо осі обертання на осі підвісу ротора скористаємося розрахунковою схемою (рис. 2.6).

Момент інерції молотка визначається як:

$$J_M = m_{\Sigma M} r_M^2, \quad (2.11)$$

де  $r_M$  - радіус центру мас (радіус інерції) ударного елемента:

$$r_m = \frac{b_1 l_1 (l_1 - s) + b_2 l_2 (2l_1 + l_2 - s)}{2(b_1 l_1 + b_2 l_2 - b_1 s)}, \quad (2.12)$$

де  $b_1, l_1$  - товщина та довжина ніжки молотка відповідно,

$s$  - ширина молотка,

$b_2, l_2$  - товщина і довжина бойка.

Оскільки кут  $\gamma_2$  припускаємо досить малим, то  $\sin \gamma_2 = \gamma_2$ ,  $R' \approx R + r$ .

Тоді:

$$\ddot{\gamma}_2 + \frac{m_{\Sigma m} \omega^2 (R + r - c)(r - c)}{J_m} \gamma_2 = 0. \quad (2.13)$$

Рішення рівняння (2.13) має вигляд:

$$\gamma_2 = C_1 \sin \sqrt{\omega_1 t} + C_2 \cos \sqrt{\omega_1 t}, \quad (2.14)$$

де:

$$\omega = \frac{\omega(R + r - c)(r - c)}{r_m^2}. \quad (2.15)$$

Постійні  $C_1$  та  $C_2$  визначаємо з початкових умов:

$$t = 0: \gamma_2 = 0, \dot{\gamma}_2 = \frac{v_{m2}}{r - c}. \quad (2.16)$$

Виходячи з цих умов, формула (2.14) набуде вигляду:

$$\gamma_2 = \frac{v_1'}{(r - c)\sqrt{\omega_1}} \sin \omega_1 t. \quad (2.17)$$

Враховуючи, що максимальне значення кута  $\sin \gamma_2$  досягається за умови

$$\omega_1 t = \frac{\pi}{2}:$$

$$\gamma_2 = \frac{v_1}{(r - c)\sqrt{\omega_1}}. \quad (2.18)$$

Підставивши  $\omega_1$  та  $v_1'$ , отримуємо [112]:

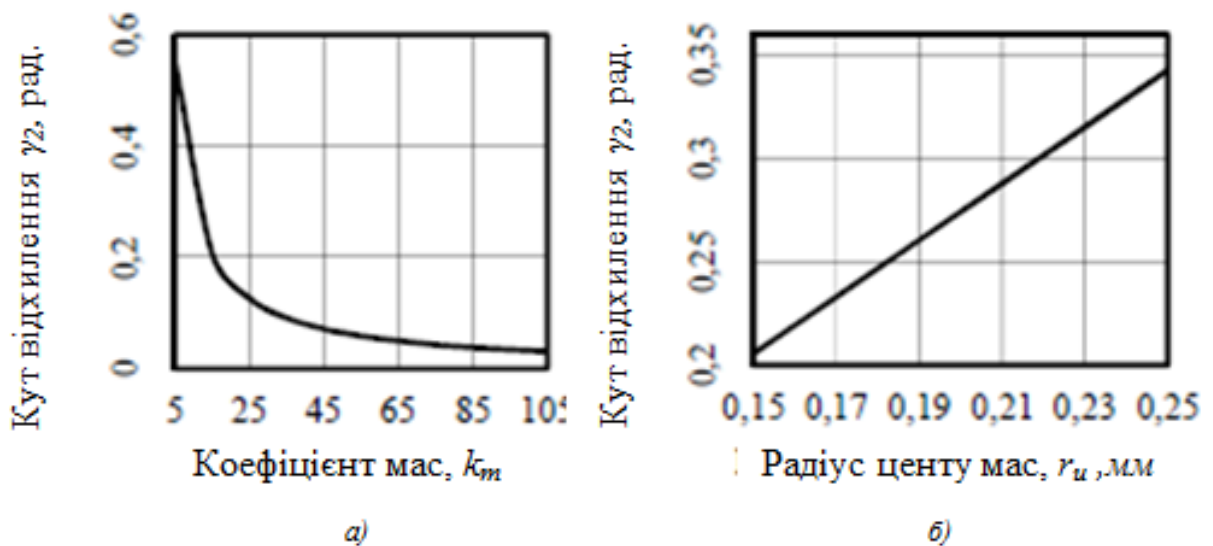
$$\gamma_{2 \max} = \left(1 + \frac{R}{r - c}\right) \frac{4m_q r_u}{(m_{\Sigma m} + m_q) \sqrt{(r - c)(R + r - c)}}. \quad (2.19)$$

Перетворимо формулу (2.19), використовуючи замість мас шматків і молотків їхнє відношення  $k_m = \frac{m_{\Sigma m}}{m_u}$  (коефіцієнт мас), тоді вона прийме наступний вид:

$$\gamma_2 = \left(1 + \frac{R}{r-c}\right) \frac{4r_u}{(k_m + 1)\sqrt{(r-c)(R+r-c)}}. \quad (2.20)$$

Для аналітичного порівняння залежності (2.20) за допомогою математичного програмного забезпечення MathCAD отримано рішення лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку (2.13), під час вирішення завдання Коші - однорідного диференціального рівняння з початковими умовами (2.16).

На графіках (рис. 2.4) наведено відображення теоретичної залежності кута відхилення молотка від маси шматків матеріалу та радіуса інерції ударного органу (для геометричних параметрів робочих органів дробарки ДМР 14,5×13).



*а - при зміні коефіцієнта мас  $k_m$ , б - при зміні радіусу інерції молотка  $r_i$  та постійному коефіцієнті мас ( $k_m = 16$ )*

Рисунок 2.5 - Графіки залежностей кута відхилення молотків

З аналізу отриманої залежності випливає, що із зменшенням коефіцієнта мас  $k_m$  та збільшенням радіуса інерції молотка  $r_u$  кут відхилення при зіткненні збільшується, причому різко зростає при досить малих значеннях  $k_m$ .

#### 2.2.4 Рух шматка матеріалу по поверхні молотка після повторного проникнення до робочої зони

Розглянемо рух шматка матеріалу по ніжці та робочій поверхні молотка у процесі їхньої взаємодії при повторному проникненні в робочу зону молоткової дробарки.

Виходячи з того, що величина швидкості руху шматка в напрямку руху молотків порівнянна з лінійною швидкістю молотка в точці взаємодії, а також проаналізувавши характерні траєкторії руху матеріалу на етапі 1.5, передбачається, що шмат контактує з молотком в зоні перетину із зовнішньою поверхнею ротора, а взаємодія відбувається без відхилення молотка (відповідно до залежності (2.20)).

Тоді розглянемо рух шматка по молотку від точки контакту з диском та ніжки молотка в радіальному напрямку як ковзання по жорстко закріпленому ударному елементу (рис. 2.5).

У момент переміщення шматка по поверхні ударного елемента на нього діють відцентрові сили  $F_{цб.ч}$ , сила кінетичного тертя ковзання матеріалу  $F_{тр}$ , сила нормальної реакції  $N$  і сила Коріоліса  $F_k$  [20].

Векторна форма рівняння відносного руху шматка матеріалу запишеться як:

$$m_c \bar{a} = \bar{N} + \bar{F}_{тр} + \bar{F}_{цб.ч} + \bar{F}_k, \quad (2.21)$$

де  $\bar{a}$  вектор відносного прискорення шматка матеріалу щодо поверхні молотка.

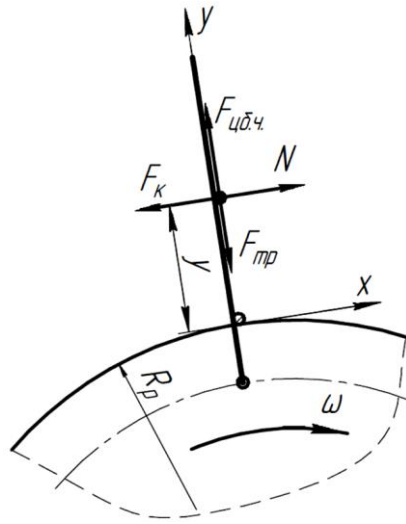


Рисунок 2.6 - Схема визначення відносної швидкості руху шматка матеріалу по поверхні молотка

При цьому Кориолісова сила визначається як:

$$F = 2m_c \omega \dot{y}, \quad (2.22)$$

де  $\dot{y}$  - швидкість руху шматка щодо робочої поверхні.

Рівняння (2.21) у проєкціях на рухомі координатні осі  $x$ ,  $y$  (рис. 2.8), пов'язані з площиною робочої грані молотка, при збереженні в першому наближенні залежності для сили тертя  $F_{тр} = fN$  та відсутності прискорення  $\ddot{y} = 0$  дає остаточне диференціальне рівняння відносного руху шматка подрібнювального матеріалу по поверхні

$$\ddot{y} + 2f\omega\dot{y} - \omega^2 y = 0. \quad (2.23)$$

Стандартна процедура інтегрування рівняння виду (2.23) призводить до загального рішення:

$$y = C_1 e^{\alpha(-f - \sqrt{f^2 + 1})} + C_2 e^{\alpha(-f + \sqrt{f^2 + 1})}. \quad (2.24)$$

Постійні  $C_1$  та  $C_2$  знаходимо з початкових умов руху:  $t=0$ ,  $y=R_p$ ,  $\dot{y} = 0$ .

Виходячи з цього, формула (2.24) виглядає так:

$$y = \operatorname{Re}^{-f\omega t} \left( ch(\omega t \sqrt{f^2 + 1}) + \frac{sh(\omega t \sqrt{f^2 + 1})f}{\sqrt{2ch(\ln(f))}f} \right). \quad (2.25)$$

Продиференціювавши вираз (2.25), отримаємо рівняння для визначення відносної швидкості руху шматка по поверхні молотка:

$$V' = R_p \omega e^{-f\omega t} \left( \begin{array}{l} sh(\omega t \sqrt{f^2 + 1})\sqrt{f^2 + 1} - fch(\omega t \sqrt{f^2 + 1}) + \\ + \frac{f(ch(\sqrt{f^2 + 1})\sqrt{f^2 + 1}) - fsh(\omega t \sqrt{f^2 + 1})}{\sqrt{2fch(\ln(f))}} \end{array} \right). \quad (2.26)$$

Обчислення з використанням залежності (2.26) є досить трудомісткими, тому, з урахуванням оцінного характеру розрахунків, визначаємо  $V'$  з отриманих залежностей при вирішенні лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку (2.23) з використанням інженерного математичного програмного забезпечення MathCAD, диференціального рівняння. Початкові та граничні умови для вирішення даного рівняння визначаються розмірами ротора та прив'язані до конкретного типорозміру дробарки.

У зв'язку з трудомісткістю визначення швидкості за формулою (2.26) було прийнято рішення апроксимувати залежність у вигляді логарифмічної функції:

$$v_{v5} \approx a \ln(x+b) + c, \quad (2.27)$$

де  $a, b, c$  - параметри логарифмічної функції, що залежать від технологічних параметрів дробарки та умов контакту шматка з молотками.

## 2.2.5 Кінематичний аналіз руху матеріалу до відбійного плиті та повернення в робочу зону молотків



Взаємодія зі шматками впливає на рух подрібненого матеріалу до відбійної плити (етап 1.3) та повернення матеріалу до робочої зони. (етап 1.4).

Показники цих процесів залежать від кута відхилення молотка  $\gamma_2$ , швидкості руху шматка  $v_{ч3}$  та місця розташування точки ударного контакту на етапі 1.2. Рух до відбійної плити характеризується його напрямом  $T_3$  та швидкістю шматка матеріалу після удару об відбійну плиту  $v_{ч3}$ . Параметри, що впливають на повернення сировини в робочу зону, залежать від швидкості руху шматка після удару об плиту  $v_{ч4}$  та її траєкторії  $T_4$ .

Основним завданням вивчення процесів на описаних вище етапах є визначення параметрів взаємного контакту шматка з молотками при проникненні робочу зону на етапі 1.5 (повторний контакт матеріалу з молотками).

Для цього необхідно визначити: положення сектора, в якому матеріал проникає при повторному ударному контакті з молотками; час досягнення шматка робочої зони ротора; кут відхилення молотка від радіального положення при повторній ударній контактній взаємодії зі шматками сировини; відстань вільного руху шматка у робочій зоні; швидкість шматків та молотків при взаємному відносному русі.

Умова контакту виконується, якщо шматок встигає подолати відстань до робочої зони під час повороту ротора. Інакше у взаємодію входить наступний ряд молотків ротора.

Кут контактної взаємодії залежить від кута нахилу молотка у процесі відновлення свого радіального положення після його відхилення на етапі 1.2 та кута нахилу траєкторії руху шматка щодо нормалі до кола, що обмежує робочу зону.

Для этого определяется время, за которое куски измельчаемого материала достигнут рабочей зоны молотков (сектор  $EF$ , рис. 2.9):,

$$t_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{v_{ч3}} + t_{\text{сод}} + \frac{L_{2-2}}{v_{ч4}}, \quad (2.28)$$

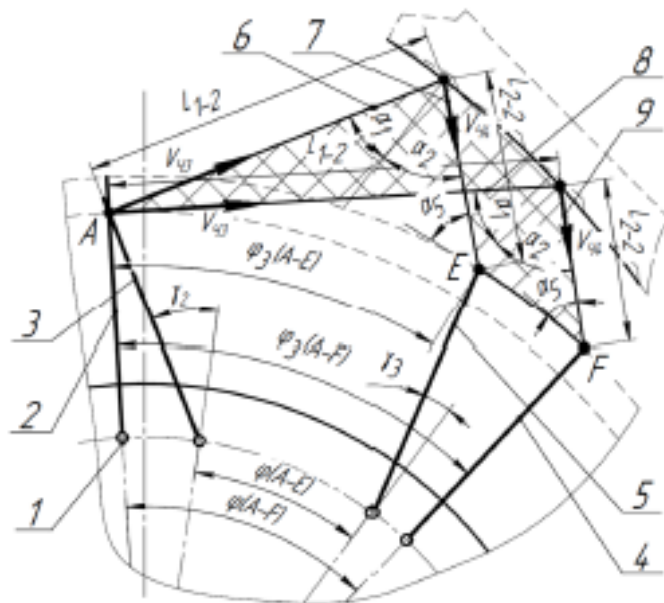
де  $L_{1-2}$  - відстань від центру зіткнення до точки контакту шматка з відбійною плитою;

$t_{\text{сод}}$  - час ударного контакту;

$L_{2-2}$  - відстань від точки контакту з відбійною плитою до робочої зони;

$v_{ч4}$  - швидкість шматка після зіткнення з відбійною плитою.

Для визначення основних параметрів процесу руху шматка матеріалу в робочій зоні дробарки на етапах 1.3 та 1.4 використовується графоаналітичний метод визначення переміщень та метод графіків [34] (рис. 2.6). На схемі показані граничні (характерні) положення шматка, ротора та молотка в момент контакту з шматком на етапі 1.2 та на етапі 1.5.



*1 - вісь підвісу; 2, 3 - положення молотка при зіткненні без та з найбільшим відхиленням; 4, 5 - положення молотка при повторному контакт із шматком; 6, 7 - вектори переміщення шматка матеріалу при найбільшому відхиленні молотка; 8, 9 - вектори*

Рисунок 2.7 - Розрахункова схема визначення характерних траєкторій руху шматків матеріалу на етапах 1.3 та 1.4 при значеннях кута  $\gamma_2$  в межах від  $0^\circ$  до  $30^\circ$

Для цього попередньо визначається швидкість руху шматка до відбійної плити після зіткнення з молотком, з використанням законів збереження кінетичної енергії та імпульсів тіл, що вступають у ударну взаємодію [20]:

$$\begin{cases} \frac{m_{\Sigma M} v_{M2}^2}{2} = \frac{m_{\Sigma M} v_{M3}^2}{2} + \frac{m_{\text{ч}} v_{\text{ч}3}^2}{2}, \\ m_{\Sigma M} v_{M2}^2 = m_{\Sigma M} v_{M3}^2 + m_{\text{ч}} v_{\text{ч}3}^2 \end{cases} \quad (2.29)$$

Рішення системи рівнянь збереження кінетичної енергії та імпульсів тіл (2.29) виглядатиме [20, 33]:

$$v_{\text{ч}3} = \frac{2m_{\Sigma M} v_{M2}}{m_{\Sigma M} + m_{\text{ч}}}. \quad (2.30)$$

З урахуванням коефіцієнта мас  $k_m$ , залежність швидкості  $v_{\text{ч}3}$  (2.30) набуде вигляду:

$$v_{\text{ч}3} = \frac{2k_m}{k_m + 1_{\text{ч}}} v_{M2}. \quad (2.31)$$

Відстань, що долаються шматком на етапі 1.3 і 1.4, визначаються за схемою (рис. 2.9) з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості при ударі [27]:

$$k_e = \frac{\text{tg } \alpha_1}{\text{tg } \alpha_2}, \quad (2.32)$$

де  $\alpha_1$  - кут між вектором лінійної швидкості руху шматка матеріалу та нормаллю до поверхні відбійної плити до ударного контакту;

$\alpha_2$  - кут між вектором швидкості руху шматка та нормаллю до поверхні відбійної плити після ударного контакту.

Потім визначається положення верхньої грані молотка щодо сектора проникнення шматка в робочу зону та кут його відхилення за час  $t_{1-2}$ , при цьому знаходиться час повернення молотка в радіальне положення після

відхилення в процесі удару, а також залежність кутів  $\gamma_2$  та  $\beta_2$  (рис. 2.7) і кут повороту точки  $B$  щодо осі обертання ротора за час  $t_{1-2}$ .

Для визначення часу повернення розглянемо систему у процесі її руху. Чинні сили (рис. 2.7):

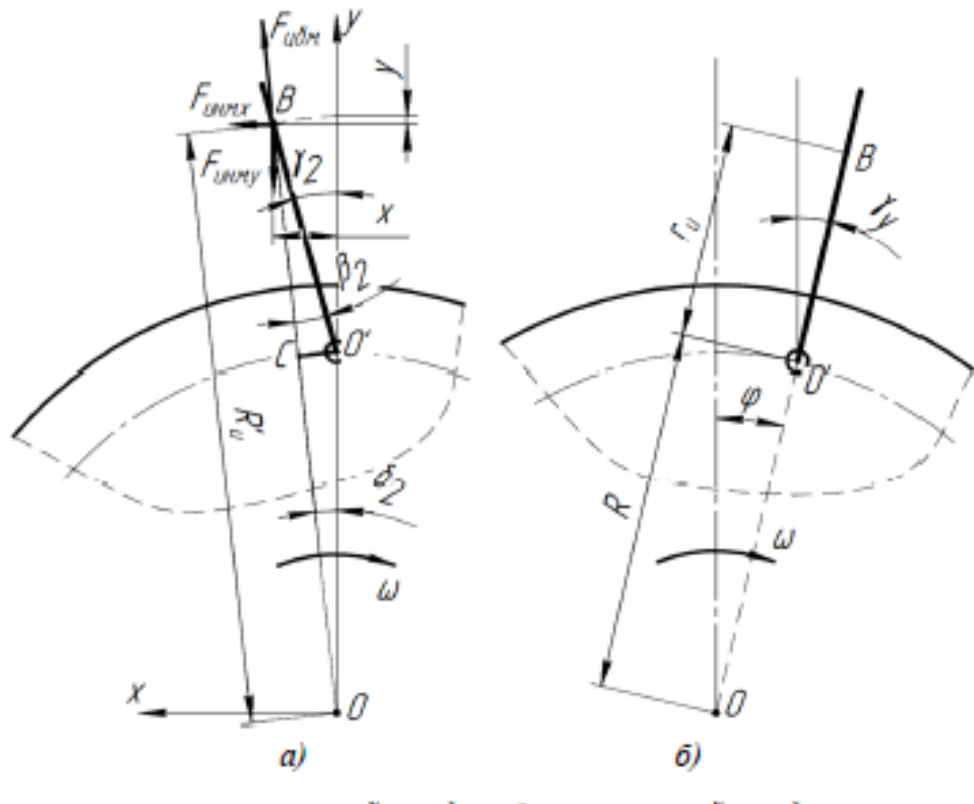
– відцентрова сила (при малих значеннях кута відхилення молотка

$\gamma_2 - R'_u \approx R + r_u$ ):

$$\bar{F}_{цб.м} = m_{\Sigma M} \omega^2 (R + r_u); \quad (2.33)$$

- інерції:

$$\bar{F}_{ін.м} = m_{\Sigma M} \bar{a} \quad (2.34)$$



*а - у початковій стадії, б - у кінцевій стадії*

Рисунок 2.78 - Розрахункова схема визначення часу повернення молотка у радіальне становище:

Проектуємо силу інерції на осі  $x$  та  $y$ :

$$\bar{F}_{in.m} = m_{\Sigma m} \ddot{x}, \quad \bar{F}_{in.m.y} = m_{\Sigma m} \ddot{y}. \quad (2.35)$$

Оскільки  $y$  - величина на кілька порядків менше, ніж  $x$ , то нею можна знехтувати.

Відповідно до принципу Д'аламбера [29] розглянемо молоток як тіло, що знаходиться в рівновазі:

$$M_{O'} = F_{in.m.x} r_u \cos \gamma_2 + F_{ub.m} O'C. \quad (2.36)$$

Оскільки кут  $\gamma_2$  передбачається малим, можна прийняти, що  $\ddot{x} = r_u \ddot{\gamma}_2$ ,  $\cos \gamma_2 \approx 1$ ,  $\sin \gamma_2 \approx \gamma_2$ , а плече  $O'C$  визначається з трикутника  $BO'C$  (рис. 2.10):

$$O'C = r_u \sin \beta_2, \quad (2.37)$$

де  $\beta_2$  - кут повороту ротора за час удару.

Відповідно до теореми синусів [119]:

$$\begin{cases} r_u = \sqrt{R_u'^2 + R^2 - 2R_u' R \cos \beta_2}, \\ r_u \cos \gamma_2 = R_u' \cos \beta_2. \end{cases} \quad (2.38)$$

Залежно від зміни кута  $\gamma_2$  у процесі удару також змінюється кут між віссю симетрії ударних елементів та радіусом точки ударного контакту щодо осі обертання ротора, який визначається як [29]:

$$\beta_2 = \arcsin \left( \arcsin \left( \frac{R \sin \gamma_2}{R'} \right) \right) \approx \frac{R \gamma_2}{R + r_u}. \quad (2.39)$$

Підставивши отримані залежності (2.33), (2.35), (2.37), (2.39) формулу (2.36), рівняння вільних коливань молотка приймає наступний вид:

$$m_{\Sigma m} r_u^2 \ddot{\gamma}_2 + m_{\Sigma m} \omega^2 (R + r_u) r_u \frac{R \gamma_2}{R + r_u} = 0 \Rightarrow \ddot{\gamma}_2 + \frac{\omega^2 R}{r_u} \gamma_2 = 0. \quad (2.40)$$

У цьому кутова швидкість обертання ударного елемента (його частота вимушених коливань) щодо осі підвісу на роторі дробарки:

$$\omega_m = \omega \sqrt{\frac{R}{r_u}}. \quad (2.41)$$

У цьому випадку час повернення молотка в радіальне положення після зіткнення з молотками:

$$t_e = \frac{\gamma_2}{\omega} \sqrt{\frac{r_u}{R}}. \quad (2.42)$$

Для аналітичного порівняння залежності (2.40) за допомогою інженерного математичного програмного забезпечення MathCAD отримано рішення лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку (2.13), під час вирішення завдання Коші - однорідного диференціального рівняння з початковими умовами (2.16).

Для визначення кута відхилення молотка при повторному контакті при якому відбувається взаємодія шматка з ударною поверхнею на етапі 1.5, проаналізуємо рух системи ротор-молоток щодо осі обертання ротора в полярних координатах  $(R, \varphi)$  (рис. 2.11) [33]:

З системи рівнянь (2.38) визначаємо залежність кута повороту ротора за час удару  $\varphi_2$  від кута  $\gamma_2$  на етапі 1.2 (рис. 2.9):

$$\varphi_2 = \arccos \left[ \frac{R(1 - \cos^2 \gamma_2) + \frac{\sqrt{2}}{R'} \cos \gamma_2 \sqrt{2R'^2 - R^2(1 - \cos 2\gamma_2)}}{R'} \right]. \quad (2.43)$$

З урахуванням кута  $\beta_2$ :

$$\varphi_2 \approx \beta_2 \frac{r}{R} \approx \frac{r\gamma_2}{R+r}. \quad (2.44)$$

Як видно із схеми (рис. 2.8), за час переміщення зовнішньої грані молотка з точки  $H$  в точку  $G$  він повертається на кут  $\varphi_3$  цьому змінюється

його нахил  $\gamma_2$  і, відповідно, кут  $\varphi_2$ . Виходячи з цього, залежність кута повороту ударної грані молотка набуде вигляду:

$$\varphi_3 \approx \varphi + \varphi_2 - (\varphi_2 - \Delta\varphi_2). \quad (2.45)$$

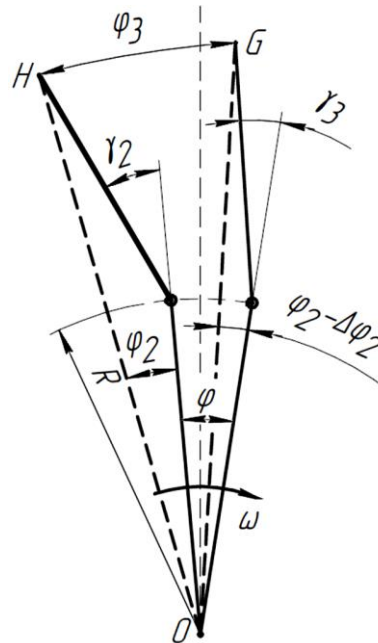


Рисунок 2.9 - Розрахункова схема визначення залежностей відносного руху системи ротор-молоток у полярних координатах

Підставивши (2.39) та (2.44) у формулу (2.45) з урахуванням того, що  $\varphi = \omega t$ , кут нахилу молотка при повороті зовнішнього ребра його ударної грані на певний кут визначиться як:

$$\gamma_3 = \gamma_2 - \frac{\varphi_3(R+r)}{R+r \left(1 + \sqrt{\frac{R}{r_u}}\right) \sqrt{\frac{r_u}{R}}}. \quad (2.46)$$

Формула (2.46) справедлива для умов, коли  $t_6 \geq t_{1-2}$ ; у випадку, якщо  $t_6 \leq t_{1-2}$ , молоток повертається у своє радіальне положення та кут  $\gamma_3 = 0$ .

Кут повороту  $\varphi_3$ , за який молоток відновлює своє радіальне положення, знаходиться за формулою:

$$\varphi_3' = \frac{\gamma_2 \left[ R + r \left( 1 + \sqrt{\frac{R}{r_u}} \right) \right] \sqrt{\frac{r_u}{R}}}{R + r}. \quad (2.47)$$

З урахуванням виразу (2.41), формула визначення кутової швидкості обертання точки  $H$  по зовнішньому радіусу робочої грані виглядатиме:

$$\omega_c = \omega \left( 1 + \sqrt{\frac{R}{r_u}} \right). \quad (2.48)$$

Час, необхідний для досягнення робочої грані молотка сектора зіткнення зі шматком:

$$t_{\varphi_3} = \frac{\varphi}{\omega_c} + \frac{\varphi_3 - \varphi_3'}{\omega}. \quad (2.49)$$

Використовуючи залежності (2.47) та (2.48), вираз (2.49) виглядає як:

$$t_{\varphi_3} = \frac{(R+r)\varphi_3 - r\gamma_2}{(R+r)\omega} - \frac{Rr_u\gamma_2 \left( \sqrt{\frac{R}{r_2}} - 1 \right)}{\omega(R-r_2)(R+r)}. \quad (2.50)$$

Залежність (2.50) ілюструє, що тільки при відносно малих кутах  $\varphi_3$  слід враховувати кут нахилу молотка при відновленні радіального положення  $\gamma_3$ , оскільки час його повернення при значенні кута відхилення молотка  $\gamma_3=0,5$  рад -  $t_{\varphi_3}=4,58 \cdot 10^{-3}$  с, тобто молоток встигає повернутися в радіальне положення до повторної взаємодії зі шматком. Тоді формула для визначення часу руху молотка до точки контакту зі шматком:

$$t_{\varphi} = \frac{\varphi}{\omega}, \quad (2.51)$$

де  $\varphi$  - кут повороту ротора за час  $t_{1-2}$  (рис. 2.9).



На графіках показано залежності швидкості руху шматка після зіткнення з молотками (рис. 2.9 а) та результати графоаналітичного аналізу параметрів кінематики молотка та шматка на етапах руху до відбійної плити: відстань при русі на етапі 1.3 (рис. 2.9 б); відстань від відбійної плити до робочої зони молотків (рис. 2.9); кут повороту ротора до точки контакту молотків із шматком у секторі EF (рис. 2.9 г).

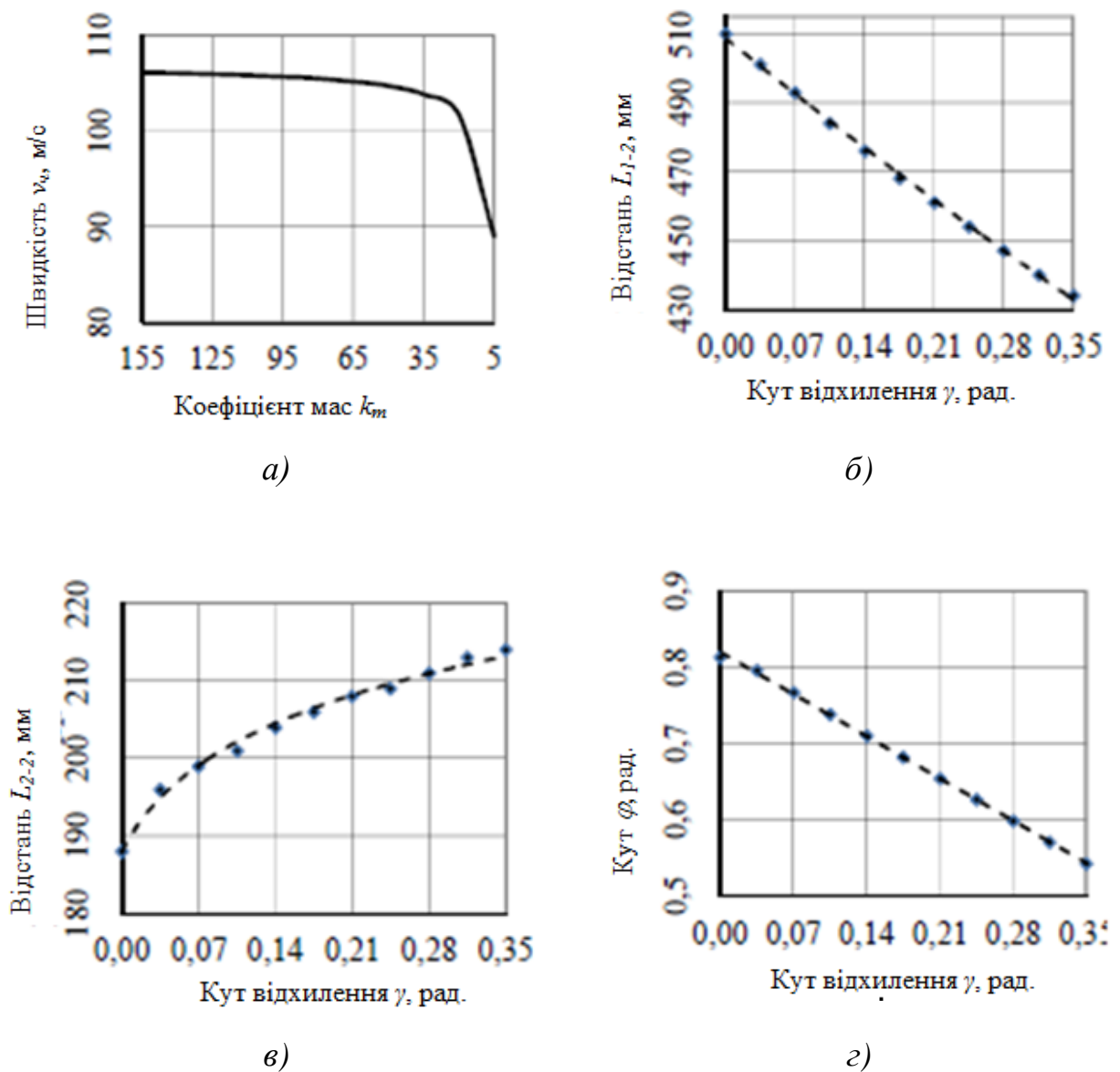


Рисунок 2.10 - Графіки теоретичних залежностей параметрів кінематики шматка матеріалу на етапах 1.3 та 1.4

Швидкість руху шматка матеріалу після зіткнення з молотками до повторного проникнення в робочу зону ротора визначається за формулою [18]:

$$v_{44} + k_6 v_{43}. \quad (2.52)$$

Час ударної контактної взаємодії на практиці становить  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с [17, 26], що мінімум на два порядки менше часу руху шматка в робочому просторі, тому цієї складової можна знехтувати.

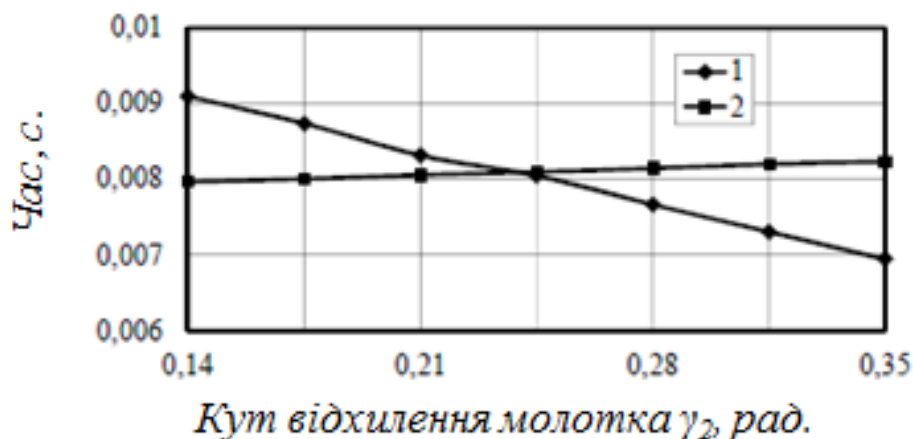
Тоді формула визначення часу руху на етапах взаємодії з молотком  $t_{1-2}$ :

$$t_{1-2} = \frac{k_6 L_{1-2} + L_{2-2}}{k_6 v_{43}}. \quad (2.53)$$

Для оцінки умови взаємного контакту шматків та молотка порівнюємо два показники:  $t_{1-2}$  та  $t_\varphi$  (рис. 2.10). У випадку, коли час повороту ротора менший за час руху шматка, контакт здійснить наступний ряд молотків:

$$t_\varphi \leq t_{1-2} \quad (2.54)$$

У цих умовах у взаємодію зі шматками після співударяння з відбійною плитою входить наступний ряд молотків.



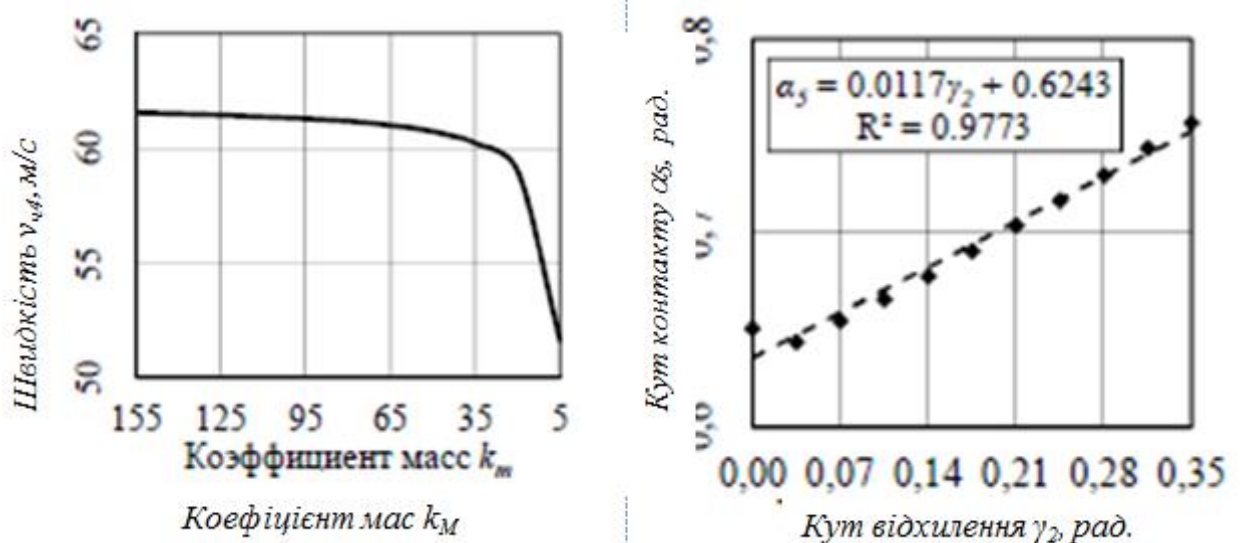
1 - час, необхідний для проникнення молотка в повторну зону контакту з молотком  $t_{\varphi 3}$ ;

2 - час руху шматка  $t_{1-2}$

Рисунок 2.11 - Графік теоретичної залежності часу проникнення шматка та молотка в сектор взаємного контакту

З залежності а і б на графіках (рис. 2.14) видно, що при певних значеннях кута відхилення молотка на етапі 1.2 та частина матеріал, який не встигає подолати відстань до зони проникнення за час  $t_{1-2}$ , продовжує рух і її “наздоганяє” наступний ряд. Потім відбувається контакт, і шматок починає ковзати молотком у радіальному напрямку.

Швидкість руху матеріалу при вході в робочу зону та кут нахилу вектора його швидкості щодо робочої грані молотка, що визначаються із схеми (рис. 2.9), відображені на графіках (рис. 2.11).



а

б

а - графік відносної швидкості молотка та шматка;  
 б - кут між векторами швидкостей частинки та молотка

Рисунок 2.12 - Графіки теоретичних залежностей швидкості та кута нахилу при проникненні шматка у робочу зону молотків на етапі 1.5

Проаналізувавши рух на етапах 1.2–1.4, передбачається, що взаємодію шматка та молотків на етапі 1.5 необхідно розділити на дві складові: проникнення шматків матеріалу в робочу зону "свого" ряду молотків та контакт із наступним, залежно від умов (2.54).

## 2.2.6 Аналіз умов ударного контакту молотків із матеріалом.

Порівняльний аналіз умов ударного контакту молотків із матеріалом розглянуто кінцево-елементним методом.

Поставлені завдання вирішуються шляхом зіставлення значень кута відхилення, отриманих за відомими методиками, з результатами моделювання процесу зіткнення з використанням програмного комплексу ANSYS [30].

Для порівняльного аналізу використовуємо відомі методики:

– Гернета М. М., в основу якої лягло визначення роботи молотка в його

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{D_1 (v_m - v'_m)^2}{4v'_m (D_1 - R)} \right), \quad (2.55)$$

де  $v_m$  - швидкість молотка до удару;

$v'_m$  - швидкість молотка після удару;

$D_1$  - діаметр кола, в зоні якого відбувається зіткнення;

$R$  - радіус кола осей підвісу молотка.

- Сидашенко А. І. [24], отриману на підставі закону збереження моментів кількості руху до та після ударного контакту робочого органу зі шматком:

$$\gamma = \frac{R + l - a}{(l - a) \left( 1 + \frac{m_m (1 - a)^2 - a^2}{m_u (1 - a)^2} \right) \sqrt{\frac{3(R + r)^2}{(l - a)^2 - a^2}}}. \quad (2.56)$$

- математична модель, отримана на підставі статичного закону Герца та законів збереження імпульсу та кінетичної енергії, обґрунтована у роботі [25]:

$$\gamma_2 = \left( 1 + \frac{R}{r - c} \right) \frac{4r_u}{(k_m + 1) \sqrt{(r - c)(R + r - c)}}. \quad (2.57)$$

При розробці технічного рішення, спрямованого на визначення параметрів динаміки молотка при зіткненні з кінцевим матеріалом методом, припускаємо, що відбувається одиночний пружний центральний удар молотка. Силами важкості та тертя у шарнірах нехтували.

На першому етапі побудована тривимірна модель ротора дробарки масштабі 1:1, що складається з валу, двох дисків та шарнірно підвішеного молотка, встановленого на осі підвісу ротора (рис. 1.11).

При розробці технічного рішення, спрямованого визначення параметрів кінематики молотка і шматка матеріалу при взаємному контактному зіткненні на етапі 1.2 (у момент його проникнення в робочу зону ротора дробарки після вивантаження з вібротрубоконвеєра) кінцевим методом, робиться припущення, що відбувається одиночний центральний удар молотка по шматку. У реальних умовах частина енергії переходить на деформацію матеріалу, але визначення кінематики молотка передбачається пружний центральний удар. В даному випадку максимальна різниця лінійних швидкостей молотка в будь-якій точці до і після удару характеризує кут відхилення осі біла при зіткненні зі шматком.

Основним завданням експерименту є моделювання руху системи «ротор-молоток-шматок матеріалу». Прийнято такі параметри системи: кутова швидкість обертання ротора –  $78,54 \text{ с}^{-1}$ ; діаметр підвісу молотків – 0,43 м; радіус зовнішньої грані молотка – 0,295 м; відстань вільного руху шматка в робочій зоні – 0,02 м; маса молотка – 15,06 кг; радіус центру мас молотка – 0,168 м; діаметр шматка – 0,04–0,08 м; щільність матеріалу подрібнювального шматка –  $2700 \text{ кг/м}^3$ .

При моделюванні задавалася кутова швидкість обертання молотка, що відповідає кутовій швидкості обертання ротора, при цьому шматок знаходився нерухомо в центрі удару. Силами тертя у шарнірах та тяжкості нехтували.

Отримана модель призначена для приблизної оцінки параметрів ударної взаємодії шматка матеріалу та молотка, а також для орієнтовного визначення кута відхилення молотка при взаємний контакт.

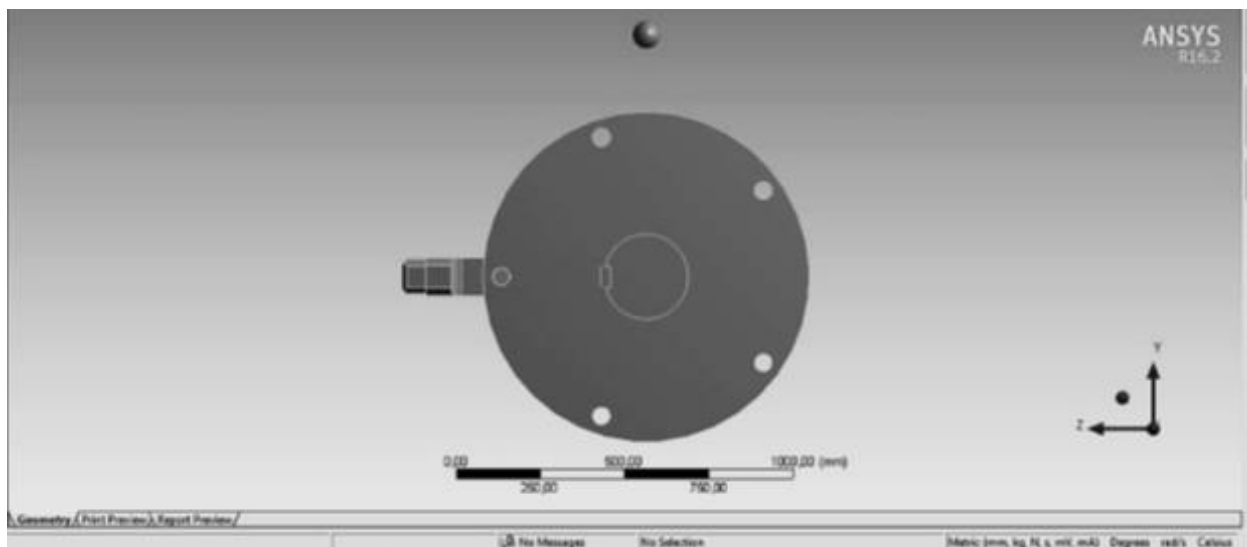


Рисунок 2.13 - Тривимірна модель ротора молоткової дробарки

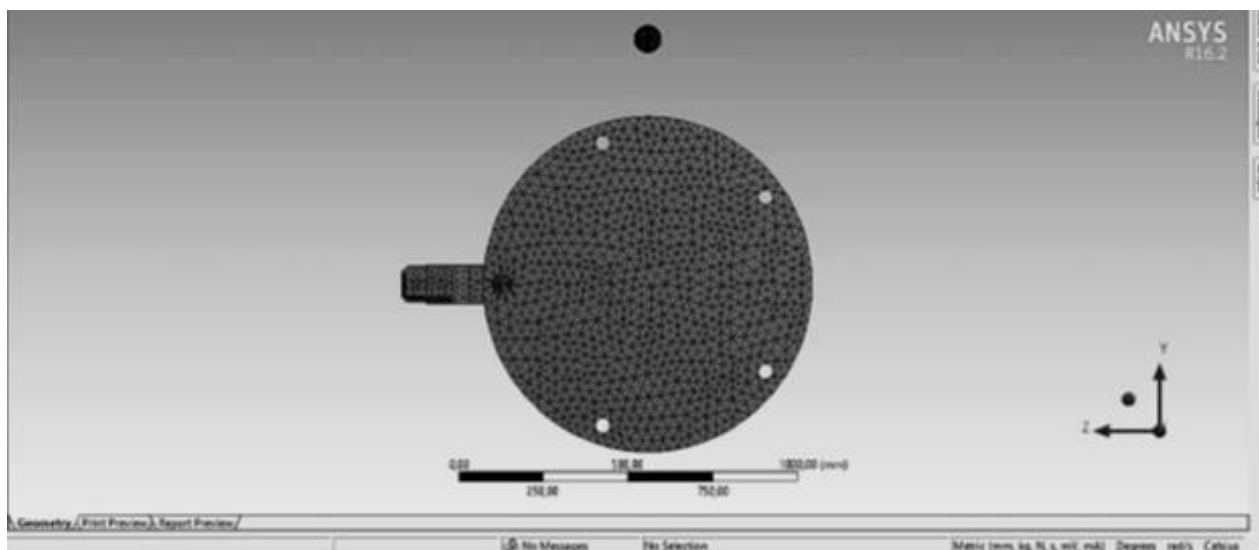


Рисунок 2.14 - Розрахункова сітка

Для визначення кута відхилення молотка були отримані результати лінійного переміщення вузлових точок на роторі та на зовнішній грані

молотка за відповідними радіусами (рис. 2.15 та рис. 2.16). Так як точка на роторі переміщається фактично без прискорення (маса дисків ротора на кілька порядків більше маси шматка, а отже, вплив на характеристики руху дисків буде незначним), то, застосувавши теорію подібності [22], кут відхилення точки на зовнішній грані щодо осі обертання ротора приблизно визначається за формулою:

$$\varphi_E \approx \arcsin\left(\frac{S_{\max} - k_s S_{\min}}{R + r}\right), \quad (2.58)$$

де  $S_{\max}$  - відстань, пройдена точкою на зовнішній грані молотка;

$k_s$  - відношення радіусів вузлових точок на зовнішній грані молотка та ротор від центру обертання ротора;

$S_{\min}$  - відстань, пройдена точкою на роторі.

Використовуючи формулу (2.39), вираз для визначення кута відхилення молотка щодо осі підвісу набуває вигляду:

$$\gamma_E \approx \varphi_E \frac{R + r_u}{R}. \quad (2.59)$$

Вибравши максимальне значення кута з отриманих у процесі моделювання зіткнень шматка і молотка, і підставивши у формулу (2.39) методом кінцевих елементів отримуємо значення кута відхилення молотка.

З аналізу значень переміщень вузлових точок системи "ротор-молоток-шматок матеріалу" видно, що після удару лінійна швидкість молотка падає - змінюється кут нахилу кривої, що відображає залежність переміщення вузлової точки на молотку, а швидкість точки на валу залишається постійною.

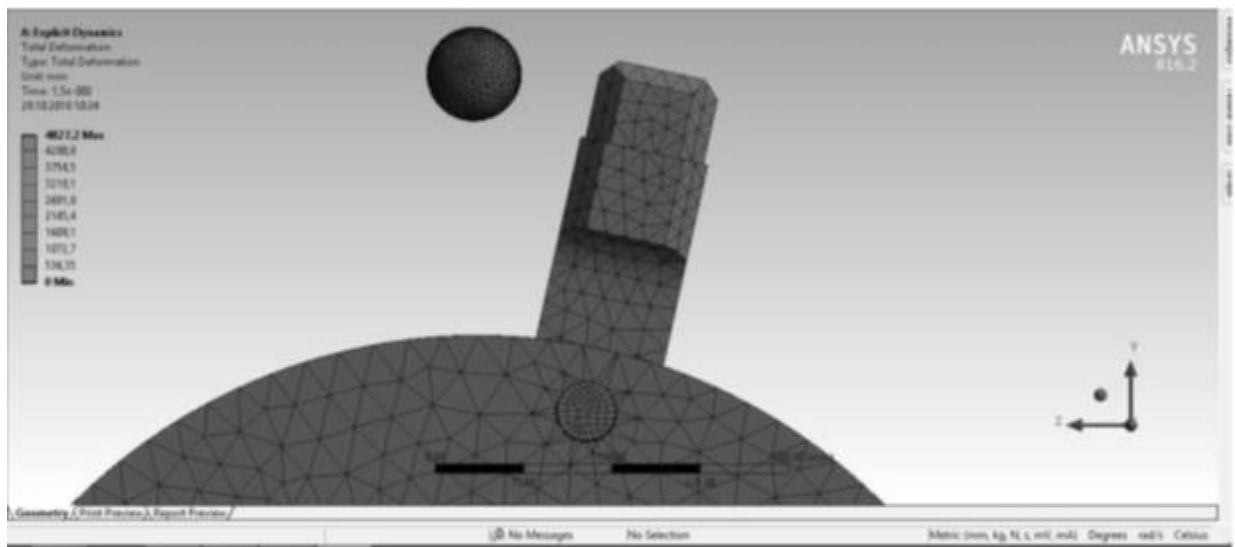


Рисунок 2.15 - Положення молотка та шматка матеріалу після ударного контакту

В цьому випадку кут відхилення молотка визначається із співвідношення швидкості руху точки на верхній грані молотка після зіткнення або різниці відстаней, пройдених вузловою точкою молотка і точкою на зовнішньому радіусі валу (рис. 2.17) до відстані від них до центру обертання ротора.

Tabular Data				Tabular Data				Tabular Data			
Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]		Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]		Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	
1	1,1755e-038	0	0	1	1,1755e-038	0	0	1	1,1755e-038	0	0
2	1,5001e-003	167,65	321,93	2	1,5001e-003	167,65	321,93	2	1,5001e-003	167,65	321,93
3	3,e-003	325,84	629,88	3	3,e-003	325,84	629,88	3	3,e-003	325,84	629,88
4	4,5e-003	467,54	907,55	4	4,5e-003	467,54	907,55	4	4,5e-003	467,54	907,55
5	5,e-003	535,43	1140,5	5	5,e-003	535,43	1140,5	5	5,e-003	535,43	1140,5
6	7,5001e-003	673,86	1316	6	7,5001e-003	673,86	1316	6	7,5001e-003	673,86	1316
7	9,0001e-003	728,44	1423,9	7	9,0001e-003	728,44	1423,9	7	9,0001e-003	728,44	1423,9
8	1,05e-002	746,88	1459,3	8	1,05e-002	746,88	1459,3	8	1,05e-002	746,88	1459,3
9	1,2e-002	738,08	1421	9	1,2e-002	738,08	1421	9	1,2e-002	738,08	1421
10	1,35e-002	672,13	1311,9	10	1,35e-002	672,13	1311,9	10	1,35e-002	672,13	1311,9
11	1,5e-002	581,91	1137,7	11	1,5e-002	581,91	1137,7	11	1,5e-002	581,91	1137,7
12	1,65e-002	461,79	910,83	12	1,65e-002	460,45	919,9	12	1,65e-002	456,77	957,78
13	1,8e-002	318,21	638,1	13	1,8e-002	314,06	659,03	13	1,8e-002	307,96	695,18
14	1,95e-002	159,85	330,75	14	1,95e-002	155,29	354,56	14	1,95e-002	147,77	393,22
15	2,1e-002	3,743	6,6932	15	2,1e-002	3,2081	18,309	15	2,1e-002	1,4395	51,619
16	2,25e-002	170,14	332,87	16	2,25e-002	169,45	338,62	16	2,25e-002	160,11	319,35
17	2,4e-002	326,42	647,9	17	2,4e-002	322,48	656,51	17	2,4e-002	315,5	671,44
18	2,55e-002	467,3	925,95	18	2,55e-002	462,08	939,99	18	2,55e-002	453,34	965,09
19	2,7e-002	585,53	1153,2	19	2,7e-002	581,3	1164,6	19	2,7e-002	574	1184,5
20	2,85e-002	674,56	1321,3	20	2,85e-002	672,43	1325,6	20	2,85e-002	658,1	1334,1
21	3,e-002	729,42	1424,7	21	3,e-002	720,89	1423,3	21	3,e-002	727,49	1421,6

*a* - зіткненні з шматком матеріалу діаметром  $d = ,04$  м;  
*б* - при зіткненні з шматком діаметром  $d = ,06$  м;  
*в* - при зіткненні зі шматком діаметром  $d = 0,08$  м

Рисунок 2.17 - Результати визначення переміщень



Як порівняльний аналіз у таблиці 2.1 наведено порівняльні максимальні значення кутів відхилення молотка при однакових умовах, визначені за формулою (2.19) та з результатів моделювання залежно 2.59. Звідси видно, що максимальні значення кутів, отримані при зіткненні за цими методиками, мають значення одного порядку.

Таблиця 2.1 - Значення кутів відхилення молотка при зіткненні зі шматком матеріалу різного діаметра

Діаметр шматка	Значення кута відхилення молотка, рад.		Похибка розрахунку, %
	звичайно-елементним методом	за залежністю (2.19)	
0,04	0,04	0,03	18,1
0,06	0,1	0,89	13,1
0,08	0,21	0,2	6,4

За результатами досліджень отримано результати визначення значень кутів відхилення з використанням аналітичних залежностей (2.55)–(2.57) та їх відповідності аналогічним параметрам при моделюванні кінцево-елементним методом у програмному комплексі ANSYS, подані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Значення кута відхилення молотка при ударній взаємодії з матеріалом

№ п/п	Діаметр шматка матеріалу, м	Результати моделювання, рад.	За формулою Гернета М. М., рад.	Відносна похибка, %	Залежно Сидашенко О. І., рад.	Відносна похибка, %	За запропонованою методиці, рад.	Відносна похибка, %
1	0,04	0,037	0,039	7	0,003	64	0,027	20
2	0,06	0,099	0,125	25	0,012	74	0,086	16
3	0,-8	0,0212	0,277	30	0,027	80	0198	8

З аналізу отриманих результатів випливає, що математична модель (2.55) не підходить для умов контакту ударного елемента та сировини в молотковій дробарці, а найбільш достовірно описує цей процес при дробленні матеріалу вільним ударом закономірність (2.57). При значеннях кута відхилення від 0,05 до 0,2 рад ступінь відповідності даної залежності результатам моделювання процесу зіткнення кінцево-елементним методом становить 87,5%. При цьому виявлено, що крупність матеріалу суттєво впливає на показники кінематики молотка – збільшення фракції з 0,06 м до 0,08 м підвищує кут відхилення у 2,1 рази.

### 2.3 Обґрунтування основних критеріїв, що впливають на ступінь подрібнення

Одним із основних показників ефективності роботи дробарки є ступінь подрібнення:

$$i = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}, \quad (2.60)$$

де  $d_{cp}$  - середній діаметр частинок подрібнювального матеріалу після дроблення вільним ударом.

Для визначення впливу коефіцієнта мас на ступінь подрібнення матеріалу скористаємося одним із законів дроблення. Для молоткових роторних дробарок ударної дії зі ступенем подрібнення в межах 5-25 процес диспергування найбільш достовірно можна описати за допомогою другого закону подрібнення - закону Бонда [17, 20], згідно з яким необхідна елементарна робота, витрачена на деформацію, пропорційна збільшенню середньо геометричного між об'ємом та знову утвореною поверхнею. Перетворивши вираз (1.4), отримаємо залежність для визначення зміни середнього діаметра шматків матеріалу:

$$\Delta D_{cp} = (k_B^{-1} A)^{\frac{2}{5}}. \quad (2.61)$$

Ступінь подрібнення визначиться за формулою:

$$i = (k_B^{-1} A)^{\frac{2}{5}} D_{cp}^{-1} + 1 . \quad (2.62)$$

Сумарна робота, спрямована на дроблення, визначиться як:

$$A_{\Sigma} = A_2 + A_3, \quad (2.63)$$

де  $A_2$  - робота при зіткненні з молотками на етапі 2;

$A_3$  - робота при зіткненні з відбійною плитою на етапі 4.

Робота сили удару на етапі 2:

$$A_2 = F_{y\partial} \Delta l_2, \quad (2.64)$$

де  $F_{y\partial}$  - сила удару;

$\Delta l_2$  - деформація шматка матеріалу під час удару молотками.

Силу удару визначимо залежно від [19]:

$$F_{y\partial} = m_{\Sigma m} \frac{\Delta v_m}{\Delta t}, \quad (2.65)$$

де  $\Delta v_m$  – різниця швидкостей молотка до и після удару;

$\Delta t$  - час удару.

При зіткненні з шматком матеріалу молотки відхиляються від радіального положення на кут  $\gamma_2$ , а ротор повертається на певний кут  $\varphi_2$ , звідси час взаємодії молотка з матеріалом визначається як:

$$\Delta t = \frac{\varphi_2}{\omega}. \quad (2.66)$$

Деформацію шматка матеріалу при ударному контакті у процесі дроблення визначимо з рівності потенційної енергії деформації і різниці кінетичної енергії руху молотків до і після зіткнення молотків і подрібнювального шматка:

$$\frac{m_{\Sigma v} \Delta v_v^2}{2} = F_{np} \Delta l_2. \quad (2.67)$$

При цьому робиться припущення, що подрібнений матеріал підпорядковується

Закону Гука для малих деформацій [23] і шматок має форму правильного циліндра з довжиною, що дорівнює діаметру. Тоді на підставі цього:

$$F_{np} = E_{\text{ч}} S \frac{\Delta l_2}{l}, \quad (2.68)$$

де  $E_{\text{ч}}$  - модуль пружності подрібнювального матеріалу;  
 $S$  - площа найбільшого поперечного перерізу шматка;  
 $l$  - довжина (діаметр) шматка.

Тоді з урахуванням виразів (2.67) та (2.68):

$$\Delta l_2 = v_{m2} \sqrt{\frac{2m_{\Sigma M}}{\pi d E_{\text{ч}}}}. \quad (2.69)$$

Використовуючи залежності (2.20), (2.62)–(2.69), робота деформації шматка матеріалу молотками:

$$A_2 = \frac{\sqrt{2} \omega^3 m_{\Sigma M} (r-c)(R+r)(R+r-c) \sqrt{\frac{(r-c)(R+r-c)m_{\Sigma M}}{r_i^2 E_{\text{ч}} c_p}}}{2\sqrt{\pi r}}. \quad (2.70)$$

Тоді ступінь подрібнення матеріалу при зіткненні молотків з шматком матеріалу на етапі 1.2 можна визначити за наступною аналітичною залежністю:

$$i = \frac{0,7k_e}{D} \left( \omega^3 m_m \left(1 - \frac{c}{l}\right) (R+l)(R+l-c) r_u \sqrt{\frac{(l-c)(R+l-c)m_m}{E_{\text{ч}} D_{cp}}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (2.71)$$

де  $k_e$  - експериментальний коефіцієнт.

Деформацію шматка при ударі об відбійну плиту визначаємо по формулою, отриманою Кочетковим А.В. [115]:

$$\Delta l_3 = d_2 v_{\text{ч}3} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{2E_{\text{ч}}}}, \quad (2.72)$$

де  $d_2$  - діаметр шматка після першої стадії дроблення матеріалу на етапі 1.2;  
 $\rho_{\text{ч}}$  - щільність подрібнювального матеріалу.

З результатів, отриманих під час математичного моделювання процесу дроблення в молотковій дробарці ДМР 14,5×13, виявлено, що деформація на етапі 1.2 (залежно від умов зіткнення) становить  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  м, а на етапі 1.4 при ударі об відбійну плиту  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  м, що на два порядки менше. Отже, роботу деформації на цьому етапі при розрахунках можна не враховувати. Тоді ступінь подрібнення при дробленні матеріалу у безрешітних молоткових дробарках визначаємо за формулою (2.71).

З аналізу даної закономірності видно, що в умовах процесу диспергування матеріалів у молотковій дробарці зі збільшенням маси ударних елементів ступінь подрібнення ударом зростає по статичній закономірності.

#### 2.4 Обґрунтування закономірності процесу зношування молотків

У процесі роботи молотки дробарки піддаються зносу, викликаного контактною взаємодією зі шматками на різних стадіях диспергування матеріалу.

Аналізуючи параметри кінематики руху та умов контакту при взаємодії шматків з молотками розглянемо механізми зношування поверхні у двокомпонентному середовищі: ударний (ерозійний) [12, 13, 24] та абразивний при втомному зношуванні при мало циклових навантаженнях [15].

При ерозійному зносі шматка матеріалу ударяються об поверхню, де відбувається зняття металу. При зносі стиранням (абразивне знос) тверді шматки рухаються вздовж поверхні, притискаються до неї під дією сил тертя або Коріоліса і зношують її.

Процес дроблення пов'язаний з ударами окремих шматків об поверхню молотка та відносним рухом (ковзанням) шматків по його ударній поверхні. У зв'язку з тим, що твердість, зносостійкість, пружні характеристики і напруги, при яких відбувається руйнування, та інші характеристики шматків

значно нижчі за аналогічні характеристики молотка, то припускаємо, що його зношування пов'язане зі втомленим руйнуванням поверхневого шару від ударного впливу шматка з подальшим його стиранням за рахунок відносного ковзання матеріалу.

Визначення напруги, що виникають при взаємному контакті матеріалу з поверхнею молотка, з урахуванням тертя, зносу та руйнування є складною математичною проблемою. Опис даних процесів є окремою проблемою, яка не входить до мети дослідження. Тому для вирішення поставлених завдань знаходження параметрів взаємного контакту тіл використовуємо положення прикладної теорії удару, роблячи припущення, що дозволяють побудувати модель, за допомогою якої вдасться отримати як якісні, так і кількісні оцінки.

Процес зношування робочої ударної поверхні молотка дробарки може бути поділений на три етапи [20]. Перша - зношування ділянки бічної поверхні 1–2 в результаті удару об подрібнюваний матеріал; друга - стирання усієї бічної поверхні 1–3 при тривалому ковзанні по ній при повторному проникненні шматка матеріалу в робочу зону молотків (ротора) після зіткнення з відбійною плитою за умови (2.54); третя - ерозійне зношування ділянки бічної поверхні 1-2 в результаті удару молотка об шматок в процесі повторного контакту на етапі 1.5 (рис. 2.18).

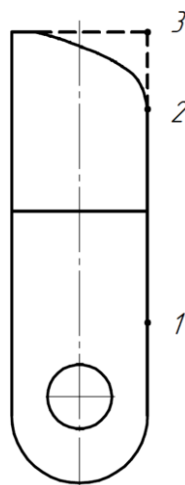


Рисунок 2.18 - Схема визначення зносу молотка

Сумарний об'ємний знос ударного елемента у загальному вигляді визначається як:

$$V_{\Sigma} = V_{y2} + V_{u5} + V_{y5}, \quad (2.73)$$

де  $V_{y2}$  - обсяг зношеної частини молотка при зіткненні зі шматком на етапі 1.2;

$V_{i5}$  - обсяг зношеної частини молотка при ковзанні шматка поверхнею на етапі 1.5;

$V_{y5}$  - обсяг зношеної частини молотка при зіткненні шматка з молотком на етапі 1.5.

В даному випадку процес зношування розглядається в початковій стадії експлуатації молотка, коли на робочій поверхні бойка зношування незначне і кут контакту в початковій стадії удару умовно дорівнює  $90^{\circ}$ .

На етапах 1.2 і 1.5 шматки матеріалу можна як макротіло, що складається з окремих абразивних мікрочастинок, що утворюються в процесі подрібнення. Тоді зношування молотка при ударному контакті моделюється як ерозійне зношування, а обсяг зношеної частини молотка визначається залежно, заснованої на формулі I. Finnie (для кутів атаки менше  $18,5^{\circ}$ ) [10]:

$$V_{yi} = \frac{v_{нш}^2}{24k_{\sigma}\sigma_{\text{м}}} \cos^2(90 - \lambda_i) \Rightarrow \frac{v_{yi}^2}{24k_{\sigma}\sigma_{\text{м}}} \sin^2 \lambda_i, \quad (2.74)$$

де  $V_{yi}$  - обсяг зношеного матеріалу, що припадає на 1 кг абразиву;

$\sigma_{\text{м}}$  - теоретичне значення межі міцності матеріалу молотка, що визначається за формулою [127, 128]:

$$\sigma_{\text{м}} = \frac{10}{2} HB, \quad (2.75)$$

де  $HB$  - твердість за Брінеллем;

$k_{\sigma}$  - виправлення межі міцності матеріалу молотка при ударі (визначається емпірично);

$v_{yi}$  - відносна швидкість молотків та шматків у точці зіткнення;

$\lambda_i$  - кут атаки шматків.

Об'єм зношеного матеріалу при абразивному зносі в процесі ковзання шматка [4] визначається як:

$$V_{us} = \sum V_q I, \quad (2.76)$$

де  $\sum V_q$  - обсяг всіх частинок, що вступають у контактну взаємодію з поверхнею молотка на кожному етапі;

$I$  – інтенсивність зношування на етапі ковзання шматка по молотку.

Рівняння для визначення прогнозованої інтенсивності зносу при ковзанні матеріалу [11, 20], виходячи з фізико-механічних властивостей матеріалів та умов експлуатації вузлів тертя, громіздкі та незручні для практичного застосування.

Точний прогноз може бути виконаний лише у разі, коли його параметри оцінені за умов, наближених до умов експлуатації. Тому використовуємо емпіричну залежність для конкретного виду зношування за певних умов їх протікання та різних поєднань матеріалів. У загальному вигляді закономірність зношування має вигляд:

$$I = k_e \rho^m v^n t^a, \quad (2.77)$$

де  $I$  - інтенсивність;

$k_e$  - емпіричний експлуатаційний коефіцієнт (фактор) зносу;

$\rho$  - питома навантаження;

$v$  - відносна швидкість взаємного ковзання поверхонь;

$t$  - час;

$m, n, a$  - показники ступеня.

Для процесу зношування при незмінних технічних умовах експлуатації –  $a=1$ , і якщо не відбувається зміни виду зношування -  $n = 1$ . Для абразивного зношування приймаємо  $m = 1$  [90, 129].

Тоді:

$$I_h = k_e \rho v. \quad (2.78)$$

Виходячи з цього, зношений обсяг зношеної частини молотка в



Залежно від маси подрібнювального матеріалу визначається за емпіричною залежністю:

$$V = M \frac{v_{y2}^2}{24\sigma_m} \sin^2 \lambda_2 + k_e L_5 S_5 p_5 v_{i5} + (1 - k_5) M \frac{v_{y5}^2}{24\sigma} \sin^2 \lambda_5, \quad (2.79)$$

де  $M$  - маса подрібнювального матеріалу;

$L_5$  - довжина шляху ковзання при терті про бічну поверхню молотка;

$S_5$  - площа контактної зіткнення шматків подрібнювального матеріалу з поверхнею одного молотка при ковзанні шматка матеріалу з бічної (робочої) поверхні бойка при дробленні на етапі 1.5.

$k_5$  - коефіцієнт, що враховує вміст фракції матеріалу, за якої не забезпечується умова (2.54); визначається за формулою:

$$k_5 = \frac{M'}{M}, \quad (2.80)$$

$M'$  - маса фракції матеріалу, за якої не забезпечується умова (2.54);

$p_5$  - питоме навантаження при ковзанні матеріалу з бічної поверхні молотка на етапі 1.5;

$v_{i5}$  - швидкість руху шматка по бічній поверхні молотка на етапі 1.5.

Визначимо основні параметри розподілу, що впливають на зношування на кожній стадії при взаємному контакті молотків зі шматками за один оберт ротора.

При зіткненні на етапі 1.2 маса матеріалу, що контактує з одним рядом молотків за один оборот ротора, що дорівнює:

$$M = \frac{60M_{ч.с.}}{nz}, \quad (2.81)$$

де  $M_{ч.с.}$  - маса подрібнювального матеріалу, що завантажується в дробарку за одну секунду;

$n$  - кількість обертів ротора за хвилину.

Швидкість  $v_{y2}$  дорівнює лінійній швидкості молотка у точці контакту на етапі завершення удару, кут атаки  $\lambda_2$  дорівнює куту  $\gamma_2$ .

Зношування на етапі 1.5 залежить від шляху та площі контакту при ковзанні шматка по бічній поверхні молотка за умови, коли  $k_5 > 0$ , що залежить від вмісту фракції з розміром шматків  $D_{cp}'$  у загальному обсязі сировини, при якому не забезпечується умова (2.54).

Виходячи з параметрів відносного руху ударного елемента і шматків (пункт 2.2.4), контакт відбувається при швидкості, порівнянної з лінійною швидкістю молотка  $v_{y2}$  і ковзання починається в районі основи ніжки молотка.

Шлях ковзання визначається геометричними параметрами ротора та молотка дробарки.

$$L_5 \approx R + r - R_{зовн}, \quad (2.82)$$

де  $R_{зовн}$  - зовнішній радіус дисків ротора.

Умовна площа контакту шматків матеріалу з робочою поверхнею молотка:

$$S_5 = q_5 \pi d_{cp}^2, \quad (2.83)$$

де  $q_5$  - кількість шматків, що викликали зношування;

$d_{5cp}$  - середній діаметр шматків матеріалу, що викликають знос при взаємному контакті.

$$q_5 = q_{np} i_2^3, \quad (2.84)$$

де  $q_{np}$  - кількість у вихідній шихті шматків з масою, що перевищує граничне значення, коли кут відхилення молотка при зіткненні перевищує

умови взаємного контакту на етапі 1.5 (рис. 2.13)  $q_{np} = k_5$ ;

$i_2$  - ступінь дроблення шматків подрібнювального матеріалу на етапі 1.2 (визначається емпіричним шляхом або на підставі раніше проведених досліджень [1-7]).

$$d_{5cp} = \frac{D_{cp}'}{i_2}. \quad (2.85)$$

Тоді формула (2.83) виглядає:

$$S_5 = k_5 i_2 \pi D_{cp}'^2. \quad (2.86)$$

Зусилля, що виникає на робочій поверхні молотка при ковзанні шматка матеріалу  $p_5$  і рівне діючій силі Коріоліса, визначається за формулою (2.22) з урахуванням швидкості ковзання  $v_{y5}$  визначається за залежністю (2.26).

На підставі аналізу графоаналітичних залежностей руху шматка матеріалу на етапі 1.4 передбачалося, що точки повторного ударного контакту з поверхнею молотка в залежності від кута відхилення  $\gamma_2$  розташовані по всій поверхні бойка з однаковою густиною розподілу в кожній з елементарних ділянок робочої грані. З цього випливає, що ударний контакт можна як зосереджений нецентральный у точці, що у центрі бойка.

Тоді відносна швидкість  $v_{y5}$  дорівнює різниці лінійної швидкості бойка в точці контакту та проекції швидкості шматка на вектор руху центру мас молотка:

$$v_{y5} = \omega \left( R + \frac{r}{2} \right) - v_{y4} \cos \alpha_5. \quad (2.87)$$

Кут атаки  $\lambda_5$  дорівнює куту  $\alpha_5$ .

Підставивши вирази (2.80), (2.82), (2.86) та (2.87) у формулу (2.79) отримуємо залежність для визначення об'ємного зносу молотка від маси подрібнювального матеріалу:

$$I = \frac{\omega \pi}{z} \left[ \frac{M(1-k_5)(1-\cos(2\alpha_5\gamma_2+2b_5)) \left( R + \frac{r}{2} - \frac{2kk_d \cos(a_5\gamma_2+b_5)}{2} \right)^2}{24k\sigma} + \frac{k_e 2D_{cp}' ik_5 m_y v_{y5} (R-R_e+r) + \frac{\gamma_2^2 M(k-1)^2 (R+r-c)^2}{12k_\sigma \sigma_M}}{12k_\sigma \sigma_M} \right]. \quad (2.88)$$

Для умов молоткового дробарки ударної дії:

$$I = \frac{k_\sigma M \omega \pi}{24\sigma_m z z_p} \left[ \frac{(1-k_p)(1-\cos(2a\gamma+2b)) \left( R + \frac{l}{2} - \frac{2kk_e \cos(a\gamma+b)}{k_m+1} \right)^2}{12k_\sigma \sigma_m} + \frac{2\gamma^2 (k_m-1)^2 (R+l-c)^2}{12k_\sigma \sigma_m} \right]. \quad (2.89)$$

## Висновки

1. Розглянуто математичну модель, що дозволяє визначити кут відхилення молотка в процесі ударної взаємодії з дрібним шматком матеріалу в робочій зоні дробарки з урахуванням маси  $m_{\Sigma m}$  та радіуса центру мас молотка  $r_u$ , маси шматка матеріалу  $m_{\text{ш}}$ , довжини ударної робочої грані молотка  $l$  відстані вільного руху шматка в робочій зоні  $s$  і радіусу підвісу молотків  $R$ .
3. Встановлено вплив співвідношення маси низки молотків  $k_m$  та шматка на кут відхилення молотка, за допомогою кінцево-елементного методу підтверджено відповідну методику на основі отриманої аналітичної залежності.
4. Розглянуто математичну модель руху молотка після ударної взаємодії з урахуванням кута відхилення молотка  $\gamma_2$  при визначенні часу його повернення у радіальне становище.
5. Отримана залежність ступеня дроблення матеріалу при ударній взаємодії від наступних факторів: маси ряду молотків  $m_{\Sigma m}$  і радіуса центру мас молотка  $r_u$ , середнього діаметра шматка матеріалу  $D_{cp}$ , радіуса зовнішньої грані молотка  $r$ , відстані вільного руху шматка  $s$  в радіусі підвісу молотків  $R$ , кутовий швидкості обертання ротора  $\omega$ , модуля пружності подрібнювального матеріалу  $E_{\text{ш}}$  і експлуатаційного коефіцієнта  $k_e$ .
- 6 Встановлено, що збільшення маси молотка призводить до зниження зносу ударного органу при зіткненні з матеріалом, а збільшення маси шматка матеріалу - до його підвищення.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОШЕННЯ МАТЕРІАЛУ МОЛОТКІВ

Інтенсивність зносу молотків залежить від наступних факторів [20]:

- а) показники зносостійкості й абразивності молотків;
- б) товщина, геометрія та матеріал молотків;
- в) кутова швидкість ротора, ступінь дроблення;
- г) фізико-механічні властивості подрібнювального матеріалу.

Предметом дослідження є матеріал молотків які використовуються в молоткових дробарках й застосовуються в металургійному виробництві.

### 3.1 Методика експериментальних досліджень

Для отримання показника абразивності матеріалу еталоном служать біла-зразки, виготовлені зі сталі марки 45 по ГОСТу 1050-60 [38], термічно оброблені до твердості 28- 32 HRC. Показниками абразивності є питомі знос нетто в г/т, що позначаються  $u_{30}$  і  $u_{60}$ , тобто при окружних швидкостях ротора відповідно 30 і 60 м/с:

$$I_{30} (I_{60}) = \Delta g / G \cdot \quad (3.1)$$

де  $\Delta g$  - сумарний знос чотирьох бил-зразків, мг;

$G$  - кількість переробленого абразивного матеріалу за один дослід, кг.

При малої абразивності через модель пропускають кілька порцій матеріалу по 1 кг, так, щоб знос кожного біла зразка був не менше 25 мг. Якщо потрібно пропустити близько 100 кг, то для прискорення випробувань можна завантажити в бункер порції по 5 або по 10 кг, пропускаючи їх одночасно. У таких випадках показники  $u_{30}$  і  $u_{60}$  слід помножити відповідно

на поправочні коефіцієнти 1,5 (при порції 5 кг) і 1,6 (при порції 10 кг), так як питома знос знижується при збільшенні маси порції.

Для отримання показника зносостійкості матеріалу бил зразки виготовляють з випробувального матеріалу, а як еталон використовують граніт, показники абразивності якого  $u_{30} = 280$  г/т  $u_{60} = 900$  г/т. Але так як граніти навіть одного родовища можуть відрізнятися за абразивності, то перед випробуваннями попередньо визначають дійсні їх показники ( $u_{30}$  і  $u_{60}$ ) і потім, при обчисленні, вносять поправку. Показники зносостійкості для відповідних швидкостей ротора, що позначаються  $u_{30}$  і  $u_{60}$ , в кг/г визначаються так:

$$\left. \begin{aligned} C_{30} &= \frac{G \cdot I_{30E}}{\Delta g \cdot 280}, \\ C_{60} &= \frac{G \cdot I_{60E}}{\Delta g \cdot 900}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Описана методика рекомендується Комітетом Стандартів (ГОСТ 12375-70) [38,39].

У експериментах, при замірах геометричних параметрів робочої грані молотка, точність окремого безпосереднього вимірювання оцінювалася величинами абсолютної і відносної помилок [37]. Абсолютна помилка визначалася за формулою:

$$E = (A_{cp} - A_1), \quad (3.3)$$

де  $A_{cp}$  - середнє арифметичне значення вимірюваної величини;

$A_1$  - спостережуване значення вимірюваної величини.

Відносна помилка визначалася за формулою:

$$\delta = (E/A_1) \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

де  $\delta$  - відносна помилка виміру, виражена у відсотках.

Відносна помилка результатів, отриманих при визначенні зносу робочої грані молотка оцінювалася помилкою яка визначається за формулою:

$$\delta = \frac{E}{(A_1 - A_2)} \cdot 100\% , \quad (3.16)$$

де  $\delta$  - відносна помилка різниці;

$E$  - середня абсолютна помилка вимірюваної величини;

$A_1$  - середнє значення вимірюваної величини до зносу, прийняте за її дійсне значення;

$A_2$  - середнє значення вимірюваної величини після зносу, прийняте за її дійсне значення.

При визначенні середньої абсолютної помилки вимірюваних величин було помічено, що при досить великому числі вимірювань вона наближається по величині до точності приладів, які використовуються при вимірах. Тому за абсолютну помилку була прийнята точність вимірювальних приборів.

Коефіцієнт надійності, в наших дослідженнях знаходиться в межах від 0,75 до 0,95.

### 3.2 Опис стенду для дослідження матеріалів на тертя та знос.

Стенд для дослідження матеріалів на тертя та знос дозволяє моделювати процес абразивного зносу та дозволяє досліджувати тертя і знос різних матеріалів зразків при різноманітних режимах та напрямках навантаження в абразивному середовищі різного гранулометричного складу з будь-якою вологістю, щільністю і твердістю абразивних частинок, а також у рідині.

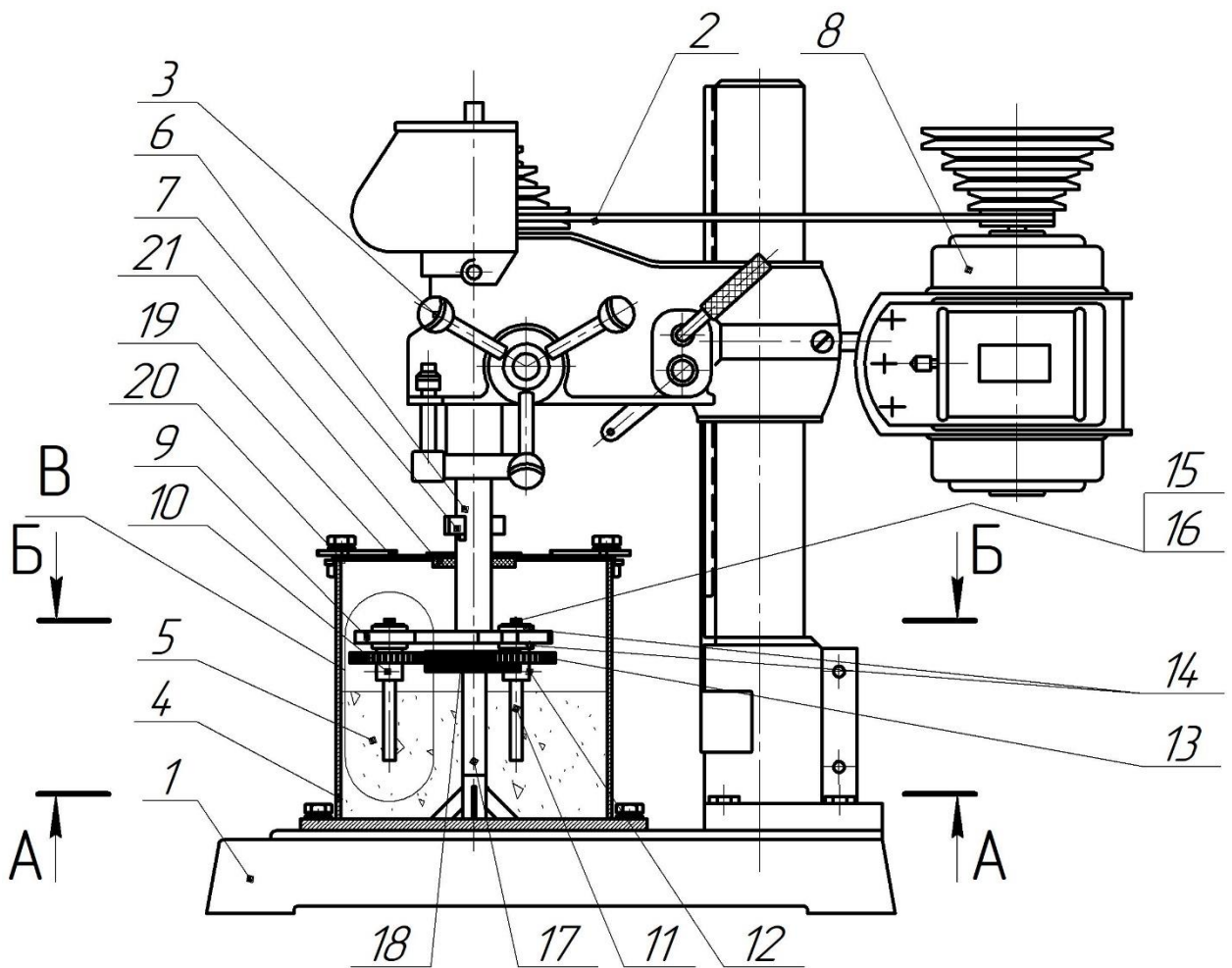


Рисунок 3.1 - Конструкція стенду для дослідження матеріалів на тертя та знос [37]

Стенд містить станину свердильного станку 1 з пасовою передачею 2 та штурвалом 3, на яку змонтований корпус 4, в якому знаходиться абразивне середовище 5 та вал 6, одним кінцем з'єднаний муфтою 7 з електричним двигуном 8 свердильного станка 1, а на другому – встановлено перпендикулярно валу 6 консоль 9 з розташованими в ній елементами для закріплення 10, в які встановлюються змінні зразки для дослідження 11, що фіксуються гвинтами 12. На елементи для закріплення 10 нерухомо зафіксовано шестерні 13, а самі елементи для закріплення 10 встановлюються в консоль 9 через підшипники 14, які фіксуються шайбами 15 та болтами 16.



В корпусі 4 нерухомо встановлена стійка 17 з зафіксованою шестернею 18, а сам корпус 4 закрито кришкою 19 з ущільнювачами 20 та 21.

Стенд містить корпус з абразивним середовищем, в якому розташовано вал, з'єднаний з приводом і робочий кінець валу станка занурено у корпус з абразивним середовищем, який відрізняється тим, що в корпус з абразивним середовищем, який змонтовано на станині свердлильного станка, на валу розташована консоль з трьома елементами для обертання зразків матеріалу, що досліджується.

Стенд працює наступним чином. До консолі 10 через елементи для закріплення 11 кріпляться три зразки для дослідження 12, які занурюються на необхідну глибину дослідження штурвалом 3 в абразивне середовище 5, що знаходиться у корпусі 4, який закріплено на станині свердлильного станку 1. Корпус 4 закривається кришкою 20 з ущільнювачами 21 та 22, а вал 6 другим кінцем з'єднується муфтою 7 з електричним двигуном 8 свердлильного станку 1 через пасову передачу 2. Змінювання режиму роботи стенду регулюється швидкістю обертання за допомогою пасової передачі 2 перед подаванням енергії на електричний двигун.

Стенд, що заявляється, дозволяє досліджувати тертя і знос різних матеріалів при різноманітних режимах роботи в абразивному середовищі різного гранулометричного складу з будь-якою вологістю, щільністю і твердістю абразивних частинок, а також у рідині з метою оптимізації конструкції дробарки робочих органів дробарок та іншого обладнання.

Загальний метод дослідження на абразивне зношування засновано на терті зразків, що обертаються в насипному шарі абразивного середовища. Для створення більш агресивного середовища у порівнянні з реальними умовами роботи як абразивний матеріал використовувалася відсіяна фракція вапняку 1-2 мм [38].



а – загальний вид



б - корпус стану

Рисунок 3.2 – Вид лабораторного стану

До і після випробування визначалося масове зношування зразків за конкретний проміжок часу.

Випробування здійснювалося для чотирьох циліндричних зразків діаметром 10 мм і довжиною 100 мм сталі різних марок.

В якості вихідних були прийняті матеріали, надані у табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості досліджуваних матеріалів

Марка сталі	Ударна в'язкість, кгс/м	Твердість HRC/HB
45	0,6	28-32/-
70ХНВЛ	0,22	50/-
40ХНМЛ	1,25	-/330-340
110ГЗЛ	12,5	-/180-220

Зразки занурювали в абразивне середовище на глибину 50 мм, швидкість обертання 30-40 м/с. Загальний час дослідів – 50 годин. Загальна маса подрібнювального матеріалу -10 кг.

Зносостійкість матеріалів встановлювалася за допомогою вимірювання зношення важенням – одним з методів, що найбільш використовується. Важення зразків відбувалося до і після експериментів на аналітичних вагах з ціною ділення 0,1 мг.

Відносна зносостійкість зразків матеріалу обчислювалася за формулою (3.1).

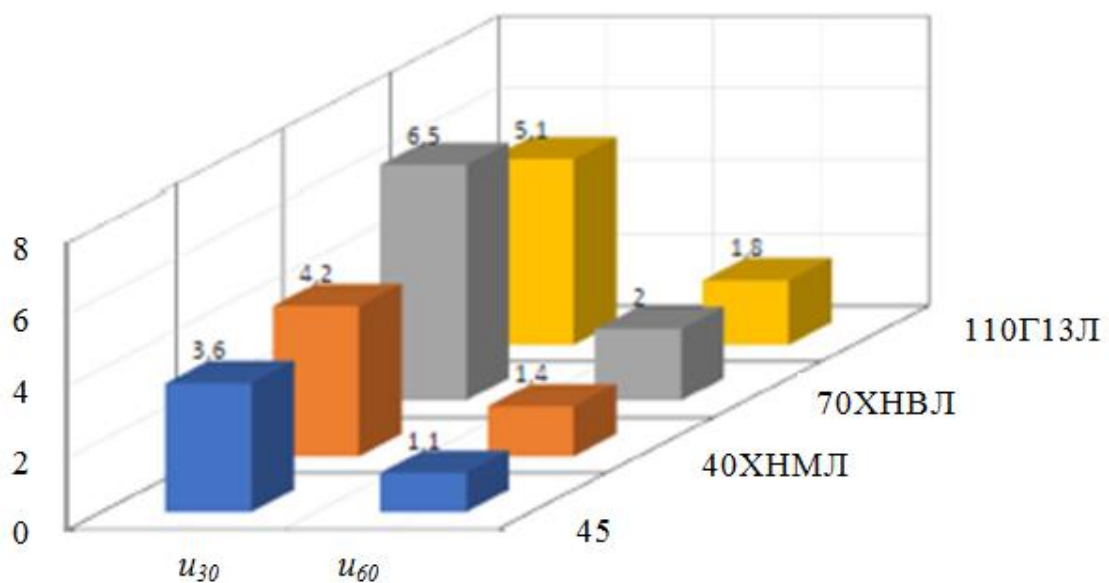


Рисунок 3.3- Результати досліджень на зносостійкість

Результати досліджень (рис.3.3) показують, що збільшити зносостійкість у порівнянні з розповсюдженою для дробарок сталлю 110Г13Л, яка має показники зносостійкості  $C_{30}=5$  кг/г і  $C_{60}=1,7$  кг/г, дуже складно, оскільки збільшення твердості для підвищення зносостійкості і підвищення ударної в'язкості пов'язані між собою зворотною залежністю. Цю проблему можна вирішити не суцільною зміною матеріалу бил, а поверхневим зміцненням методом наплавлення бил.

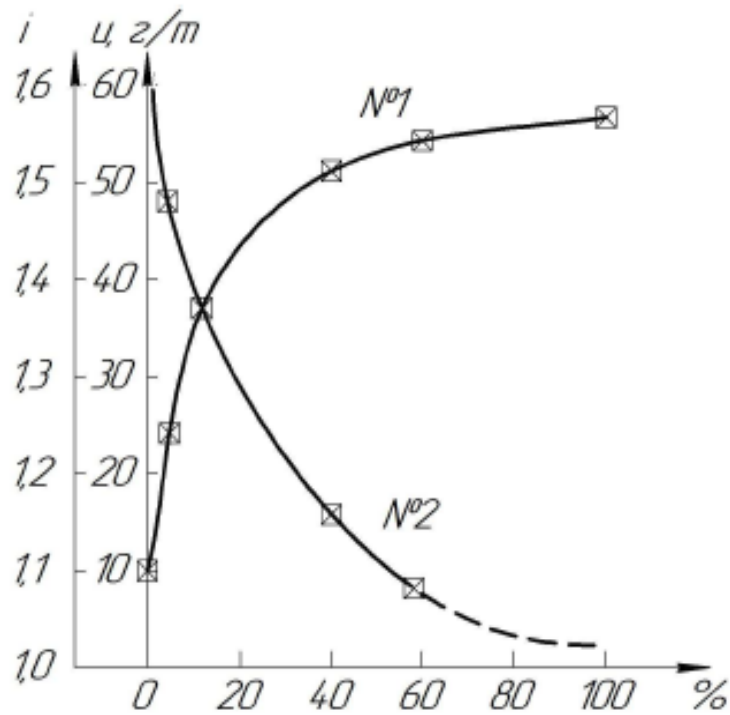
### 3.3 Результати досліджень ступеня зносу бил на показники процесу дроблення

На рис.3.4 наведені результати дослідів дроблення граніту на роторній дробарці СМ-624. Крива 1 питомого зносу бил вказує на збільшення питомого зносу в міру зростання загального зносу бил. Била в кінці терміну служби мають в 5 разів більший питомий знос, ніж на початку, причому питомий знос підвищується приблизно паралельно зі збільшенням поверхні дотичній до окружності ротора. Крива 2 показує зміну ступеня дроблення в залежності від стану била при незмінному положенні відбивних органів. Зменшення ширини щілини по мірі зносу бил дозволяє підтримувати незмінною ступінь дроблення. При роботі дробарки в замкненому циклі зі збільшенням зносу бил зростає циркуляційне навантаження, яке може збільшитися до 200%.

На рис.3.5.а схематично зображено знос била у поперечному перерізі дробарки моделі С-643. Коефіцієнт використання металу бил даної конструкції складає 25 %.

Рівномірність зносу била по його довжині залежить від рівномірності розподілу вихідного матеріалу по довжині ротора. Цей розподіл залежить від умов подачі матеріалу у дробарку і її конструкції. У дробарках первинного дроблення у роторів без торцевих дисків по довжині зношуються майже рівномірно. У дробарках вторинного дроблення, подавання подрібнювального матеріалу до яких відбувається зазвичай зі стрічкових конвеєрів (вузьким потоком), знос трохи більший в середній частині била.

Для ротора з торцевими дисками ділянки била, прилеглі до дисків, зношуються менш інтенсивно. Довжина цих ділянок невелика, у дробарці СМД-75 ця ділянка становить біля 15 мм.



№1 – знос  $u$ ; №2 – ступінь дроблення  $i$  (штрихова лінія – екстрапольована)

Рисунок 3.4 – Вплив ступеня зносу бил на показники процесу дроблення при нерегульованій ширині вихідній щілини

Підвищення зносостійкості бил можна домогтися застосуванням зносостійких матеріалів молотка. При цьому можуть бути отримані точні якісні співвідношення між параметрами і показниками аналізованого процесу або ж свідношення вказують тільки напрямок впливу того чи іншого чинника на характеристики досліджуваного процесу. Результат буде залежити від конкретних властивостей обраної схеми і параметрів з урахуванням їх зносу.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто математичну модель, що дозволяє визначити кут відхилення молотка в процесі ударної взаємодії з дрібним шматком матеріалу в робочій зоні дробарки з урахуванням маси  $m_{\Sigma m}$  та радіуса центру мас молотка  $r_u$ , маси шматка матеріалу  $m_c$ , довжини ударної робочої грані молотка  $l$  відстані вільного руху шматка в робочій зоні  $s$  і радіусу підвісу молотків  $R$ .
2. Встановлено вплив співвідношення маси низки молотків  $k_m$  та шматка на кут відхилення молотка, за допомогою кінцево-елементного методу підтверджено відповідну методику на основі отриманої аналітичної залежності.
3. Встановлено, що збільшення маси молотка призводить до зниження зносу ударного органу при зіткненні з матеріалом, а збільшення маси шматка матеріалу - до його підвищення.
4. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень визначено залежності зносу поверхонь молотків від матеріалу робочої грані, а саме - твердості й ударної в'язкості.
5. Згідно проведених досліджень виявлено, що збільшити зносостійкість в порівнянні з розповсюдженою для молоткових дробарок сталлю аустенітного класу 110Г13Л можна вирішити не суцільною заміною матеріалу бил, а поверховим зміцненням методом наплавлення нових молотків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. 284 с.
2. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім. 2000.
3. Гірничий енциклопедичний словник / За ред. В.С.Білецького. тт. 1-3, 2001-2004.
4. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик : посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2002. 296 с.
5. Самилін В., Білецький В. Спеціальні методи збагачення корисних копалин : курс лекцій. Донецьк : Східний видавничий дім, 2003. –116 с.
6. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин : посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2004. 272 с.
7. Білецький В.С., Смирнов В.О. Переробка і якість корисних копалин : курс лекцій. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 324 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Сокур Н.И., Сокур Л.М., Сокур Л.М. Центробежні дробарки : монографія . Кременчук : КДПУ, 2009. 202 с..
12. Інтернет ресурс [http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення\\_і\\_подрібнення](http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення_і_подрібнення)
13. Інтернет ресурс [https://uk.wikipedia.org/wiki/Молоткова\\_дробарка](https://uk.wikipedia.org/wiki/Молоткова_дробарка).

14. Шмиг Р.А., Боярчук В.М., Добрянський І.М., Барабаш В.М. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури. Львів, 2010. 222 с. ISBN 978-966-7407-83-4.
15. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. Донецьк : Донбас, 2004. Т.1. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.
16. Ялпачик Ф.Ю., Ялпачик Г.С. Кормодробарки конструкція, розрахунок. Запоріжжя : Комунар 1992. 290 с.
17. Ялпачик Ф.Є. Вплив зносу молотків кормодробарки на передачу ударів по осях підвісу. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Науково-технічна збірка. Випуск 69. Київ : Урожай, 1989.
18. Нечаєв Г.І., Ленич С.В., Турушин В.О. Вплив швидкості руху сипкого матеріалу на процес руйнування частинок в подрібнювачах ударної дії. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* . № 1 (18), 2010. с.203-205.
19. Турушин В.О., Ленич С.В. Закономірності руйнування сипких матеріалів в подрібнювачах ударної дії . *Вісник СХУ ім. В. Даля*. 2009, № 5 (135). С. 11–19. Савченко В.М. Розробка молотків кормодробарок з локальним зносостійким покриттям : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 Кіровоград : КНГУ, 2008. 20 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. Грицаєнко В.І. Вплив робочих органів молотків та фрез на енергетичні та якісні показники роботи молоткових кормодробарок : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Харків : ХІМЕСЕК, 1967. 28 с.
22. Ротор молоткової дробарки: пат. 111218 Україна: МПК В02С 13/04 / № u 2016 03 005; заявл. 23.03.16; опубл. 10.11.16. Бюл. № 21. 4 с.
23. Молоток молоткової дробарки: пат. 58860 Україна: МПК В02С13/28. № 2002118987; заявл. 12.11.2002; опубл. 15.08.2003. Бюл. № 8. 2 с.
24. Hammer for use in hammer mill: pat. 5114085 USA, IPC В02С13/28 .



- Kurimoto Ltd., Osaka, Japan. № 07724502; filed 28.06.1991; published 19.05.1992.
25. Білецький В.С., Смирнов В.О., Сергеев П.В. Моделювання процесів переробки корисних копалин : посібник. НТУ «Харківський політехнічний інститут», Львів : «Новий Світ - 2000», 2020. 399 с. ISBN 978-617-7519-53-8.
26. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / Сокур М.І. та ін.. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с. ISBN 978-617-639-139-5.
27. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 655 с. ISBN 5-11-004083-4.
28. 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.
29. Гришанова І.А., Згуровська Л.П., Киричук Ю.В. Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 180 с.
30. Троханяк В.І., Богдан Ю.О. Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в ANSYS Medhing для CFD моделей. Вісник приазовського державного технологічного університету. 2015, №30. С.181-189.
31. Mohs, F. Grundriss der Mineralogie Dresden, 1822.
32. Wolfgang, P. Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment. Weinheim : Wiley-VCH, 2002. 614 p.
33. Shulat'ev V., Mochnatkin V., Krasikow D. Doskonalenie ksztaltu obudowy korpusu kosiarkorozdrabniacza KIR-1,5 . 21 *Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji roslinnej*: X Miedzynarodowesympozjum. Warszawa – Melitopol, 2003. p. 217–224.
34. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper . *Journal fur die reine und angewandte Mathematik*. 1882. Iss. 92. p. 156–171.

35. Laursen, T.A. Computational Contact and Impact Mechanics : *Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis*. New York : Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2002. p. 454
36. Berggren, J. Lennart. Mathematics in Medieval Islam. *The Mathematics of Egypt, Mesopotamia, China, India, and Islam : A Sourcebook*. Princeton University Press. 2007. p. 518.
37. Стенд для дослідження матеріалів на тертя та знос: пат. 152886 Україна: МПК6 G01N 3/56. № 2021 06303; заявл. 08.11.2021; опубл. 26.04.2023, Бюл. № 17. 5 с.
38. ГОСТ 17367-71. Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы. [Чинний від 1973-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1972. 5 с. (Інформація та документація).
39. ГОСТ 23.208-79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. [Чинний від 1981-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1972. 4 с. (Інформація та документація).
40. ДСТУ 2411-94. Дробарки. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1994. 16 с. (Інформація та документація).
41. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. [Чинний від 1994-10-31]. Вид. офіц. Київ, 1994. 32 с. (Інформація та документація).
42. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 16 с. (Інформація та документація).

# ДОДАТОК А

---

**«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**



Науково-дослідна частина  
Наукове товариство студентів, аспірантів і докторантів  
Рада молодих вчених



**ЗБІРНИК**  
наукових праць студентів,  
аспірантів, докторантів і молодих вчених

**«МОЛОДА НАУКА-2023»**

**Том V**

*«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потєбні  
Запорізького національного університету»*

Запоріжжя  
2023

<i>ЕНЕРГОРЕСУРСІВ</i> .....	352
<b>Шати Ілля</b> <i>МАЛА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК РОЗВИТКУ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ</i> .....	353

#### **СЕКЦІЯ «МЕТАЛУРГІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ»**

<b>Балаандін Віталій</b> <i>ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПЛАНУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТНИХ РОБІТ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ</i> .....	355
<b>Борисов Артем</b> <i>ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ ПРИ ДРОБЛЕННІ МАТЕРІАЛІВ</i> .....	357
<b>Грекулік Олексій</b> <i>ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИЙМАЛЬНОГО РОЛЬГАНГА ОБТИСКНОГО ПРОКАТНОГО СТАНА</i> .....	358
<b>Забашта Дмитро, Забашта Максим</b> <i>ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ</i> .....	360
<b>Кулік Дмитро</b> <i>ОБґРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ КРИТЕРІЇВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СТУПІНЬ ПОДРІБНЕННЯ</i> .....	361
<b>Мурашко Володимир, Кулік Дмитро</b> <i>ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ КОНСТРУЮВАННІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ</i> .....	363
<b>Сальник Петро</b> <i>АНАЛІЗ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ПОДАЧІ ЗЛИВКІВ ДО РОБОЧОЇ КЛІТИ ОБТИСКНОГО СТАНУ «СЛЯБІНГ 1150»</i> .....	365
<b>Федченко Дмитро</b> <i>КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДА СКІПОВОГО ПІДЙОМНИКА</i> .....	366
<b>Харина Дмитро</b> <i>АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ НАХИЛУ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ</i> .....	368
<b>Ходунов Андрій</b> <i>ДОСЛІДЖЕННЯ МОНОЛІТНИХ ВОЛОК З РІЗНОЮ ФОРМОЮ ПЕРЕРІЗУ РОБОЧОГО КАНАЛУ</i> .....	370

#### **СЕКЦІЯ «ІНФОРМАЦІЙНА ЕКОНОМІКА, ПІДПРИЄМНИЦТВО ТА ФІНАНСИ»**

<b>Бондаренко Кирил, Гавриленко Олексій</b> <i>РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЯВЛЕННЯ НЕКОРЕКТНОЇ ТА ЗАСТАРІЛОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА WEB-РЕСУРСАХ КАФЕДРИ ЗВО</i> .....	372
---	-----

## 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)

