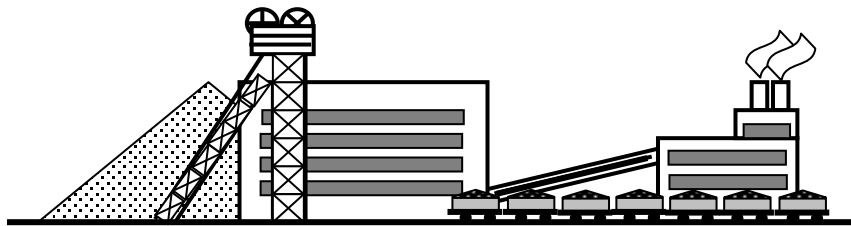


КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
АКАДЕМІЯ ГІРНИЧИХ НАУК УКРАЇНИ

**Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О. І.,  
Воробйов О. М., Смирнов В.О., Божик Д.П.**

# **ПІДГОТОВКА КОРИСНИХ КОПАЛИН ДО ЗБАГАЧЕННЯ**

**Монографія**



**Кременчук  
ПП Щербатих О.В.  
2017**

ББК 33.4  
УДК 622.7  
П 32

*Рекомендовано до друку Академією гірничих наук України  
(протокол № 2 засідання президії Академії гірничих наук України  
від 22.12.2016 р. м. Кривий Ріг)*

**Рецензенти:**

Олійник Т.А. – д.т.н., професор, зав. кафедри збагачення корисних копалин і хімії ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

Горобець Л.Ж. – д.т.н., професор кафедри збагачення корисних копалин Національного гірничого університету;

Чебенко В.Н. – д.т.н., професор, зав. кафедри безпеки життєдіяльності Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

П 32 **Підготовка** корисних копалин до збагачення : монографія / Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О. І., Воробйов О. М., Смирнов В.О., Божик Д.П. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.

**ISBN 978-617-639-139-5**

Викладені теоретичні основи і технологія процесів дроблення, подрібнення і грохочення корисних копалин. Розглянуті основні конструкції технологічного обладнання, його принцип дії і технологічні характеристики, монтаж і технічне обслуговування млинів. Викладені методи контролю крупності перероблюваної мінеральної сировини і базисні положення охорони навколишнього середовища у підготовчих цехах збагачувальних фабрик. Особлива увага приділена моделюванню процесів у проточній і розвантажувальній частині барабанного млина, питанням конструкції і напруженого стану барабанів млинів. Викладені питання теорії і практики створення дезінтеграторів відцентрового типу.

Видання призначене для фахівців у галузі підготовки корисних копалин до збагачення, зокрема, дроблення, подрібнення, грохочення мінеральної сировини.

Табл. 39, іл. 125, бібл. 7.

**ББК 33.4  
УДК 622.7**

**ISBN 978-617-639-139-5**

© Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О. І.,  
Воробйов О. М., Смирнов В.О., Божик Д.П., 2017

## ЗМІСТ

|   |     |
|---|-----|
| <b>Передмова</b> .....  | 7   |
| <b>1 Грохочення</b> .....   | 8   |
| 1.1 Загальні відомості про процес .....   | 8   |
| 1.2 Просіюючі поверхні грохотів .....   | 10  |
| 1.3 Гранулометричний склад корисних копалин.....  | 14  |
| 1.3.1 Способи визначення гранулометричного складу.....                                      | 14  |
| 1.3.2 Ситовий аналіз.....   | 16  |
| 1.3.3 Рівняння характеристик крупності.....   | 22  |
| 1.3.4 Визначення питомої мінеральної поверхні.....  | 23  |
| 1.4 Грохоти.....  | 27  |
| 1.4.1 Класифікація грохотів.....  | 27  |
| 1.4.2 Нерухомі грохоти.....   | 28  |
| 1.4.3 Грохоти з частково рухомою просіюючою<br>поверхнею.....                               | 32  |
| 1.4.4 Барабанні і циліндричні грохоти.....  | 37  |
| 1.4.5 Вібраційні грохоти.....   | 40  |
| 1.5 Технологія процесу грохочення .....   | 47  |
| 1.5.1 Технологічні показники процесу грохочення.....  | 47  |
| 1.5.2 Кінетика процесу грохочення.....  | 52  |
| 1.5.3 Фактори, що впливають на процес грохочення.....                                       | 54  |
| <b>2 Дроблення</b> .....  | 60  |
| 2.1 Характеристика процесів дроблення і подрібнення.....                                    | 60  |
| 2.2 Закони дроблення.....   | 63  |
| 2.3 Міцнісні характеристики гірських порід і способи їх<br>руйнування.....                  | 65  |
| 2.4 Дослідження дробимості корисних копалин.....  | 70  |
| 2.5 Щоківні дробарки.....   | 74  |
| 2.5.1 Конструкція і принцип дії щоківних дробарок.....                                      | 74  |
| 2.5.2 Технологічні характеристики щоківних дробарок.....                                    | 79  |
| 2.6 Конусні дробарки крупного дроблення.....  | 85  |
| 2.6.1 Конструкція і принцип дії конусних дробарок<br>крупного дроблення .....               | 85  |
| 2.6.2 Технологічні характеристики конусних дробарок<br>крупного дроблення.....              | 89  |
| 2.7 Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення.....                                   | 95  |
| 2.7.1 Конструкція і принцип дії конусних дробарок<br>середнього і дрібного дроблення.....   | 95  |
| 2.7.2 Технологічні характеристики конусних дробарок<br>середнього і дрібного дроблення..... | 102 |
| 2.8 Валкові дробарки.....   | 109 |
| 2.8.1 Конструкція і принцип дії валкових дробарок.....                                      | 109 |
| 2.8.2 Технологічні характеристики валкових дробарок.....                                    | 113 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.9      | Дробарки ударної дії.....   | 117        |
| 2.9.1    | Конструкція і принцип дії молоткових дробарок.....                                  | 117        |
| 2.9.2    | Конструкція і принцип дії роторних дробарок.....                                    | 123        |
| 2.9.3    | Технологічні характеристики дробарок ударної дії.....                               | 127        |
| <b>3</b> | <b>Подрібнення.....</b>   | <b>133</b> |
| 3.1      | Процес подрібнення.....   | 133        |
| 3.1.1    | Властивості гірських порід, що впливають на процес подрібнення.....                 | 133        |
| 3.1.2    | Кінетика процесу подрібнення.....   | 140        |
| 3.2      | Млини.....  | 143        |
| 3.2.1    | Класифікація млинів.....  | 143        |
| 3.2.2    | Конструктивні типи і принцип дії барабанних млинів... ..                            | 144        |
| 3.2.3    | Конструкції кульових і стержневих барабанних млинів.....                            | 145        |
| 3.2.4    | Конструкції барабанних млинів самоподрібнення.....                                  | 154        |
| 3.2.5    | Конструкції планетарних і гіроскопічних млинів.....                                 | 159        |
| 3.2.6    | Конструкції відцентрових барабанних млинів.....                                     | 160        |
| 3.2.7    | Конструкції вібраційних млинів.....   | 161        |
| 3.2.8    | Конструкції млинів ударної дії.....   | 164        |
| 3.2.9    | Конструкції аеродинамічних млинів.....  | 165        |
| 3.3      | Подрібнення у барабанних млинах.....  | 170        |
| 3.3.1    | Швидкісні режими роботи млинів .....  | 170        |
| 3.3.2    | Рівняння параболічної і кругової траєкторій руху кулі у млині.....                  | 176        |
| 3.3.3    | Швидкість падіння подрібнюючих тіл.....   | 182        |
| 3.4      | Потужність барабанних млинів .....  | 186        |
| 3.4.1    | Подрібнююче середовище барабанних млинів.....                                       | 186        |
| 3.4.2    | Пульпа .....  | 189        |
| 3.4.3    | Вплив маси і крупності подрібнюючого середовища на роботу барабанних млинів.....    | 190        |
| 3.4.4    | Вплив швидкості і числа ударів подрібнюючих тіл на роботу барабанних млинів.....    | 196        |
| 3.4.5    | Потужність, споживана барабанними млинами.....                                      | 197        |
| 3.5      | Продуктивність барабанних млинів.....   | 202        |
| 3.5.1    | Фактори, що впливають на продуктивність барабанних млинів.....                      | 202        |
| 3.5.2    | Розрахунок продуктивності барабанних млинів.....                                    | 205        |
| 3.6      | Моделювання процесів у проточній і розвантажувальній частині барабанного млина..... | 209        |
| 3.6.1    | Модель руху матеріалу в проточній частині барабанного млина.....                    | 209        |
| 3.6.2    | Математична модель проходження матеріалу через розвантажувальні ґрати млина.....    | 215        |
| 3.6.3    | Основи кінетики матеріалу в розвантажувальній частині барабана млина.....           | 219        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.6.4. Математичні моделі електроспоживання дробильно-збагачувальних фабрик.....   | 226        |
| 3.6.5. Експериментальна перевірка теоретичних викладок і впровадження основних науково-технічних розробок у промисловість..... | 229        |
| <b>3.7. Конструкція і напружений стан барабанів млинів.....</b>  | <b>234</b> |
| 3.7.1. Вплив ребер жорсткості на величину і характер розподілу напруги в барабані млина.....                                   | 234        |
| 3.7.2. Визначення залишкової напруги.....  | 235        |
| 3.7.3. Дослідження напруги від динамічних навантажень в промислових умовах.....  | 236        |
| 3.7.4. Промислове освоєння нових науково-технічних розробок по конструкції барабанних млинів.....                              | 240        |
| <b>4 Монтаж і технічне обслуговування млинів.....</b>  | <b>245</b> |
| 4.1 Млин самоподрібнення ММС-70-23.....  | 245        |
| 4.1.1. Устрій і робота складових частин млинів.....  | 246        |
| 4.1.2. Підшипники барабана.....  | 247        |
| 4.1.3. Завантажувальний пристрій.....  | 248        |
| 4.1.4. Головний привод.....  | 249        |
| 4.1.5. Пристосування і інструмент.....   | 249        |
| 4.1.6. Монтаж і обкатка млина.....   | 251        |
| 4.1.7. Задача в експлуатацію і технічне обслуговування млина   | 258        |
| 4.2 Млин мокрого самоподрібнення ММС-90-30А .....  | 262        |
| 4.2.1. Призначення, область застосування і принцип роботи млина.....   | 262        |
| 4.2.2. Конструкція основних вузлів млина.....  | 264        |
| 4.2.3. Система мащення млина.....  | 268        |
| 4.2.4. Електроустаткування млина.....  | 269        |
| <b>5. Створення дезінтеграторів відцентрового типу.....</b>  | <b>270</b> |
| 5.1. Деякі теоретичні аспекти роботи відцентрових дезінтеграторів.....   | 270        |
| 5.2. Розрахунок продуктивності і потужності відцентрового дезінтегратора.....  | 275        |
| 5.3. Демпфуюча підвіска розгінного ротора відцентрового дезінтегратора.....  | 277        |
| 5.4. Розробка нових конструкцій відцентрових дезінтеграторів .....   | 282        |
| 5.5 Технологічні випробовування нової конструкції дезінтегратора.....  | 284        |
| 5.6. Відцентровий дезінтегратор ЦД-50 продуктивністю 50-100 т/ч.....   | 286        |
| 5.6.1 Особливості конструкції дезінтегратора.....  | 286        |
| 5.6.2. Дослідження технологічних параметрів роботи дезінтегратора .....  | 278        |
| 5.6.3. Енергетичні параметри роботи дезінтегратора.....  | 288        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.7. Вплив способу дроблення на показники збагачувального переділу .....                      | 290        |
| 5.8. Науково-технічні основи створення нових конструкцій відцентрових дезінтеграторів .....   | 291        |
| 5.9. Основні результати, досягнуті при створенні відцентрових дезінтеграторів.....            | 294        |
| <b>6 Технологія підготовки корисних копалин до збагачення.....</b>                            | <b>298</b> |
| 6.1 Технологія дроблення.....   | 298        |
| 6.1.1 Схеми дроблення при підготовці руд до подрібнення....                                   | 298        |
| 6.1.2 Схеми дроблення при підготовці руд до самоподрібнення.....                              | 301        |
| 6.1.3 Вибір варіанта схеми дроблення.....   | 304        |
| 6.1.4 Схеми дроблення при підготовці руд до збагачення.....                                   | 305        |
| 6.1.5 Розрахунок схем дроблення.....  | 305        |
| 6.1.6 Вибір обладнання до схеми дроблення.....  | 308        |
| 6.1.7 Компонувальні рішення корпусів крупного дроблення..                                     | 313        |
| 6.1.8 Компонувальні рішення корпусів середнього і дрібного дроблення.....                     | 317        |
| 6.2 Технологія подрібнення.....   | 320        |
| 6.2.1 Операції класифікації в схемах подрібнення.....   | 320        |
| 6.2.2 Схеми подрібнення в стержневих і кульових млинах....                                    | 322        |
| 6.2.3 Схеми рудного самоподрібнення.....  | 325        |
| 6.2.4 Циркуляційне навантаження.....  | 327        |
| 6.2.5 Вибір схеми подрібнення.....  | 329        |
| 6.2.6 Розрахунок схем подрібнення.....  | 330        |
| 6.2.7 Вибір обладнання до схеми подрібнення.....  | 333        |
| 6.2.8 Компонувальні рішення відділень подрібнення.....  | 338        |
| <b>7 Охорона навколишнього середовища.....</b>  | <b>343</b> |
| 7.1 Діяння людини на природу.....   | 343        |
| 7.2 Шкідливі діяння підготовчих процесів на навколишнє середовище.....                        | 344        |
| 7.3 Заходи щодо боротьби з шкідливими діяннями у підготовчих цехах збагачувальних фабрик..... | 347        |
| <b>Додаток А. Технічні характеристики грохотів.....</b>                                       | <b>349</b> |
| <b>Додаток Б. Технічні характеристики дробарок.....</b>                                       | <b>353</b> |
| <b>Додаток В. Технічні характеристики млинів.....</b>   | <b>359</b> |
| <b>Додаток Г. Технічні характеристики класифікаторів і гідроциклонів.....</b>                 | <b>361</b> |
| <b>Додаток Д. Методика розрахунку схеми дроблення.....</b>                                    | <b>363</b> |
| <b>Додаток Е. Методика розрахунку схеми подрібнення.....</b>                                  | <b>375</b> |
| <b>Список рекомендованої літератури.....</b>  | <b>385</b> |

## ПЕРЕДМОВА

Процеси дроблення, подрібнення і грохочення належать до основних операцій рудопідготовки, без яких збагачення корисних копалин неможливе.

Процес первинної переробки корисних копалин можна підрозділити на два етапи: перший – *роз'єднання* мінералів, тобто вивільнення зерен цінного мінералу від оточуючих зерен інших мінералів і пустої породи; другий – *розділення* мінералів (власне збагачення), тобто виділення вільних зерен цінного мінералу у концентрат.

Технологічне призначення операцій дроблення і подрібнення полягає у тому, щоб *розкрити* (вивільнити) мінерали, які тісно переплелися та зрощені (спаяні) між собою або (при застосуванні у подальшому гідрометалургії, хімічних методів збагачення) – *відкрити* поверхню корисного компонента, зробивши її доступною для контакту з реагентом. Відповідно розрізняють *розкриття* і *відкриття* мінералів. Крупність зерен, до якої необхідно дробити або подрібнювати матеріал перед збагаченням, визначається розміром вкраплення цінних мінералів і процесом, що прийнятий для збагачення корисної копалини.

Дроблення і подрібнення є найбільш енергоємними і дорогими процесами у циклі збагачення корисної копалини. Капітальні та експлуатаційні витрати на них можуть досягати 70 % від усіх затрат на збагачення. Тому удосконалення дробильного і подрібнювального обладнання, застосування найбільш ефективних і економічних способів і схем підготовчих операцій мають важливе значення.

У даній монографії розглянуто підготовчі процеси, що застосовуються при збагаченні корисних копалин. Викладені сучасні теоретичні уявлення про процеси дроблення, подрібнення і грохочення мінеральної сировини. Описані основні конструкції технологічного обладнання, його принцип дії і технологічні харак теристики, схеми підготовки корисних збагачення. Викладені основні методи дослідження крупності перероблюваної мінеральної сировини і базисні положення охорони навколишнього середовища.

Особлива увага приділена моделюванню процесів у проточній і розвантажувальній частині барабанного млина, питанням конструкції і напруженого стану барабанів млинів. Викладені питання теорії і практики створення дезінтеграторів відцентрового типу.

Матеріали, залучені до монографії, віддзеркалюють теоретичні і практичні результати одержані в донецькій, криворізькій і кременчуцькій наукових школах зі збагачення корисних копалин.

# 1 ГРОХОЧЕННЯ

## 1.1 Загальні відомості про процес

*Грохоченням* називається процес розділення сипкої корисної копалини на класи крупності шляхом просівання через одне або декілька сит.

Грохочення широко застосовується при переробці корисних копалин на збагачувальних фабриках і сортуванні, при виробництві будівельних матеріалів, в хімічній і інших галузях промисловості.

Продукти з точно визначеними розмірами зерен називаються *класами*. Крупність класів виражається в міліметрах і позначається числом зі знаком « + » або « - » (напр., + 50 мм; - 0,5 мм), а також двома числовими показниками, що позначають максимальний і мінімальний розміри зерен у даному класі (напр., 100 - 10 мм).

Машина і пристрої для грохочення називаються *грохотами*. Матеріал, що надходить на грохочення, називається *вихідним* або *живленням*, а продукти грохочення *класами крупності* (сукупність частинок матеріалу, обмежених верхнім і нижнім розмірами). Матеріал, що залишився на ситі, називається *надRESHITним продуктом*; матеріал, що пройшов через отвори сита, - *підRESHITним продуктом* (рис. 1.1).

Клас, використовуваний як готовий товарний продукт, називається *сортом*.

За *крупністю найбільших зерен (грудок)* у вихідному матеріалі і необхідних класів крупності розрізняють грохочення: *крупне* (до 1200 мм) - на класи від -300 до +100 мм; *середнє* (до 350 мм) - на класи від -60 до +25 мм; *дрібне* (до 75 мм) - на класи від -25 до +6 мм; *тонке* (до 10 мм) - на класи від -5 до +0,5 мм; *особливо тонке грохочення* (до 0,045 мм). Наведені межі крупності умовні. Розділення частинок розміром 1 мм - 40 мкм здійснюють, як правило, класифікацією.

За *технологічним призначенням* розрізняють п'ять видів операції грохочення:

- *самостійне* - для виділення класів, які являють собою готові товарні продукти (сорти), цю операцію також називають механічним сортуванням;

- *підготовче* - для розділення матеріалу, що переробляється, на класи крупності, призначені для подальшої роздільної переробки (наприклад, перед збагаченням гравітаційними процесами);

- *допоміжне* - застосовують у схемах дроблення для виділення готового за крупністю продукту перед дробарками (попереднє грохочення) і для контролю крупності дробленого продукту (контрольне грохочення);



- *зневоднююче* – для видалення основної маси рідини, що міститься в матеріалі, який переробляється, а також для відділення суспензії, знешламлення;

- *вибіркове* – застосовується в тих випадках, коли різні класи корисної копалини відрізняються за якістю. Цей вид грохочення можна також назвати операцією збагачення за крупністю.

В залежності від середовища, в якому здійснюють технологічну операцію, розрізняють *сухе* і *мокре* грохочення.

За послідовністю виділення класів крупності розрізняють такі види грохочення: 1) від дрібного до крупного (рис. 1.1 *а*); 2) від крупного до дрібного (рис. 1.1 *б*); 3) комбінований (рис. 1.1 *в*).

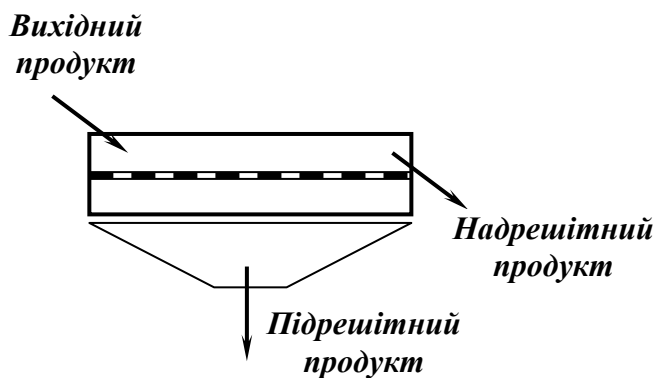
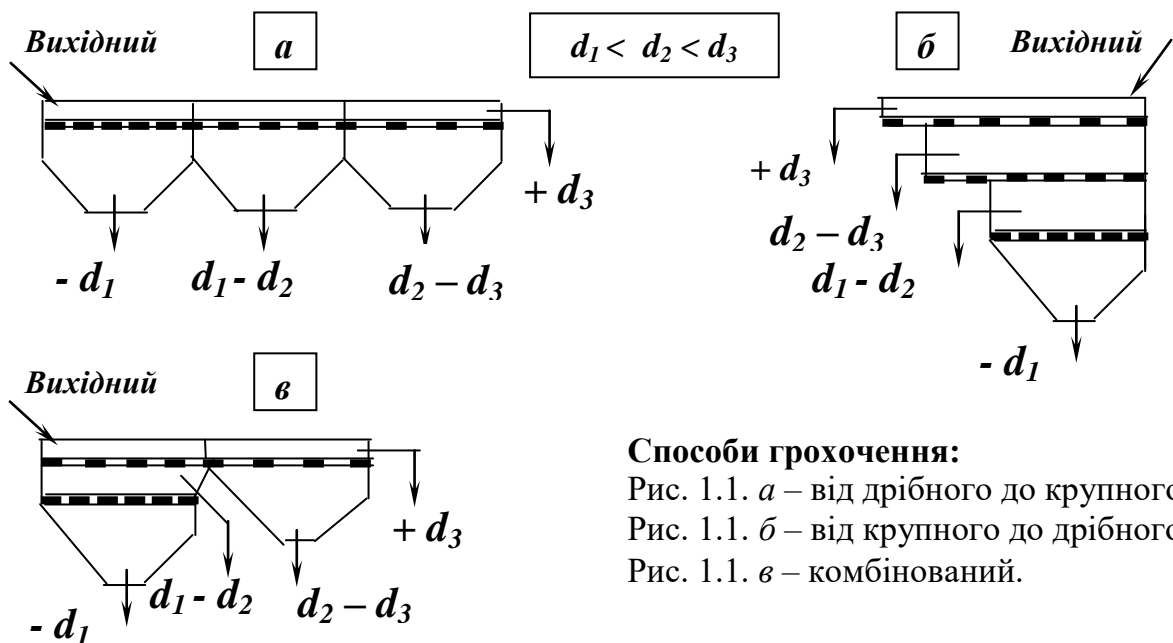


Рис. 1.1 – Схема процесу грохочення.



**Способи грохочення:**

Рис. 1.1. *а* – від дрібного до крупного;  
 Рис. 1.1. *б* – від крупного до дрібного;  
 Рис. 1.1. *в* – комбінований.

Схема грохочення “від дрібного до крупного” забезпечує добре спостереження за всіма ситами, зручну їх заміну, великий фронт розвантаження продуктів грохочення. До числа недоліків цієї схеми відносять: знижену ефективність грохочення дрібних класів, тому що крупні грудки частково перекривають найбільш дрібні отвори сит; швидкий знос сит із дрібними отворами, тому що вони розташовані на

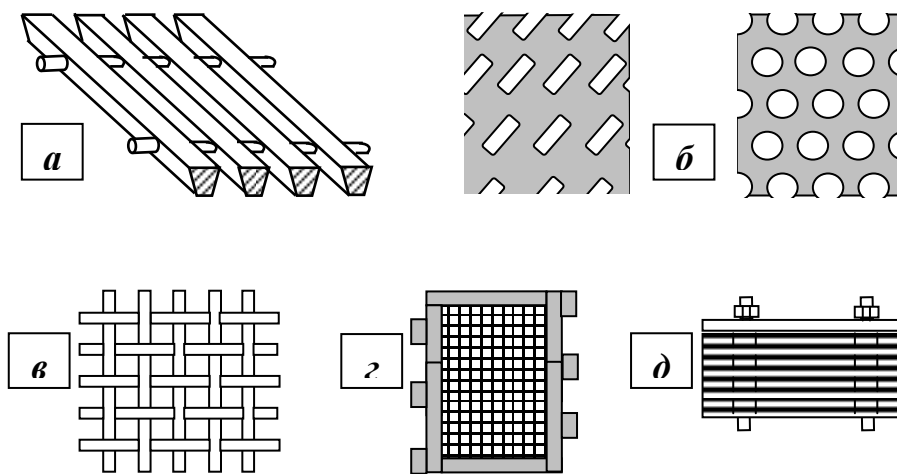
початку грохота, куди надходить уся маса вихідного матеріалу; підвищене подрібнення крупних класів.

При грохоченні за *схемою “від крупного до дрібного”* сита розташовують одне під одним. Верхнє сито має більші отвори, нижнє – дрібні. Переваги такої схеми грохочення: компактне розташування сит, при якому менше зношуються дратові сита в результаті попереднього відсівання крупних класів; підвищення ефективності грохочення дрібних класів і зменшення подрібнення крупних класів. Недоліки – незручність контролю стану нижніх сит, їх ремонту і заміни, а також скупчене розвантаження отриманих класів.

*Комбінована схема* грохочення за своїми перевагами і недоліками займає проміжне положення.

## 1.2. Просіюючі поверхні грохотів

Як робочі просіюючі поверхні у виробничих умовах застосовуються колосникові решітки, штамповані решітки, дратяні і гумові сита (рис. 1.2).



**Рис.1.2. – Просіюючі поверхні грохотів:**

**а** – колосникові решітки; **б** – штамповані решітки; **в** – сита з металевого дроту або з синтетичного волокна; **г** – литі секційні гумові або синтетичні сита; **д** – шпальтові сита для зневоднення.

Один з найважливіших параметрів, що характеризують просіюючі поверхні, є *коефіцієнт живого перетину* сита (решета) – відношення площі всіх отворів до загальної площі сита (решета):

– для сит з квадратними отворами (рис. 1.3 **а**):

$$\beta_{жс} = 100l^2 / (l + a)^2, \%; \quad (1.1)$$

– для сит з прямокутними отворами (рис. 1.3 б):

$$\beta_{жс} = 100lb / [(l + a)(b + a)], \% \quad (1.2)$$

– для сит з круглими отворами, що розташовані у шаховому порядку (рис. 1.3 в):

$$\beta_{жс} = 0,905d^2 / (d + a)^2, \% \quad (1.3)$$

Розміри сит (решіт) наведені на рис. 1.3.

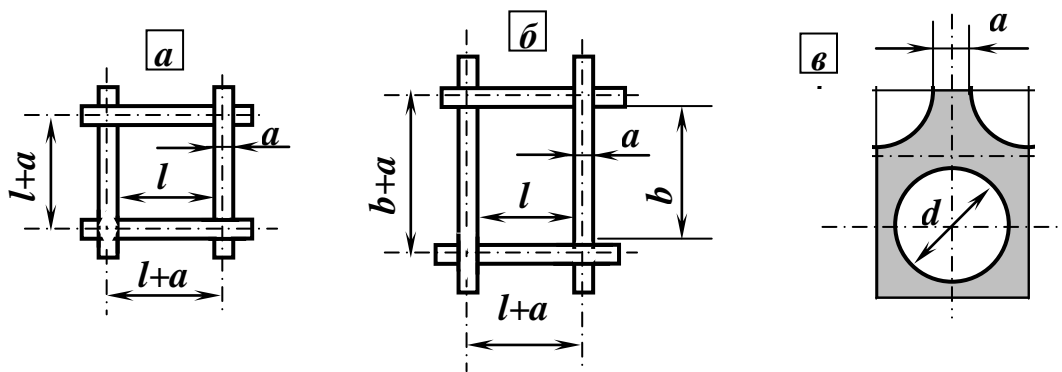


Рис. 1.3 – Форма отворів сит.

*a* – квадратна; *б* – прямокутна; *в* – кругла.

Колосникові сита збирають з колосників, розташованих паралельно і скріплених між собою. Колосники можуть мати різний профіль (рис. 1.4), але кращим вважається трапецієвидний, тому що при проходженні через щілину, що розширюється, зерна матеріалу в ній не заклинюються.

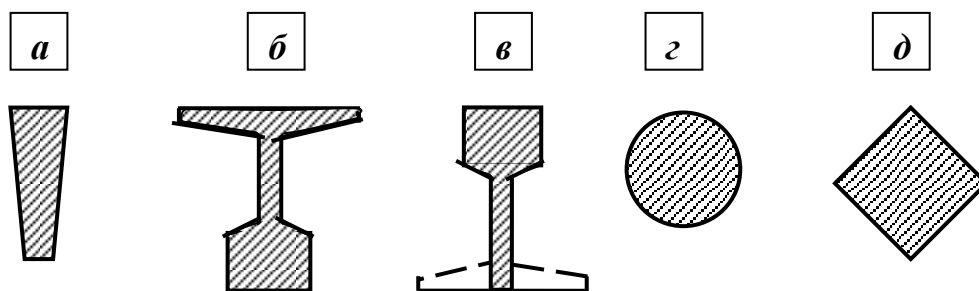


Рис. 1.4 – Профілі колосників.

*a* – трапецієвидний; *б* – рейка підшоною у верх; *в* – рейка зі зрізаною підшоною; *г* – круглий; *д* – квадратний.

Колосникові решітки застосовують для підготовчого грохочення – виділення крупних класів при відстані між колосниками не менше 50 мм.

На рудних збагачувальних фабриках колосникові решітки установлюються перед дробарками крупного дроблення для відділення матеріалу крупністю менше 200 – 300 мм. Оскільки на колосникову решітку надходить руда крупністю до 1000 – 1200 мм, колосники виготовляють з двотаврових балок та захищають їх плитами з марганцевистої сталі. Матеріал по сити переміщується під дією сили ваги, тому кут нахилу сита повинен бути 30 – 45°, а при підвищеній вологості матеріалів на 5–10° більше. Недолік колосникових сит – відносно малий коефіцієнт живого перетину (40-70%). Перевага – простота конструкції, надійність роботи.

*Штамповані сита* з листової сталі застосовуються для попереднього грохочення при просіванні по крупності від 5 до 150 мм. Решета виготовляються із сталевих листів методом штампування (марки сталі Ст. 3, X18H9T, X17H13M3T). Отвори в решетах можуть мати круглу, квадратну, прямокутну або овальну форму і розташовуватися в шаховому порядку або «у ялинку». Для забезпечення міцності решета товщина листа приймається:

– при діаметрі отворів  $d \leq 20$  мм:

$$b = (0,25 \div 0,60)d, \text{ мм}; \quad (1.4)$$

– при діаметрі отворів  $d > 20$  мм:

$$b = (0,10 \div 0,25)d, \text{ мм}. \quad (1.5)$$

Перевага сталевих решіт – висока зносостійкість (4–6 місяців), а решіт з литої гуми – у 10–20 разів більше. Гумові сита стійкі до корозії, стирання, мають низьку засмічуваність. Недолік решіт – малий коефіцієнт живого перетину: штамповані решітки 50 – 70 %, литі секційні гумові або синтетичні сита 40 – 70 %.

На вуглезбагачувальних фабриках знаходять застосування *гумові сита струнного типу* (рис. 1.5). Струнні сита призначені для грохочення вологих сипких матеріалів.

Сито струнного типу складається з гумового шнура **1**, підтримуючих планок **2**, хомутиків **3** і кріпильного пристрою **4** для кріплення підтримуючих планок на жорстких зв'язках **5** короба **6**. Гумовий шнур кріпиться на грохоті у поперечному напрямі за допомогою пристрою **4**.

Підтримуючі планки призначені для фіксації струн на грохоті. Струни закріплюються хомутами в отворах підтримуючих полиць. Кромки отворів розвальцьовуються. Гумовий шнур виготовляють з гуми марки IP52a діаметром 6,5; 10; 12; і 15 мм. Діаметр шнура приймається

залежно від крупності матеріалу, що відсівається. Так для відсіву матеріалу крупністю 0 – 6 мм застосовують шнур діаметром 6,5 мм, а для відсіву матеріалу крупністю 0 – 50 мм – шнур діаметром 15 мм.

Переваги струнних сит – стійкість до корозії і стирання, низька засмічуваність.

Сита бувають ткані, плетені, струнні і шпальтові. Ткані і плетені сита виготовляють із квадратними і прямокутними отворами розміром від 0,04 до 100 мм зі сталевого, латунного, бронзового, мідного чи нікелевого дроту. Виготовляють також гумові, капронові і капросталеві сита.

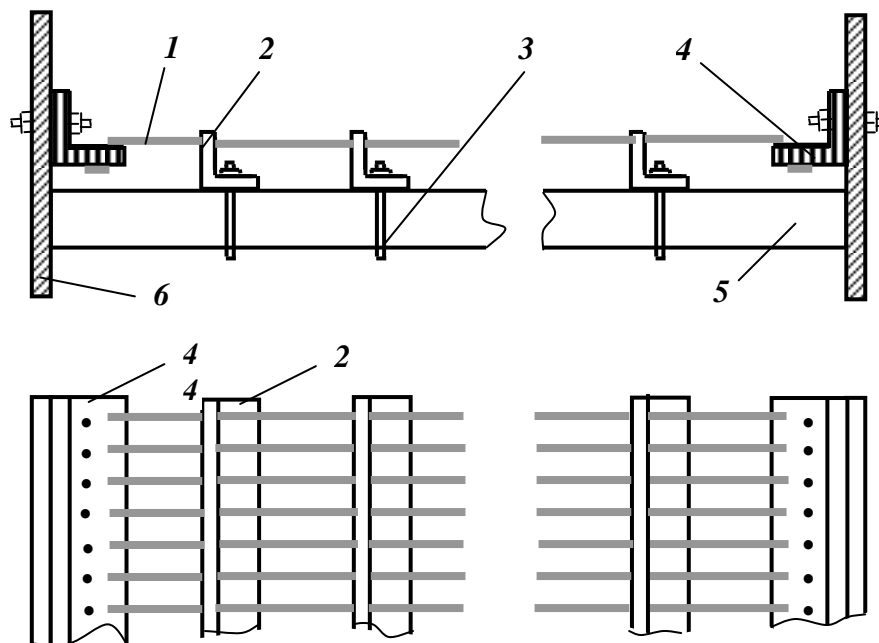


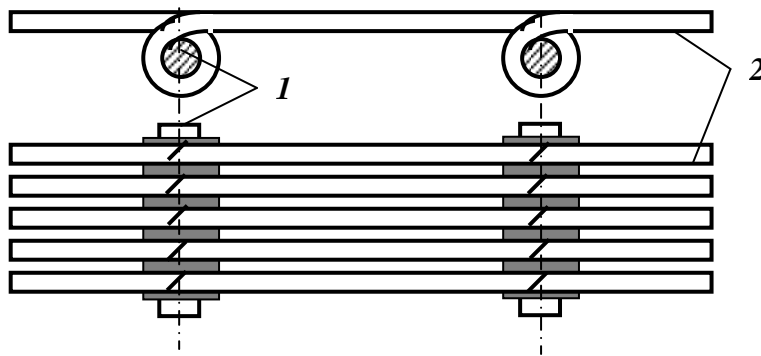
Рис. 1.5 – Гумове сито струнного типу.

1 – гумовий шнур; 2 – підтримуючі планки; 3 – хомутики; 4 – кріпильний пристрій; 5 – жорсткі зв'язки; 6 – короб грохота.

Коефіцієнт живого перетину дротяних сит 40-60 % (окремі – до 74%). Перевага – мала маса. Недолік – швидкий знос дроту. Дротяні сита застосовують для грохочення середніх і дрібних класів корисних копалин.

Шпальтові щілясті сита набирають із дроту трапецієвидного перетину (рідше круглого). Ширина щілястих отворів може бути 0,1-16 мм. Сита виготовляють з латуні, нержавіючої і низьковуглецевої сталі.

Щілинні сита (рис. 1.6) збирають з окремих дротяних колосників трапецієвидного перетину. Дротяні колосники скріплюють з'єднувальними шпильками діаметром 8 – 12 мм, що розташовані на відстані 80 – 120 мм.



**Рис. 1.6 – Щілинна сітка.**  
**1 – шпильки;**  
**2 – колосники.**

Щілинні сита міцні, але мають малий коефіцієнт живого перетину (від 9 до 40 %). Шпальтові сита призначені для виділення дрібних класів і зневоднювання.

Термін служби шпальтових сит з нержавіючої сталі складає 2–3 місяці.

### **1.3. Гранулометричний склад корисних копалин**

#### **1.3.1. Способи визначення гранулометричного складу**

Корисні копалини, які після видобутку у шахті або руднику надходять на збагачувальну фабрику, а також продукти їхньої переробки являють собою суміші мінеральних зерен різного розміру і форми. Розміри мінеральних зерен коливаються від декількох мікрон до сотень міліметрів. Співвідношення масових вмістів зерен різної крупності, що входять до складу корисної копалини, називається її *гранулометричним складом*. Для визначення гранулометричного складу найчастіше застосовують ситовий аналіз, але одночасно з ним використовують метод безпосереднього вимірювання розмірів зерен, седиментаційний, електрооптичний, світлової дифракції, фотометричний та інші.

*Класом крупності* називається сукупність частинок мінералу, обмежених верхнім та нижнім граничними розмірами.

*Седиментаційний аналіз* – процес послідовного виділення з водної зависі частинок різної крупності за швидкістю їх вільного падіння (осадження) з метою одержання характеристики крупності тонкодисперсного матеріалу. Седиментаційний аналіз застосовується для визначення гранулометричної характеристики матеріалу крупністю не більше 0,074 мм.

*Мікроскопічний аналіз* – вимірювання частинок під мікроскопом і класифікація їх на групи у вузьких границях визначених розмірів. Мікроскопічний аналіз застосовується для визначення гранулометричної характеристики матеріалу крупністю від 50 мкм до часток мікрона.

Концентрацію частинок в пробі можна визначити на

*фотоелектрокалориметрі*, показання якого заздалегідь відградуєвані. Кількість матеріалу, що випав в осад обчислюють як різницю між масою вихідної наважки і масою частинок в пробі. Для побудови кривої осадження необхідно отримати дані про кількість осаду не менше ніж при 6 – 7 експериментах з різною тривалістю центрифугування.

*Метод безпосереднього вимірювання розмірів зерен* застосовується звичайно для складання гранулометричної характеристики матеріалу крупністю вище 150 – 200 мкм. Оскільки зерна корисної копалини мають неправильну форму, їхня крупність може бути охарактеризована декількома розмірами, але для практичних цілей бажано мати один розмір – діаметр зерен.

Для визначення діаметра  $d$  зерен близьких за формою до кубу або кулі достатньо одного розміру. Обчислення діаметра зерен близьких за формою до кулі виконується за формулою:

$$d = b, \text{ мм.} \quad (1.6)$$

Обчислення діаметра зерен близьких за формою до кубу виконується за формулами:

$$d = b\sqrt{2}, \text{ мм,} \quad (1.7)$$

$$d = b\sqrt{3}, \text{ мм,} \quad (1.8)$$

де  $b$  – розмір зерна в одному напрямку, мм.

Для визначення діаметра  $d$  зерен, що мають форму паралелепіпеда або пластинки, їх необхідно виміряти в двох або трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Обчислення діаметра зерен з квадратним перетином виконується за формулами:

$$d = (a + b) / 2, \text{ мм,} \quad (1.9)$$

$$d = \sqrt{ab}, \text{ мм,} \quad (1.10)$$

де  $a, b$  – розміри зерна у двох взаємно перпендикулярних напрямках, мм.

Обчислення діаметра зерен, що мають різні розміри у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, виконується за формулами:

$$d = (a + b + c) / 3, \text{ мм,} \quad (1.11)$$

$$d = \sqrt{abc}, \text{ мм,} \quad (1.12)$$

де  $a, b, c$  – розміри зерна у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Розмір зерен неправильної форми оцінюється *еквівалентним діаметром*  $d_e$ , тобто діаметром кулі, рівновеликої за об'ємом реальному зерну довільної форми:

$$d_e = 1,24(m/\delta)^{0,33}, \text{ мм}, \quad (1.13)$$

де  $m$  – маса зерна, кг;  $\delta$  – густина зерна, кг/м<sup>3</sup>.

При необхідності визначення середнього діаметра зерен в суміші використовують формули:

$$d_{cp} = (d_1 + d_2) / 2, \text{ мм}, \quad (1.14)$$

$$d_{cp} = \sqrt{d_1 d_2}, \text{ мм}, \quad (1.15)$$

де  $d_1, d_2$  – діаметр найбільшого та найменшого зерна в суміші, мм.

На практиці середньозважений діаметр зерен частіше за все визначають за формулою:

$$d_{cp} = \sum \gamma_i d_i / \sum \gamma_i, \quad (1.16)$$

де  $\gamma_i$  – виходи окремих класів, %;  $d_i$  – середні діаметри зерен окремих класів, мм.

При масових визначеннях розмірів зерен (наприклад, при грохоченні) за їхній діаметр приймають розмір найменшого квадратного отвору сита, через яке це зерно проходить. Крупність усієї маси сипучого матеріалу оцінюють за вмістом в ній класів визначеної крупності, тобто за її гранулометричним складом. Визначення гранулометричного складу сухих матеріалів найбільш часто здійснюється ситовим аналізом.

### 1.3.2. Ситовий аналіз

Ситовий аналіз – операція розділення проби матеріалу за крупністю на ряд класів, які характеризуються найбільшими і найменшими розмірами зерен, що містяться в них. Ситовий аналіз застосовується для визначення виходів окремих класів в корисній копалині, при цьому також визначається вміст у класах досліджуваних компонентів.



Розділення проби на класи виконується ретельним просіюванням крізь набір сит з визначеними розмірами отворів. Ситовий аналіз застосовується для дослідження матеріалів крупністю від 150 – 200 мм до 0,074 (0,043) мм. Гранулометричний склад матеріалу крупністю менше 0,074 (0,043) мм звичайно виконується за допомогою седиментаційного аналізу. Для ситового аналізу застосовуються контрольні сита із металевих або синтетичних сіток з квадратними отворами. Набір сит для розсіву руд включає сита з розмірами отворів 60; 40; 30; 20; 10; 5; 2,5; 1 мм; для розсіву вугілля – 150; 100; 50; 25; 13; 6; 3; 1; 0,5 мм. Для розсіву дрібних матеріалів використовують контрольні сита з розмірами чарунок 1,6; 1,25; 0,8; 0,56; 0,4; 0,28; 0,2; 0,14; 0,1; 0,071; 0,045 мм, а для аналізу з підвищеною точністю – з розмірами чарунок 0,071; 0,063; 0,56; 0,05; 0,045 мм.

Достовірність характеристики матеріалу за крупністю залежить від маси проби, способу її відбору і точності ситового аналізу. Залежно від потрібної точності аналізу та вологості матеріалу ситовий аналіз може виконуватись сухим або мокрим способом.

При невисокій вологості матеріалу, а також якщо не потрібна особлива точність, застосовують сухий спосіб розсіву.

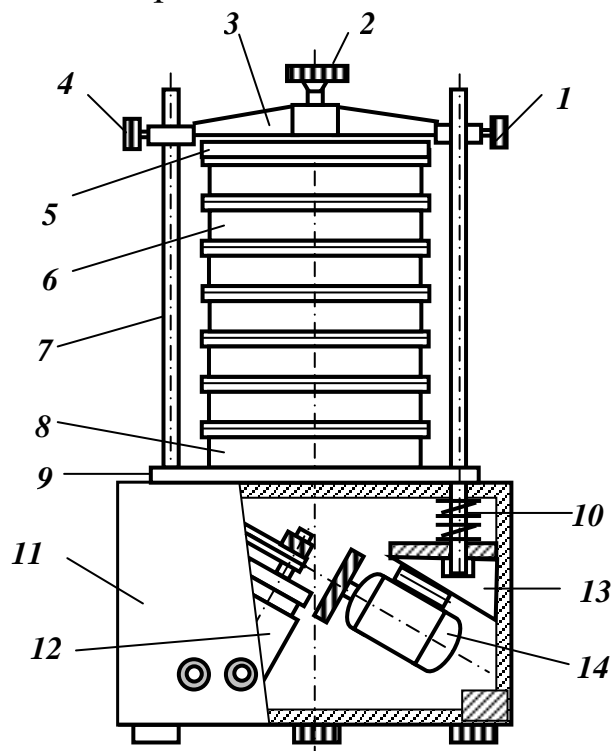
При підвищеній вологості матеріалу крупністю 0 – 13 мм, що утруднює розсів сухим способом, пробу попередньо підсушують. Втрати маси розподіляють пропорційно виходам окремих класів одержаних при розсіві. Крупні класи не сушать.

При наявності у пробі значної кількості дріб'язку і необхідності підвищеної точності аналізу пробу розсівають мокрим способом. Для цього пробу засипають на сито з найменшими розмірами чарунок (напр., 0,074 мм) і відмивають шлам слабим струменем води або зануренням у бак з водою. Промивка триває до того часу поки промивна вода не стане прозорою. Залишок на ситі висушують, зважують і за різницею мас визначають масу відмитого шламу. Висушений залишок розсівають сухим способом із застосуванням набору сит, що включає й найбільш дрібне сито, на якому відмивався шлам. Підрешітний продукт цього дрібного сита додають до одержаної раніше маси відмитого шламу.

Ситовий аналіз крупних матеріалів виконується на грохотах лабораторного типу. Розсів дрібних класів (крупністю до 6 мм) здійснюється на струшувачах різних конструкцій. Найбільше застосування знайшли механічні струшувачі, що надають набору сит кругові коливання у горизонтальній площині та струшування. Але механічні струшувачі поступово витісняються більш досконалими і простими електромагнітними вібраційними струшувачами. Ці струшувачі мають регульовану частоту і амплітуду коливань. Для

мокрого розсіву на струшувачі матеріалів, що трудно просіюються, розроблені кришки, сита і піддони, до яких можна прикріпити форсунки-бризкала і підвести до них воду.

Ситовий вібраційний аналізатор призначений для розсіву проб сипких матеріалів сухим та мокрим способами, а також для визначення їх гранулометричного складу з використанням стандартного набору сит наведений на рис. 1.7.



**Рис. 1.7 – Схема ситового вібраційного аналізатора.**  
**1, 2, 4 – кріпильні гвинти;**  
**3 – траверса;**  
**5 – кришка;**  
**6 – набір сит;**  
**7 – стійки;**  
**8 – піддон;**  
**9 – опора;**  
**10 – пружини;**  
**11 – корпус;**  
**12, 14 – електродвигуни;**  
**13 – кронштейни.**

Аналізатор складається з корпусу **11**, усередині якого на кронштейнах **13** розташовані електродвигуни **12** і **14**, а зверху на чотирьох пружинах **10** – опора **9** з двома стійками **7**. Набір сит **6** з піддоном **8** та кришкою **5** установлений на опору **9** притискується траверсою **3** та закріплюється гвинтами **1, 2** і **4**.

Сита отримують коливання від двох дебалансних вібраторів, що розташовані на опорі **9** (у середині корпусу) та приводяться в обертання через клиноремінну передачу. Реле часу служить для автоматичного відключення аналізатора по закінченні тривалості розсіву.

Необхідна кількість сит (завантажується верхнє сито) обумовлюється технологічними вимогами. При мокрому розсіві в комплекті сит установлюється кришка і піддон з штуцерами для подачі чистої води та відводу пульпи з нижнім класом досліджуваного матеріалу.

Розсів матеріалу залежно від крупності і вологості продовжується 10 – 30 хв. (дрібний та вологий матеріал вимагає більшого часу розсіву). Розсів вважається закінченим, якщо при контрольному просіванні протягом 1 хв. маса матеріалу, що пройшов крізь сито, не буде перевищува-

ти 1 % маси матеріалу, який залишився на ситі. Усі класи зважують і визначають їх вихід у відсотках. Втрати при розсіві, які не перевищують 1 % маси вихідної проби, розподіляють пропорційно виходам кожного класу. Втрати більше 1 % не допускаються. Дані розсіву проби та хімічного аналізу окремих класів оформлюють у вигляді табл. 1.1.

Графічно результати ситового аналізу оформлюють у вигляді сумарної характеристики крупності по «+  $d$ » (сумарний залишок матеріалу на ситах) або по «- $d$ » (сумарна кількість просіяного матеріалу). Для побудови характеристик крупності (рис. 1.8) на осі ординат відкладають сумарний вихід, а на осі абсцис – розмір отворів сит або діаметр зерен у міліметрах.

**Таблиця 1.1 – Результати ситового аналізу**

| Клас крупності, мм | Вихід, %   | Вміст компоненти, % | Сумарний вихід, %                           |   |
|--------------------|------------|---------------------|---|---|
|                    |            |                     | по «+ $d$ »                                 | по «- $d$ »                                 |
| 1                  | 2          | 3                   | 4   | 5   |
| + $d_1$            | $\gamma_1$ | $\beta_1$           | $\gamma_1$                                  | 100,0                                       |
| - $d_1$ + $d_2$    | $\gamma_2$ | $\beta_2$           | $\gamma_1 + \gamma_2$                       | $\gamma_5 + \gamma_4 + \gamma_3 + \gamma_2$ |
| - $d_2$ + $d_3$    | $\gamma_3$ | $\beta_3$           | $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$            | $\gamma_5 + \gamma_4 + \gamma_3$            |
| - $d_3$ + $d_4$    | $\gamma_4$ | $\beta_4$           | $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4$ | $\gamma_5 + \gamma_4$                       |
| - $d_4$ + $d_5$    | $\gamma_5$ | $\beta_5$           | 100,0                                       | $\gamma_5$                                  |
| Разом              | 100,0      | $\beta_{cp}$        | –   | –   |

Як видно з табл. 1.1, розрахунок сумарного виходу по «+ $d$ » виконується послідовним підсумовуванням виходів класів зверху вниз, а розрахунок сумарного виходу по «- $d$ » – послідовним підсумовуванням виходів класів знизу вгору. Найчастіше застосовуються сумарні характеристики крупності по «+ $d$ ». Сумарна характеристика крупності по «+ $d$ » будується за даними колонок 1 і 4 табл. 1.1.

За характеристикою крупності, побудованою по «+ $d$ » можна визначити вміст будь-якого класу в досліджуваному матеріалі, розмір середнього і максимального зерен.

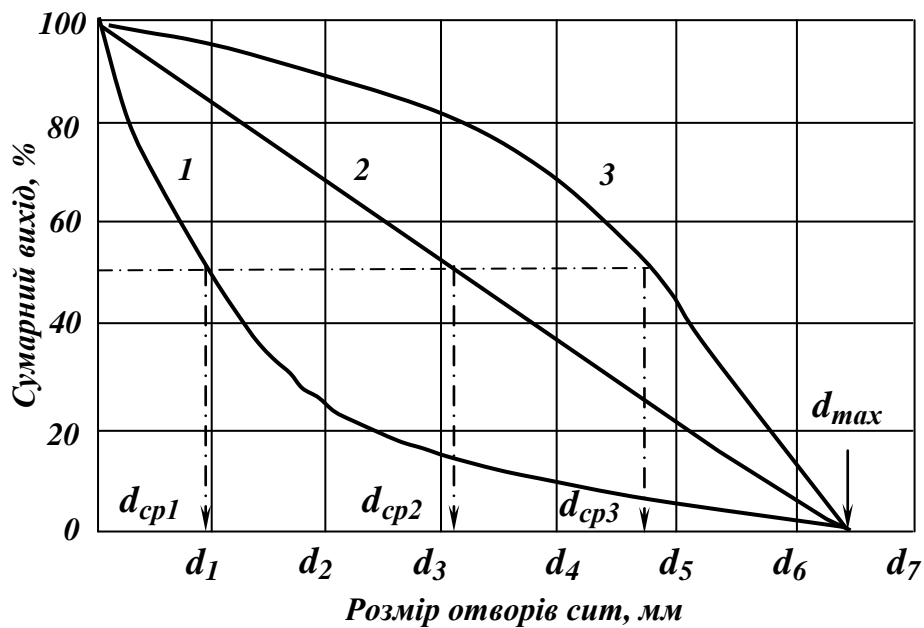


Рис. 1.8 – Сумарні характеристики крупності.

Вигляд сумарної характеристики крупності вказує на переваги тих або інших класів у досліджуваному матеріалі. Увігнута крива **1** вказує на переважання у суміші дрібних зерен, опукла крива **3** – на переважання крупних зерен, прямолінійна залежність **2** – на рівномірний розподіл класів крупності.

При побудові сумарних характеристик у широкому діапазоні крупності зерен досліджуваного матеріалу відрізки на осі абсцис виходять дуже малого розміру, що утруднює використання кривих. Щоб уникнути цього недоліку, сумарні характеристики крупності будують в напівлогарифмічній або логарифмічній системі координат.

Напівлогарифмічні сумарні характеристики крупності (рис. 1.9) будуються в системі координат  $\gamma_{\text{сум}} = f(\lg d)$ .

Перевага напівлогарифмічної кривої в порівнянні із звичайною полягає у тому, що відстані між сусідніми значеннями отворів сит на осі абсцис в області дрібних зерен збільшуються, а в області крупних – зменшуються. Це дозволяє правильно визначати виходи дрібних класів при звичайному розмірі графіка.

Якщо набір сит для ситового аналізу має постійний модуль, побудова напівлогарифмічної кривої спрощується, тому що відрізки на осі абсцис будуть однакової довжини. Для сит з постійним модулем **M** різниця між логарифмами розмірів отворів суміжних сит наведена в табл. 1.2.

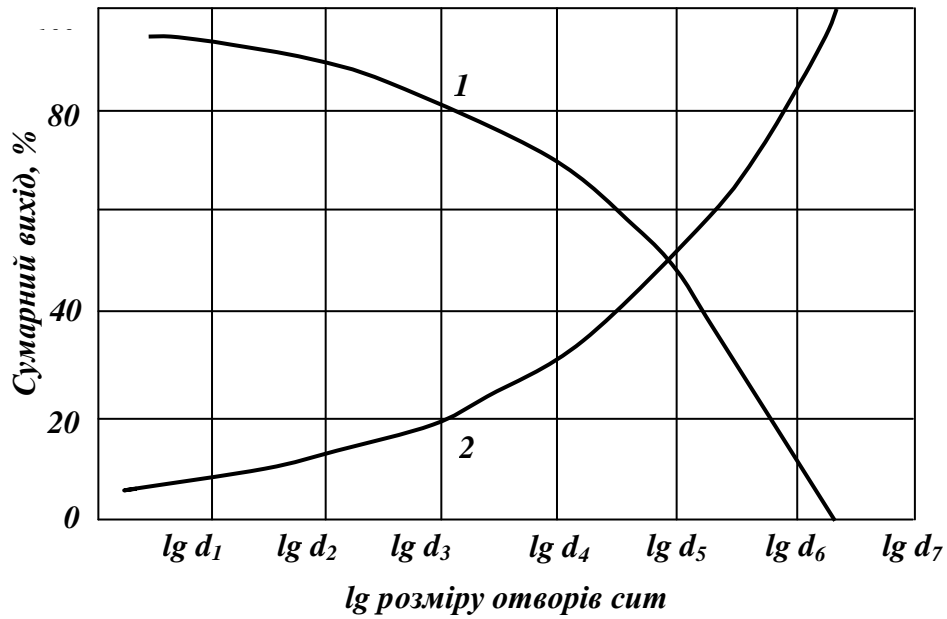


Рис. 1.9 – Напівлогарифмічні сумарні характеристики крупності.  
 1 – сумарна характеристика по «+d»;  
 2 – сумарна характеристика по «-d».

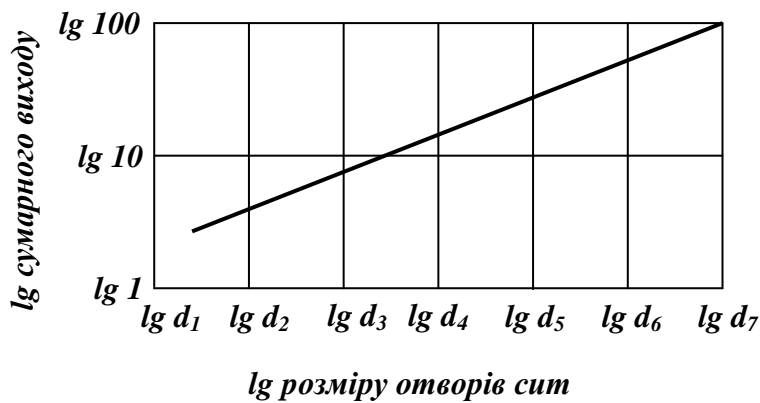
Таблиця 1.2 – Різниця між логарифмами розмірів суміжних сит

| Розміри отворів сит | Логарифми розмірів отворів сит | Різниця між логарифмами розмірів отворів суміжних сит |
|---------------------|--------------------------------|---|
| $l_1$               | $\lg l_1$                      | $(\lg l_1 + \lg M) - \lg l_1 = \lg M$                 |
| $l_1 M$             | $\lg l_1 + \lg M$              | $(\lg l_1 + 2 \lg M) - (\lg l_1 + \lg M) = \lg M$     |
| $l_1 M^2$           | $\lg l_1 + 2 \lg M$            | $M$   |

Кожний відрізок на осі абсцис між сусідніми ситами дорівнює  $\lg M$ . При побудові характеристики за  $\lg M$  можна прийняти будь-який відрізок. На відміну від звичайних кривих сумарної характеристики крупності ліва гілка напівлогарифмічних кривих не досягає до ординати, що відповідає виходу 100%, тому що цьому виходу по осі абсцис відповідає  $\lg 0 = -\infty$ .

Логарифмічна сумарна характеристика крупності будується в системі координат  $\lg \gamma_{\text{сум}} = f(\lg d)$ .

Для дроблених та подрібнених мономінеральних порід логарифмічна характеристика, побудована по «-d», в більшості випадків прямолінійна (рис. 1.10). Логарифмічна характеристика дозволяє встановити закономірність розподілу в матеріалі зерен за крупністю.



**Рис. 1.10** – Логарифмічна сумарна характеристика крупності по « $-d$ ».

За логарифмічною кривою можна визначити вихід класів будь-якої крупності таким же способом, як і за звичайною. Нахил прямолінійної відрізка кривої дозволяє судити про вміст у матеріалі дрібніших класів: чим більше кут нахилу, тим менше вміст дрібних зерен.

### 1.3.3. Рівняння характеристик крупності

Якщо сумарна характеристика крупності по « $-d$ » в логарифмічній системі координат має вид прямої, то рівняння, що її описує, можна представити так:

$$\lg(100 - R) = k \lg d + \lg A, \quad (1.17)$$

де  $R$  – сумарний залишок на ситі з розміром чарунок  $d$ ;  $k$  – коефіцієнт, що дорівнює тангенсу кута нахилу прямої;  $\lg A$  – відрізок, що відсікається прямою на осі ординат.

Потенціювання рівняння (1.17) приводить до *рівняння Годена-Андрєєва*:

$$100 - R = Ad^k, \quad (1.18)$$

Коефіцієнт  $k$  визначає напрямок і ступінь вигину сумарної кривої характеристики крупності матеріалу, тобто дозволяє судити про переважання в матеріалі крупних або дрібних зерен.

При максимальному розмірі зерна  $d = d_{\max}$  і  $R = 0$  з рівняння (1.18) одержуємо  $B = 100 / d_{\max}^k$ .

Якщо діаметр зерен матеріалу приймається у відносних одиницях (по відношенню до  $d_{\max}$ ), то рівняння (1.18) можна представити у вигляді:

$$100 - R = 100(d / d_{\max})^k, \quad (1.19)$$

Однак, рівняння (1.19) справедливе тільки для дрібних продуктів дроблення і подрібнення.

Обробка великого числа даних гранулометричних аналізів продуктів дроблення та подрібнення показала, що функціональна залежність між сумарним залишком на ситі і крупністю зерен у більшості випадків з достатньою для практики точністю описується *рівнянням Розина-Рамлера*:

$$R = 100e^{-bd^n}, \% , \quad (1.20)$$

де  $R$  – сумарний вихід класу крупніше  $d$  (по «+ $d$ »), %;  $d$  – розмір отворів сита;  $b$  і  $n$  – параметри, що залежать від властивостей матеріалу і розмірності величини  $d$ .

Параметр  $b$  непрямо характеризує вміст найдрібніших (менше 1 мкм) зерен: чим їх більше в матеріалі, тим більше  $b$ .

Параметр  $n$  характеризує ступінь увігнутості кривої сумарних залишків, побудованої у координатах  $R = f(d/d_c)$ , де  $d$  – розмір чарунок сита, мкм;  $d_c$  – розмір чарунок такого сита, на якому одержують «стандартний» залишок ( $R_c = 36,8$  %).

Рівняння характеристики крупності дозволяє визначити залежність між  $R$  і  $d$ , число зерен в будь-якому класі, площу поверхні зерен, питому поверхню та інше. Але при використанні рівняння Розина-Рамлера нульовий вихід досягається тільки при нескінченно великій крупності матеріалу, тобто  $R = 0$  при  $d = \infty$ , тому необхідно приймати кінцеву крупність матеріалу, яка відповідає якому-небудь визначеному значенню виходу класу.

#### 1.3.4. Визначення питомої мінеральної поверхні

*Питома мінеральна поверхня* – сумарна площа поверхні частинок, віднесена до одиниці об'єму або маси усього дисперсного твердого матеріалу.

У практиці досліджень гранулометричного складу дрібнодисперсної мінеральної сировини розрізняють повну та зовнішню питому поверхню.

*Зовнішня питома поверхня* – сумарна поверхня, що утворена рівними ділянками виступами та тріщинами, глибина яких менше їх ширини.

*Повна питома поверхня* – сумарна поверхня, що утворена зовнішньою і внутрішньою, яка включає глибокі тріщини, наскрізні і тупикові пори та інші дефекти мінеральних структур.

Питома поверхня порошкоподібних матеріалів характеризується дисперсним станом і необхідна для оцінки крупності і форми частинок, шорсткості поверхні, розрахунку адсорбційного покриття при дослідженні взаємодії мінералів з реагентами.

Питома поверхня мінералів змінюється у широких межах і використовується як важливий показник при оцінці степені подрібнення і ефективності сепарації різними методами.

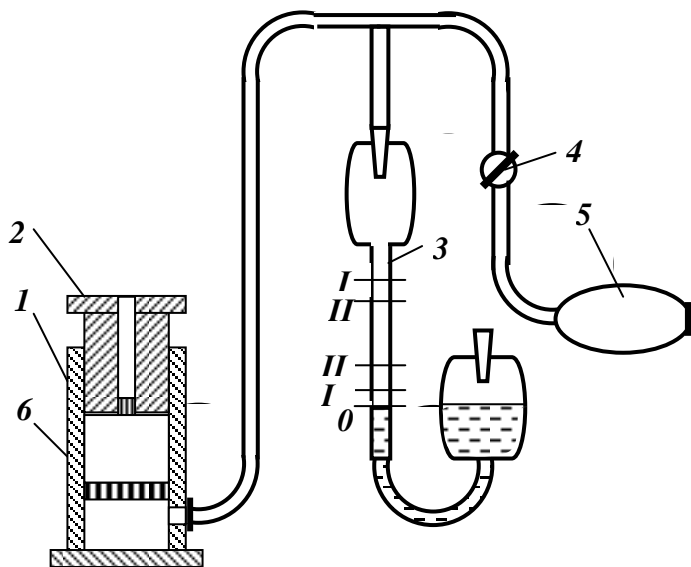
Питому поверхню визначають на сухому матеріалі. Квартуванням або квадратуванням первинної проби підготовлюють наважки масою не менше 10 г для визначення повної і не менше 100 г для визначення зовнішньої поверхні.

Метод визначення *зовнішньої питомої поверхні* оснований на залежності швидкості проходження повітря крізь шар проби від площі її поверхні (ступені дисперсності).

Для проведення досліджень застосовують прилад типу ПСХ або АДП (рис. 1.11). Пробу підготовлену до досліджень висушують у сушильній шафі до постійної маси при температурі  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . З висушеної і охолодженої проби крупністю не менше 0,01 мм підготовлюють дві наважки для визначення густини і дві наважки для визначення питомої поверхні. Маса наважки розраховується за формулою:

$$m = 3,33\delta n, \text{ кг}, \quad (1.21)$$

де  $\delta$  – дійсна густина матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n$  – коефіцієнт, що характеризує насипну густина і дисперсність матеріалу.



**Рис. 1.11 – Схема приладу для визначення зовнішньої питомої поверхні.**

- 1 – кювета;
- 2 – плунжер;
- 3 – манометр;
- 4 – кран;
- 5 – гумова груша;
- 6 – фільтр.

Для більшості високодисперсних матеріалів  $n = 1$ , для грубодисперсних  $n > 1$  (рекомендується  $n = 3$ ), для матеріалів з великою пористістю (наважка може не поміститися у кюветі)  $n < 1$  (рекомендується  $n = 0,5$ ).

На дно кювети *1* кладуть паперовий фільтр *6*, поверх нього висипають наважку і розрівнюють її. Зверху наважки поміщають другий фільтр і ущільнюють наважку плунжером *2*.



Визначають висоту шару ущільненої наважки та видаляють плунжер з кювети. Відкривають кран 4 і гумовою грушею 5 створюють такий тиск, щоб рівень води в манометричній трубці досяг нижнього краю верхньої колби. Закривають кран і секундоміром визначають час проходження меніска води в манометрі 3 між рисками I і II (при невеликій швидкості) або III і IV (при швидкому русі меніска). Під час випробувань фіксують температуру.

Зовнішню питому поверхню розраховують за формулою:

$$S_3 = KM \sqrt{t} / m, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (1.22)$$

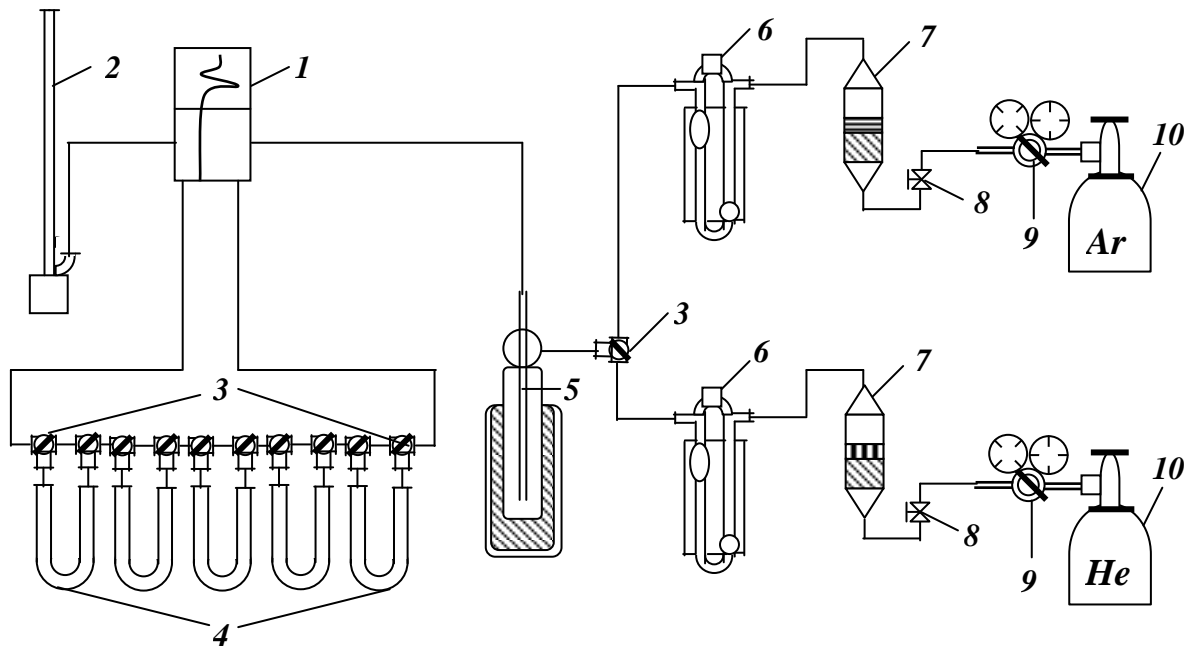
де  $K$  – постійна приладу,  $\text{кг}^{0.5} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $M$  – коефіцієнт, що залежить від висоти шару наважки та температури повітря (визначається за даними таблиці у інструкції до приладу),  $\text{кг}^{-0.5} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{с}^{0.5}$ ;  $t$  – час проходження меніска води, с;  $m$  – маса наважки, кг.

Зовнішню питому поверхню визначають на двох паралельних наважках; різниця між результатами повинна бути не більше  $5 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Якщо різниця перевищує  $5 \text{ м}^2/\text{кг}$  дослідження повторюють ще на двох наважках та за кінцевий результат приймають середнє арифметичне двох найближчих значень.

Метод визначення *повної питомої поверхні* оснований на явищі низькотемпературної адсорбції газів твердими тілами.

Установку, що зібрана за схемою рис. 1.12 і підготовлена до роботи, перевіряють на герметичність.

З висушеної при температурі  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  до постійної маси проби відбирають дві наважки масою 0,1 – 2,5 г (залежно від крупності і пористості сировини) та поміщають у адсорбери 4, вагу яких визначають попереднім зважуванням. За допомогою редуктора 9 і вентиля 8 тонкого регулювання встановлюють витрату гелію 0,015 л/хв. Пастку 5 для виморожування вологи заповнюють рідким азотом. Під адсорбери з наважками встановлюють електропіч, яку через 50 – 60 хв. при температурі  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  виключають і прибирають. Адсорбери з наважками охолоджують на повітрі до кімнатної температури і переводять установку в режим досліджень. При дослідженні встановлюють витрати гелію 0,05 – 0,055 л/хв., аргону 0,03 – 0,06 л/хв., що відповідає вмісту аргону у суміші 2 – 8 %. Загальні витрати суміші повинні бути у межах 45 – 60 л/хв. Суміш газів подають у адсорбер зі стандартним зразком.



**Рис. 1.12 – Схема установки для визначення повної питомої поверхні.**  
**1 – хроматограф; 2 – газометр; 3 – скляні триходові крани; 4 – адсорбери;**  
**5 – пастка для виморожування вологи з газів; 6 – реометри; 7 – фільтри;**  
**8 – голчасті вентиля; 9 – редуктори; 10 – балони з газом.**

Зразок на 10 – 15 с занурюють у посудину Дьюара з рідким азотом. При охолодженні відбувається адсорбція аргону на поверхні стандартного зразка, закінчення якої фіксують поверненням пера самописця у вихідне «нульове» положення. Витягнутий стандартний зразок зігрівають до кімнатної температури на повітрі. Відбувається десорбція аргону на поверхні стандартного зразка, яку записують на діаграмній стрічці самописця газового хроматографа *1*. Таким чином записують процес адсорбції-десорбції кожного підготовленого зразка.

По закінченні досліджень хроматограф виключають, газові вентиля закривають. Знімають діаграмну стрічку і вирізають записані на ній піки десорбції за контуром ліній, що їх описують. Зважують одержані піки десорбції з погрішністю не більше  $\pm 0,0001$  г та адсорбери з наважками – з погрішністю не більше  $\pm 0,001$  г.

Повна питома поверхня визначається за формулою:

$$S_n = \frac{S_1 m_1 m_2}{m_3 m_4}, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (1.23)$$

де  $S_1$  – питома поверхня стандартного зразка,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $m_1$  – маса стандартного зразка, г;  $m_2$  – маса піка досліджуваної наважки, г;  $m_3$  – маса піка стандартного зразка, г;  $m_4$  – маса досліджуваної наважки, г.

Результати розраховують з точністю до третього знаку після коми. Відхилення результатів двох вимірювань  $\Delta S$  не повинно перевищувати:

$$\Delta S = 0,03S + 0,04, \quad (1.24)$$

де  $S$  – середнє арифметичне результатів двох вимірювань.

Якщо розходження між результатами двох вимірювань перевищує це значення, дослідження повторюють ще на двох наважках і за кінцевий результат приймають середнє арифметичне двох найближчих вимірювань.

Сьогодні за кордоном випускають комп'ютеризовані автоматичні аналізатори, які забезпечують визначення повної і зовнішньої питомої поверхні сипких тонкодисперсних матеріалів.

## 1.4. Грохоти

### 1.4.1. Класифікація грохотів

Для розділення корисних копалин за крупністю застосовують грохоти різних конструкцій. Грохоти класифікують за багатьма ознаками.

За принципом дії розрізняють такі типи грохотів:

- нерухомі (колосникові, гідрогрохоти, конусні та дугові),
- з рухомими елементами:
  - з коливаннями та вібраціями робочого органу (інерційні, резонансні, плоско-хитні, гіраційні);
  - з обертальним робочим органом (барабанні та грохоти-дробарки, відцентрові, конусні самоочисні, імовірнісні);
  - з частково рухомою просіювальною поверхнею (валкові, шнекові, з пружно-деформованим ситом, з безпосереднім збудженням сита).

За розташуванням просіювальної поверхні розрізняють: похилі та горизонтальні грохоти.

Відповідно до форми просіювальної поверхні грохоти поділяють на плоскі, зі змінним кутом нахилу, дугові, конічні, циліндричні (барабанні), а також призматичні та пірамідальні.

За призначенням розрізняють: грохоти попередньої класифікації (крупність матеріалу 80–100 мм і більше); грохоти підготовчої класифікації (крупність матеріалу 3–25 мм); грохоти дешламаційні (для мокрого відокремлення дріб'язку до 0,5–1,0 мм); грохоти зневоднювальні; грохоти для розсортування (головним чином вугілля).

Залежно від густини матеріалів, які піддають розсіву, застосовують:

- грохоти легкого типу **Л** для розсіву матеріалу з насипною густиною не більше  $1,4 \text{ т/м}^3$ ,
- грохоти середнього типу **С** для розсіву матеріалу з насипною густиною не більше  $1,8 \text{ т/м}^3$ ,
- грохоти важкого типу **Т** для розсіву матеріалу з насипною густиною не більше  $2,8 \text{ т/м}^3$ .

Однак, незважаючи на конструктивні розбіжності, принцип дії у всіх грохотів однаковий – розділення за крупністю відбувається шляхом відсівання дріб'язку з матеріалу, що надходить на грохочення, при його переміщенні в розпушеному стані по просіювальній поверхні.

Грохоти мають літерне і цифрове позначення (табл. 1.3).

**Таблиця 1.3. – Умовне позначення грохотів**

| Літерні позначки |   |  | Цифрові позначки             |                     |
|------------------|---|--|------------------------------|---------------------|
| І літера         | ІІ група літер  | ІІІ літера – тип грохота                 | І цифра                      | ІІ цифра            |
| Г – грохот       | І – інерційний<br>С – самобалансний<br>ІС – інерційно-самобалансний | Л – легкий<br>С – середній<br>Т – важкий | В – ширина грохота, мм*      | Число сит:<br>1 – 3 |
|                  | Ц – циліндричний  | Л – легкий                               | 1 або 3 – модифікація        | –                   |
|                  | Б – барабанний  | –  | Д – діаметр барабана, м      | –                   |
|                  | К – конусний  | –  | Е – площа сита, $\text{м}^2$ | –                   |
| С – сито         | Д – дугове  | –  |                              | –                   |

\*Умовне позначення ширини сита грохота: 1 – 750 мм; 2 – 1000 мм; 3 – 1250 мм; 4 – 1500 мм; 5 – 1750 мм; 6 – 2000 мм; 7 – 2500 мм; 8 – 3000 мм; 9 – 3500 мм.

Тип грохота і просіювальної поверхні визначається видом грохочення.

#### 1.4.2. Нерухомі грохоти

*Нерухомі колосникові грохоти* (колосникові решітки, рис. 1.13 а) встановлюють у першій стадії дроблення при наявності у вихідному матеріалі понад 15 % дріб'язку (за масою) або при відсутності достатнього запасу продуктивності у дробарки крупного дроблення.

Колосникові грохоти збирають з колосників **І** різного профілю

(рис. 1.4), розташованих паралельно і скріплених між собою шпильками 2. Вихідний матеріал завантажується на верхній кінець грохота і рухається під дією сили ваги. Зерна крупністю менше розміру щілин решітки провалюються через неї, а крупний клас сходить на нижньому кінці грохота. При подачі корисної копалини з вагоноперекидача ширина грохота приймається рівною довжині вагона, при завантаженні пластинчастим живильником – ширині живильника. Щоб уникнути зависання грудок матеріалу між бічними стінками грохота, мінімальна його ширина приймається в три рази більша від розміру максимальної грудки у вихідному матеріалі. Довжина грохота звичайно приймається в 2 рази більше ширини.

Кут нахилу робочої поверхні колосникового грохота при грохоченні вугілля приймають  $30 - 35^\circ$ , при грохоченні руд –  $40 - 45^\circ$ , при грохоченні вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, кут нахилу збільшують до  $55^\circ$ .

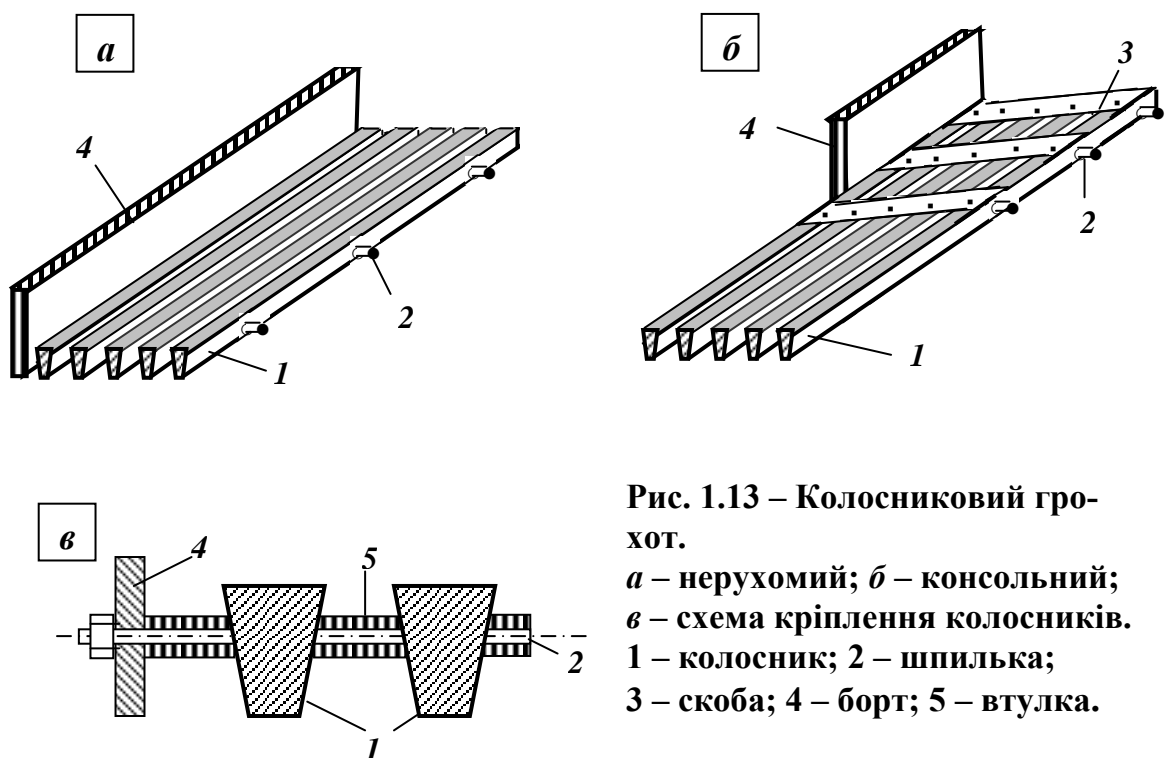


Рис. 1.13 – Колосниковий грохот.  
 а – нерухомий; б – консольний;  
 в – схема кріплення колосників.  
 1 – колосник; 2 – шпилька;  
 3 – скоба; 4 – борт; 5 – втулка.

При грохоченні матеріалу крупністю до 150 мм і малих розмірах щілини між колосниками для підвищення ефективності застосовують консольні колосникові грохоти (рис. 1.13 б). Кінці консолі колосників при ударах падаючих грудок матеріалу вібрують, у зв'язку з чим зменшується можливість забивання решітки і підвищується ефективність грохочення. Однак широкого розповсюдження консольні колосникові грохоти не знайшли.

Переваги колосникових грохотів полягають у тому, що вони не споживають електроенергії і не створюють динамічних навантажень на несучі конструкції будов збагачувальних фабрик. Недоліки цих грохотів – низька ефективність грохочення і схильність до забивання.

*Дугові і конусні грохоти* (СД і ГК) застосовують для мокрого грохочення дрібного і тонкого матеріалу, для зневоднення і знешламлювання, для відділення кондиційної суспензії від продуктів збагачення у важкосередовищних гідроциклонах, для рівномірного розподілу матеріалу по ширині решета відсаджувальної машини при одночасному знешламлюванні.

*Дуговий грохот* (дугове сито) складається зі зварного закритого короба **1**, усередині якого нерухомо закріплена робоча поверхня **2** (рис. 1.14), що являє собою шпальтове сито з розміром щілин 0,5–1 мм. Шпальтове сито є частиною циліндричної поверхні з радіусом 500 – 1200 мм і центральним кутом 90 – 270°. Розмір завантажувального отвору, що визначає швидкість пульпи на вході і продуктивність грохота, регулюється притискним листом **3**, положення якого фіксується гвинтом **4**.

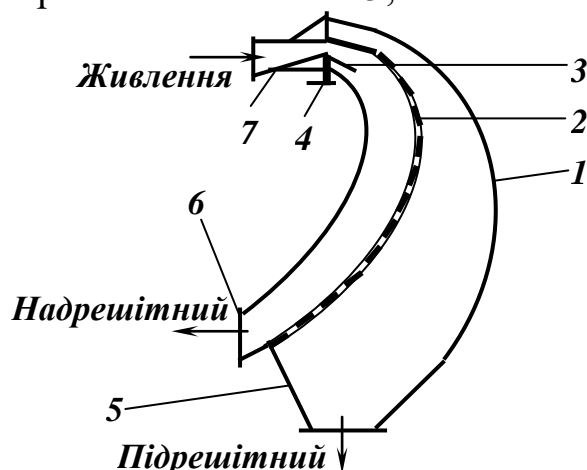


Рис. 1.14. – Схема дугового грохота:

- 1 – зварний короб;
- 2 – шпальтове сито;
- 3 – притискний лист;
- 4 – притискний гвинт;
- 5 – розвантажувальна коробочка;
- 6 – жолоб;
- 7 – завантажувальний пристрій.

Вихідна пульпа через завантажувальний пристрій **7** під тиском до 0,25 МПа подається на шпальтове сито **2** і рухається по його поверхні. Під дією відцентрової сили пульпа розшаровується, шлам і вода (підрешітний продукт) зрізуються крайками колосників і надходять у розвантажувальну коробочку **5**, а знешламлений матеріал (надрешітний продукт) видаляється з грохота по жолобу **6**.

*Конусний грохот* (рис. 1.15) складається зі сталевого корпусу **1**, усередині якого розташована зневоднююча поверхня зі шпальтових сит із щілиною розміром 0,5 – 1 мм.

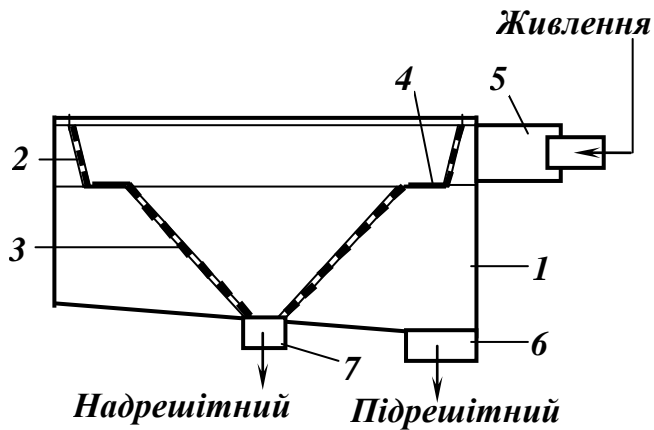


Рис. 1.15 – Схема конусного грохота:

- 1 – корпус;
- 2 – верхня (конічна) частина;
- 3 – нижня (пірамідальна) частина;
- 4 – кільцева площадка;
- 5 – завантажувальний пристрій;
- 6, 7 – розвантажувальні патрубки.

Верхня частина зневоднюючої поверхні являє собою усічений конус 2, повернутий основою догори. Твірна конуса нахилена під кутом  $75^\circ$  до горизонту. Нижня частина зневоднюючої поверхні виконана у вигляді багатогранної усіченої піраміди 3, вершина якої спрямована вниз. Кут нахилу її граней складає  $45^\circ$ . Між верхньою і нижньою частинами розташована злегка нахилена усередину кільцева площадка 4.

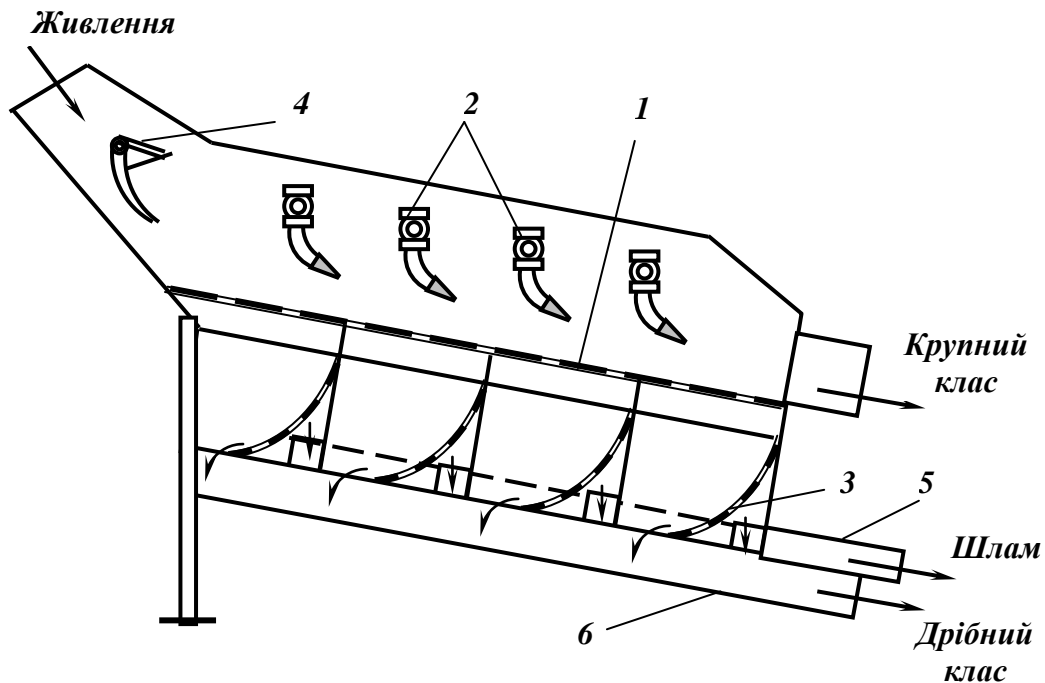
Пульпа завантажується тангенціально у верхню частину корпусу. Завантажувальний пристрій 5 має перекидний шиббер, що дозволяє регулювати напрямок входу пульпи в апарат. Вихідна пульпа по жолобу або трубопроводу через завантажувальний пристрій 5 надходить в апарат по дотичній до верхньої ділянки зневоднюючої поверхні. Потік пульпи утворює кільце, що підтримується площадкою 4. Під дією нормальної складової відцентрової сили і сили ваги на ситі створюється необхідний тиск, внаслідок чого вода і дрібні частинки проходять через щілини в підрешітний простір і виводяться з грохота через патрубок 6. На цій ділянці видаляється 80 – 90 % води, що повинна бути відділена. Потік, що залишився, обертається і стікає з кільцевої площадки на нижню частину сита, де відбувається подальше зневоднювання матеріалу. Зневоднений продукт сповзає по пірамідальній поверхні і розвантажується з грохота по патрубку 7.

Дугові і конусні грохоти прості за конструкцією і зручні в експлуатації. Недоліком їх є малий коефіцієнт живого перетину робочої поверхні і нерівномірний знос просіювальної поверхні (технічні характеристики дугових і конусних грохотів наведені у додатку А).

*Гідравлічні грохоти (гідрогрохоти)* застосовують для підготовчої класифікації матеріалу в потоці пульпи.

Гідрогрохот типу ГГЛ (рис. 1.16), що може бути застосований в практиці вуглезбагачення, складається з короба, в якому встановлена колосникова решітка 1 з шириною щілини 6 – 25 мм. Для рівномірного

розподілення навантаження по ширині колосникової решітки в завантажувальній частині короба грохота встановлений шарнірно закріплений розрівнювач 4. Над решіткою встановлені сопла 2 крізь які під тиском 100 кПа подається вода, яка сприяє підвищенню ефективності класифікації.



**Рис. 1.16 – Гідрогрохот.**

**1 – колосникова решітка; 2 – сопла; 3 – дугові сита; 4 – розрівнювач; 5 – жолоб; 6 – піддон.**

Надрешітний продукт (крупний клас) вивантажується з колосникової решітки в кінці грохота, а підрешітний (дрібний клас зі шламом) – разом з водою надходить на дугові сита 3, які розташовані під колосниковою решіткою. Надрешітний продукт дугових сит (дрібний клас) видаляється з грохота у піддон 6. Підрешітна вода дугових сит разом з шламом видаляється по жолобу 5.

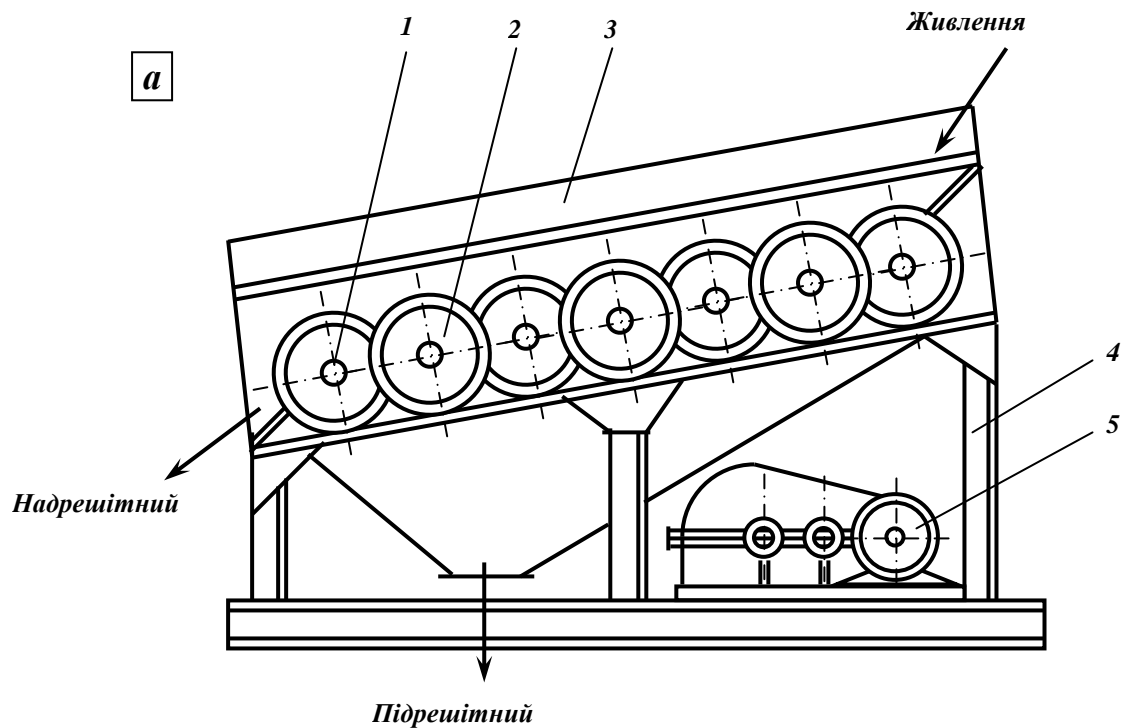
Переваги гідрогрохотів полягають у великій продуктивності і ефективності, простоті конструкції та відсутності динамічних навантажень. Технічні характеристики гідрогрохотів наведені у додатку А.

### **1.4.3. Грохоти з частково рухомою просіювальною поверхнею**

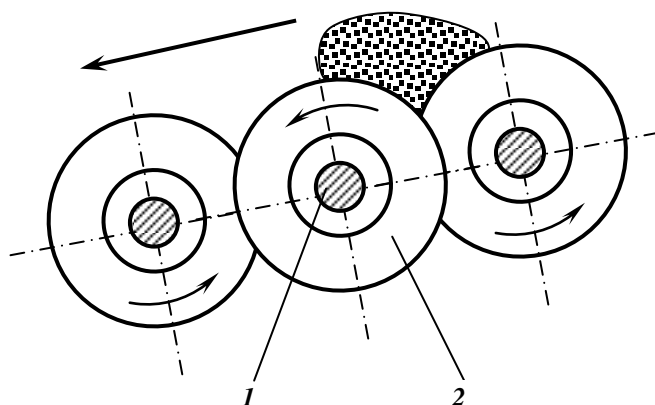
Існує багато конструктивних типів грохотів з частково рухомою просіювальною поверхнею – валкові, шнекові, з пружно-деформованим ситом, з безпосереднім збудженням сита.



Валкові грохоти (рис. 1.17) складаються з 7 – 14 паралельних валків *1*, які встановлені на похилої рамі *4* і обертаються у напрямку руху матеріалу. На валки насаджені або відлиті заодно з ними диски *2* чи «сферичні» трикутники. Валки з дисками створюють просіювальну поверхню з отворами, форма і розміри яких визначаються відстанями між валками і формою дисків. Нахил просіювальної поверхні у бік розвантаження складає 12-15°.



**б** Напрямок руху матеріалу



**Рис. 1.17 – Грохот валковий.**  
*a* – схема грохота;  
*б* – схема руху матеріалу.  
 1 – валки; 2 – диски; 3 – короб грохота; 4 – рама; 5 – привід.

За рахунок ексцентричного насадження дисків при їхньому обертанні відбувається розпушення матеріалу і його переміщення, а також підвищується ефективність грохочення.

Валкові грохоти застосовувались для попереднього грохочення вугілля та антрацитів для відділення класу дрібніше 50 – 150 мм, а також на буровугільних брикетних фабриках для відділення класу дрібніше 5-6 мм.

При використанні валкових грохотів відбувається додаткове шламоутворення та значне забруднення підрешітного продукту верхнім класом, крім того, вони металоємні і ненадійні у експлуатації. Тому сьогодні ці грохоти замінені інерційними і циліндричними грохотами.

*Шнекові грохоти* (ГШ) (рис. 1.18) призначені для сухого розсіву вугілля та сланців з високою вологою по крупності від 13 мм.

Шнековий грохот складається з трьох однакових взаємозамінних секцій-каскадів *1*. Секція являє собою ряд валів-шнеків *2* з двозахідними правою та лівою навивками витків встановлених у передній і задній опорах закріплених на рамі *3*. Кожний вал-шнек встановлюється в двох підшипниках кочення.

Крутний момент на валу-шнеку робочої поверхні грохота передається від електродвигуна клиноремінною передачею. Щілини просіювальної поверхні, що створюються витками валів-шнеків, можуть бути відрегульовані для класифікації за необхідним розміром.

Матеріал по робочій поверхні переміщується ребрами валів-шнеків, при цьому відбувається відсів підрешітного продукту, а також примусове очищення елементів робочої поверхні від налиплих частинок.

Каскадне розташування робочої поверхні та висока частота обертання валів-шнеків ( $475 \text{ хв}^{-1}$ ) сприяють активному перемішуванню матеріалу, що забезпечує високу ефективність грохочення.

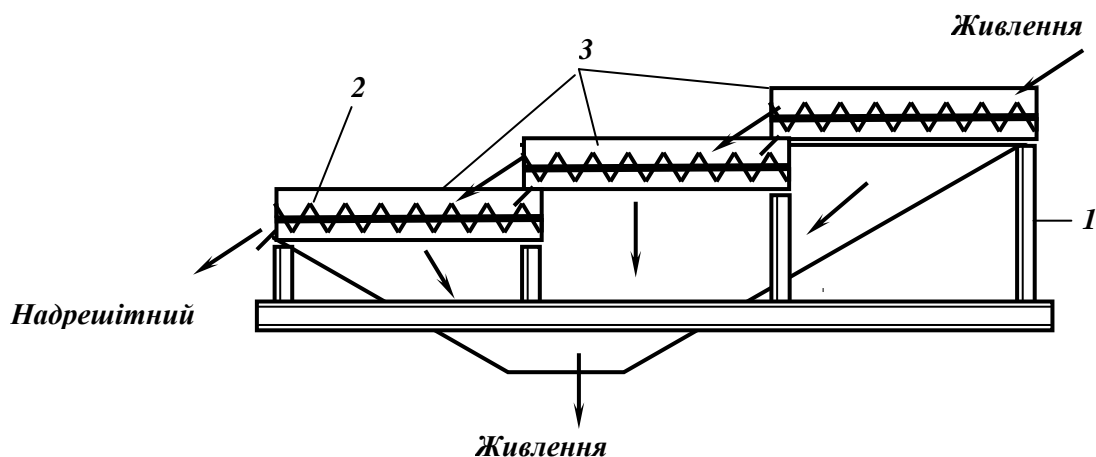


Рис. 1.18 – Схема шнекового грохота.  
1 – секція-каскад; 2 – вал-шнек; 3 – рама.

Переваги шнекових грохотів – відсутність вібрацій та динамічних навантажень на будівельні конструкції будов збагачувальних фабрик, малий рівень шуму і високі ефективність та продуктивністю при грохоченні вологих матеріалів.

Технічні характеристики шнекових грохотів наведені у додатку А.

Грохот з еластичною пружно-деформованою просіювальною поверхнею (ГЕДП) призначений для відсіву дрібних класів з вологого рядового вугілля і антрацитів по крупності 6 – 13 мм сухим способом.

Грохот (рис. 1.19) являє собою двомасову коливну систему, яка включає короб *1* і зв'язану з ним повідковими важелями *8* раму *7* з інерційним дебалансним збуджувачем коливань *6*.

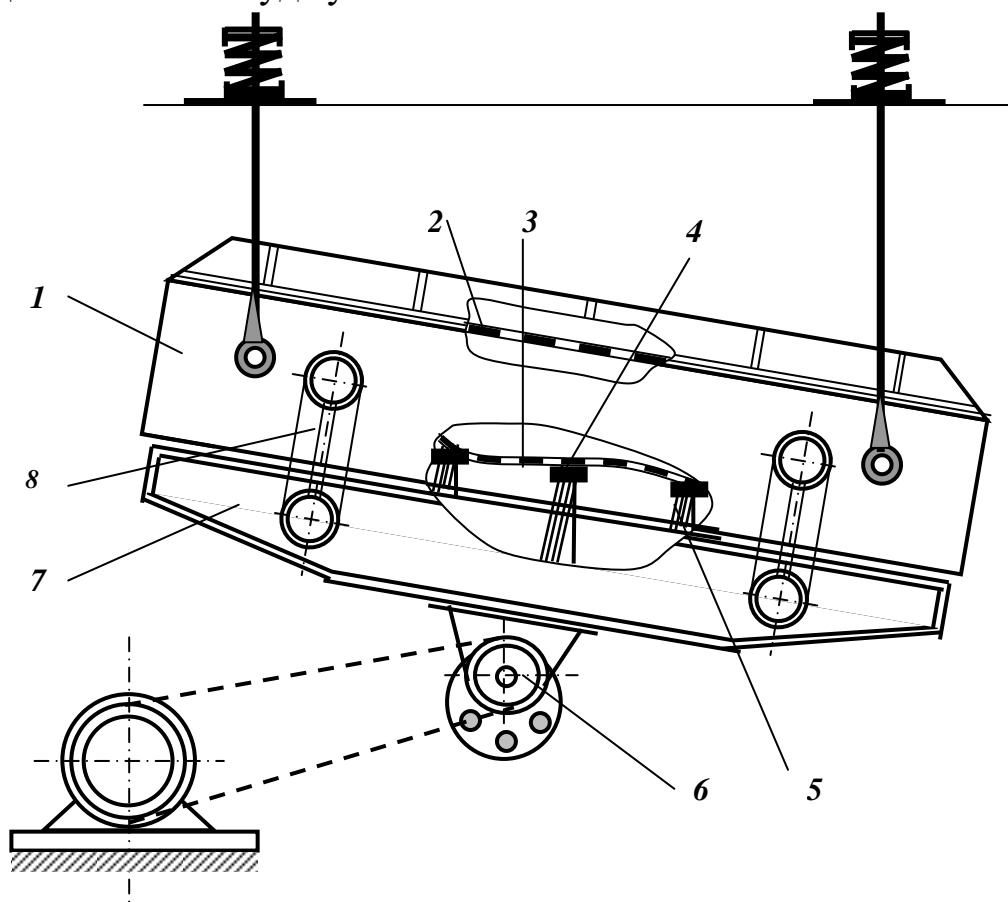


Рис. 1.19 – Грохот з еластичною пружинно-деформованою просіюючою поверхнею: *1* – короб; *2* – металеве сито; *3* – еластичне сито; *4, 7* – рами; *5* – балки; *6* – інерційний дебалансний збуджувач коливань; *8* – повідкові важелі.

Конструкція короба і рами складається з бокових стінок та жорстко з'єднаних з ними поперечних балок. Поперечні балки *5* короба і рами *4* розташовані в одній площині і служать опорами нижнього еластичного сита. При роботі грохота рама відносно короба здійснює маятникові коливання у напрямку перпендикулярному важелям.

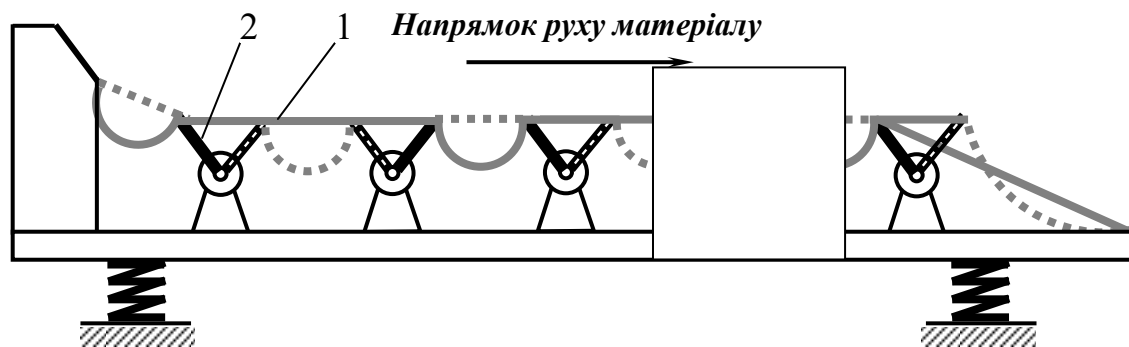
Внаслідок цього ділянки еластичного сита, що розташовані між

рейками короба і рами, поперемінно натягуються або провисають, тобто піддаються по черзі пружним деформаціям вигину та розтягання. При цьому короб робить спрямовані уздовж важелів коливання, що забезпечує працездатність верхнього металевого сита, яке жорстко закріплено у коробі грохота.

Еластичне сито грохота при пружних циклічних деформаціях надає шару матеріалу значне прискорення (до 30 g), що сприяє його інтенсивному розпушенню, очищенню чарунок просіювальної поверхні, руйнуванню грудок злиплого вугільного дріб'язку й інтенсифікації процесу грохочення вологих матеріалів, які важко класифікуються.

Технічна характеристика грохота ГЕДП наведена у додатку А.

*Грохот з гнучким ситом* (рис. 1.20) конструктивно подібний до грохота з еластичною пружно-деформованою просіювальною поверхнею.



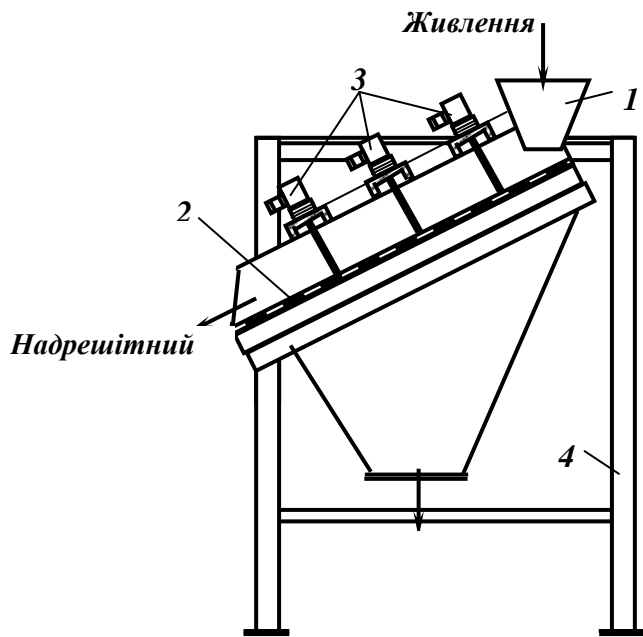
**Рис. 1. 20** – Грохот з гнучким ситом.

1 – еластичне сито; 2 – важелі.

Усе сито по довжині поділено на декілька ділянок, які зістиковані на планках. Кожна з планок закріплена на кінцях важелів здатних повертатись на своїх осях. Парні важелі з'єднуються між собою одним спільним спарником, непарні – другим. Спарники приводяться у зворотно-поступальний рух від кривошипно-шатунного механізму таким чином, що вони завжди переміщуються у протилежні сторони. В результаті парні і непарні важелі поперемінно зближаються і розходяться, а відповідні ділянки сита провисають і розтягуються, що приводить до самоочищення чарунок сита й інтенсифікації процесу розсіву.

*Грохот з місцевими вібраціями сита* (рис. 1.21) – є плоским похилим грохотом з нерухомим коробом. Ткане сито жорстко закріплюється по усьому периметру і одержує примусові коливання у декількох точках посередині.

**Рис. 1.21 – Грохот з електромагнітними вібробуджувачами.**  
**1 – бункер;**  
**2 – сито;**  
**3 – вібробуджувачі;**  
**4 – рама.**

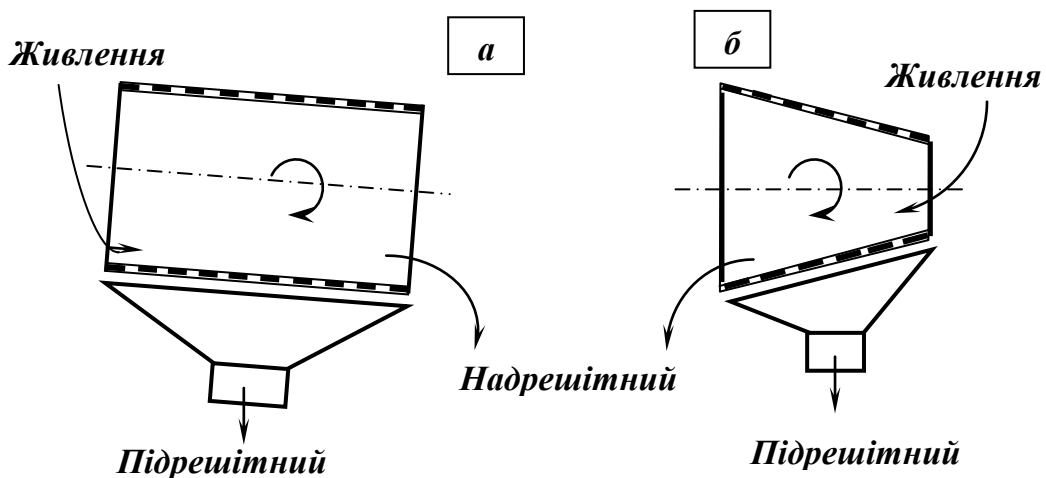


До сита прикріплені штоки електромагнітних вібробуджувачів, які встановлені на поперечних балках грохота. Грохоти цього типу застосовуються для розсіву тонких і особливо тонких матеріалів (напр., калійних солей).

#### 1.4.4. Барабанні і циліндричні грохоти

Барабанні і циліндричні грохоти (ГБ і ГЦЛ) застосовують в операціях попереднього грохочення корисних копалин, промивання легко- і середньопромивних руд, промивання і сортування щебеню, для вловлювання скрапу і крупних грудок руди зі зливу млинів.

Барабанні грохоти в залежності від форми барабана можуть бути циліндричними (рис. 1.22 а) або конічними (рис. 1.22 б).



**Рис. 1.22 – Схеми барабанних грохотів.**  
**а – циліндричний; б – конічний.**

Бічна (просіювальна) поверхня барабана може бути утворена перфорованими сталевими листами, сіткою або багатозахідною спіраллю. Вісь циліндричного барабана нахилена до горизонту під кутом від 1 до 14°, а вісь конічного – горизонтальна. Вихідний матеріал завантажується всередину барабана на верхньому кінці і внаслідок обертання та нахилу переміщується поздовж осі барабана. Рух матеріалу в барабанному грохоті схематично показаний на рис. 1.23. Під дією сили тертя матеріал захоплюється внутрішньою поверхнею обертового барабана і потім скочується вниз. Скочування матеріалу відбувається під певним кутом до його площини обертання, що є наслідком нахилу осі барабана. Таким чином матеріал просувається вниз уздовж осі барабана. Далі цикл повторюється і матеріал рухається по зигзагоподібній лінії. При переміщенні матеріалу по просіювальній поверхні дрібні класи провалюються через отвори, крупні – вивантажуються з барабана на нижньому кінці.

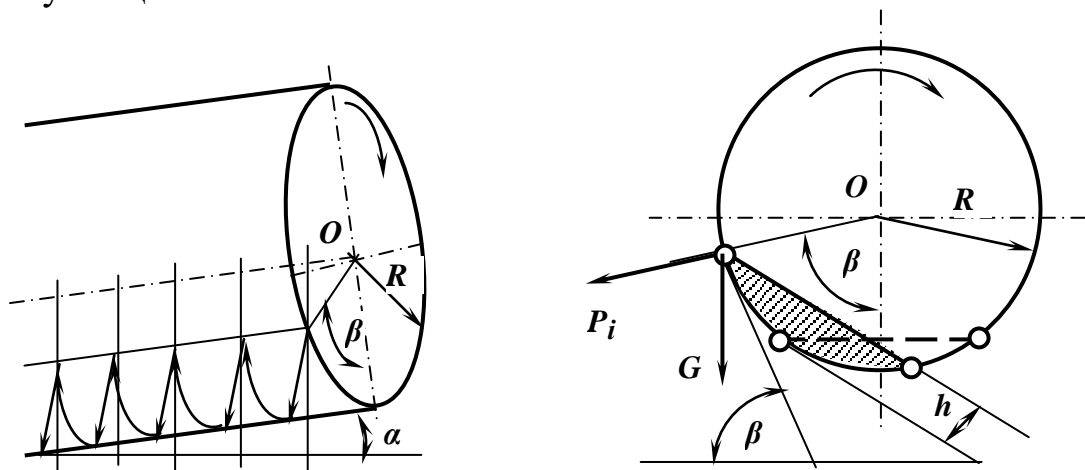


Рис. 1.23 – Схема руху матеріалу в барабанному грохоті.

$P_i$  – відцентрова сила інерції;  $G$  – маса частинки;  $h$  – товщина шару матеріалу;  $\alpha$  – кут нахилу грохота;  $\beta$  – кут підйому матеріалу.

Частота обертання барабана обмежена, тому що при великих частотах відцентрова сила притискає матеріал до робочої поверхні і грохочення стає неможливим. Критична частота, при якій шар матеріалу притискується до поверхні барабана і обертається разом з барабаном, визначається за формулою:

$$n_{кр} = 30 / R^{0,5}, \text{ хв}^{-1}, \quad (1.25)$$

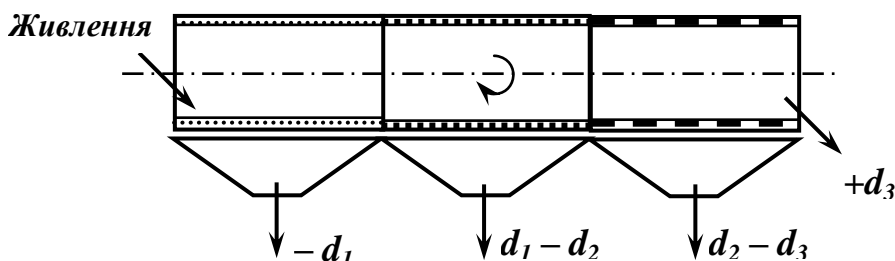
де  $n_{кр}$  – критична частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $R$  – радіус барабана, м.

Частота обертання барабанних грохотів звичайно вибирається менше критичної – в межах  $0,25 - 0,5 n_{кр}$ .

Барабанні грохоти виготовляють також для розділення матеріалу на декілька класів. При цьому сито барабана збирається з декількох секцій, розміри отворів яких збільшуються в напрямку до розвантажуваль-

ного кінця (рис. 1.24 *a*). Друге конструктивне рішення передбачає розташування сит у вигляді концентричних кіл (рис. 1.24 *б*), розміри отворів сит зменшуються від центру до периферії. Можливі комбінації з використанням двох конструктивних рішень.

**a**



**б**

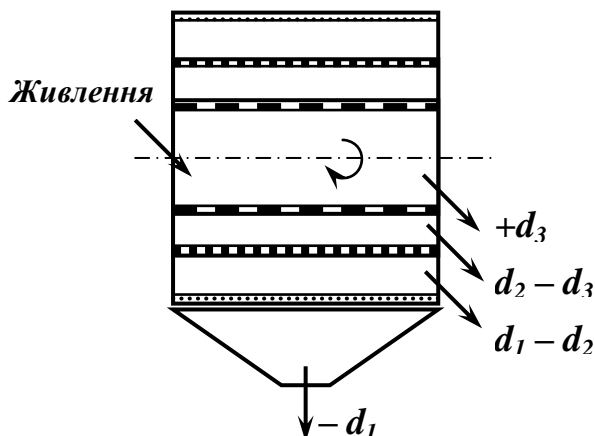


Рис. 1.24 – Розташування сит на барабанному грохоті.  
*a* – послідовне; *б* – концентричне.

Застосовуються також призматичні барабанні грохоти – *бурати*, робоча поверхня яких складається з шести або восьми плоских сит, що створюють бокову поверхню у формі призми або зрізаної піраміди.

Конічні барабанні грохоти – *бутари* застосовуються в основному у циклах подрібнення (вловлювання скрапу і крупних грудок руди зі зливу млинів) і промивки (промивання легко- і середньопромивних руд, а також відділення шламів від дезинтегрованого в скруберах матеріалу).

Різновидом барабанних грохотів є *циліндричний грохот*, що використовується в операціях попереднього грохочення вугілля. Робоча поверхня грохота являє собою багатозахідну спіраль з витками, що мають Т-подібну форму. Відстань між витками може бути 50, 70 і 100 мм залежно від необхідної крупності подріштного продукту.

Барабанні грохоти прості за конструкцією і надійні в експлуатації. Основні їх недоліки – крихке подрібнення матеріалу в процесі грохочення, громіздкість та мала ефективність грохочення.

Технічні характеристики барабанних грохотів наведені у додатку А.

### 1.4.5. Вібраційні грохоти

*Резонансні грохоти* (ГРЛ, ГРД) характеризуються наявністю пружних з'єднань короба з приводом і рамою, а також установкою рами на амортизатори.

В резонансних грохотах використовується явище резонансу – збіг власних і змущених коливань. Завдяки резонансу збільшується амплітуда коливань (до 10 мм), що приводить до збільшення ефективності грохочення і зменшення витрати електроенергії.

*Резонансний грохот ГРЛ зі зрівнювальною рамою* (рис. 1.25 а) складається з горизонтального короба **1** з ситами і масивної рухомої рами **2** зв'язаних між собою пружними елементами **3** і **4**. Рама обпирається на перекриття фабрики через пружні (гумові) віброізолятори **5**, завдяки чому вона може вібрувати. На рамі змонтований ексцентриковий привідний механізм **6** з пружним шатуном **7**.

*Резонансний грохот ГРД з двома коробами* (рис. 1.25 б) являє собою безрамну конструкцію. Він складається з двох горизонтально розташованих коробів – верхнього **1** і нижнього **9** з'єднаних між собою блок-шарнірами **8**. Короби грохота підвішуються на похилих шарнірних або пружних підвісках. Рух коробам передається від ексцентрикового привідного механізму **6** з пружним шатуном **7**. В наслідок наявності пружних елементів в шатуні і опорах коробів амплітуда їхніх коливань може змінюватись під час роботи грохота.

Принцип дії резонансних грохотів пояснюється схемою на рис. 1.26.

Горизонтальні короби з ситами підвішені один над одним до нерухомої рами або підтримуючих конструкцій. Рух верхньому коробу **1** передається від ексцентрикового вала **5** через шатуни **3** і пружини **4**.

Нижній короб **2** отримує коливання від верхнього короба **1** завдяки пружинам **6**, які зв'язані з обома коробами. Таким чином, в коливаннях беруть участь дві маси – верхній короб  $M_1$  і нижній короб  $M_2$ . При обертанні ексцентрикового вала **5** відбувається деформація пружного елемента привода – пружини **4** шатуна.

Сила пружності цього елемента змінюється за синусоїдальним законом і спричиняє змущені коливання верхнього короба, які у свою чергу спричиняють змущені коливання нижнього короба. При обертанні ексцентрикового вала короби одержують прямолінійні коливання під кутом  $35^\circ$ , спрямовані у протилежні сторони. Завдяки спрямованим коливанням короба здійснюється транспортування матеріалу по горизонтальній поверхні сит.



Основні недоліки резонансних грохотів: велика металоємність і складність конструкції. З цих причин вони, не дивлячись на їхню високу ефективність і універсальність застосування, були зняті з виробництва.

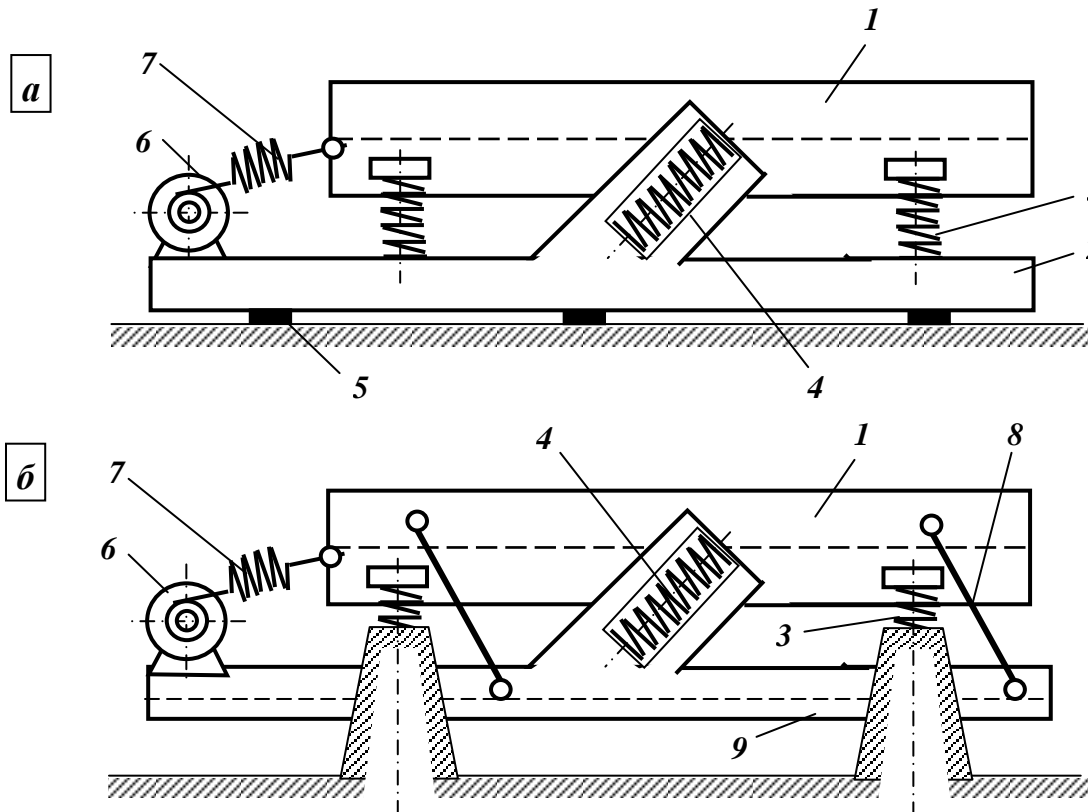


Рис. 1.25 – Схема резонансного грохота.

*a* – зі зрівнювальною рамою; *б* – з двома коробами.

1,9 – короб; 2 – рама; 3, 4 – пружні елементи; 5 – віброізолятори; 6 – привідний механізм; 7 – пружний шатун; 8 – блок-шарніри.

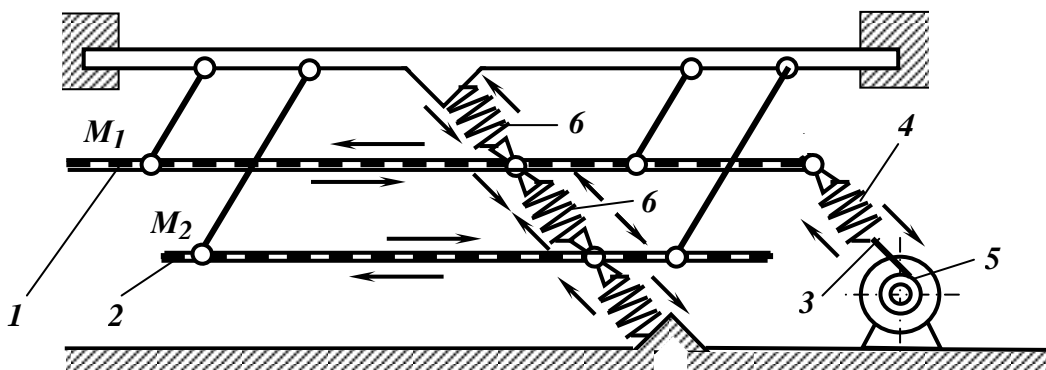


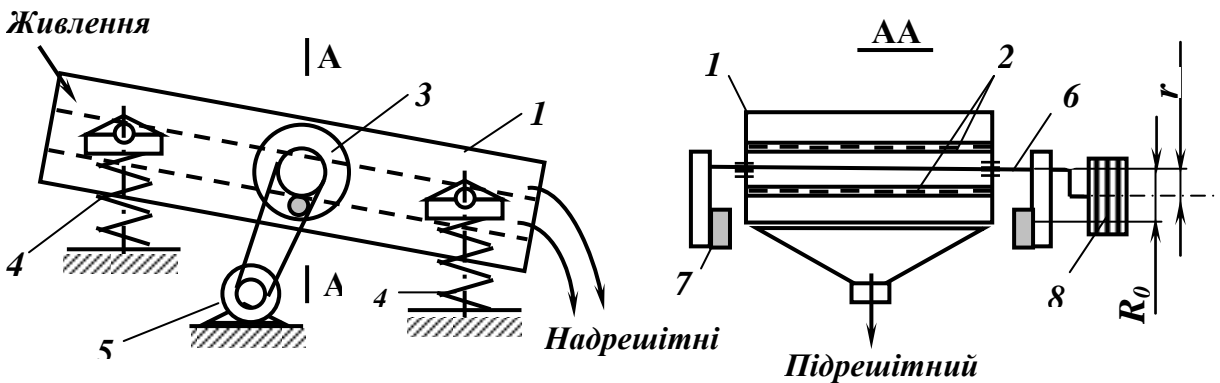
Рис. 1.26 – Принцип дії резонансних грохотів.

*Інерційні та інерційно-самобалансні грохоти (ГІЛ, ГІС, ГІТ і ГІСЛ, ГІСТ)* на збагачувальних фабриках використовують для попереднього і перевірного грохочення, зневоднення і знешламлювання,

тонкої сухої і мокрої класифікації, промивки, відділення суспензії і відмивки обважнювача, розділення концентрату на товарні продукти.

*Інерційний грохот* (рис. 1.27) складається з похило розташованого короба **1** з просіювальними поверхнями **2**, інерційного вібробуджувача **3**, пружинних опор **4** (або підвісок) і електродвигуна **5**.

Вібробуджувач являє собою вал **6** з дебалансами **7**, підшипники якого закріплені у коробі. Вісь підшипників вібробуджувача проходить через центр ваги короба (разом з матеріалом на ситі), тому при обертанні вала всі точки короба рухаються поступально і описують кругові траєкторії у вертикальних площинах, перпендикулярних до розташування сита. Кругові коливання короба здійснюються за рахунок взаємодії двох обертальних мас: одна з них – короб грохота, інша – дебалансні вантажі.



**Рис. 1.27 – Схема інерційного грохота:**

**1 – короб; 2 – просіювальні поверхні; 3 – вібробуджувач; 4 – пружинні опори; 5 – електродвигун; 6 – вал; 7 – дебаланси; 8 – шків**

Дебалансні вантажі вибираються таким чином, щоб їхня відцентрова сила інерції урівноважувала відцентрову силу, яку розвиває короб грохота при обертанні на радіусі рівному ексцентриситету:

$$Me = 2mr, \quad (1.26)$$

де  $M$  – маса короба грохота з навантаженням;  $e$  – ексцентриситет вала;  $m$  – маса дебалансів;  $r$  – відстань від центра ваги дебалансних вантажів до осі обертання. При умові рівності моментів обертання амплітуда  $a$  коливань короба визначається за формулою:

$$a = r = R_0 m / M, \text{ мм}, \quad (1.27)$$

де  $R_0$  – відстань від осі обертання до центра ваги дебалансів, мм.

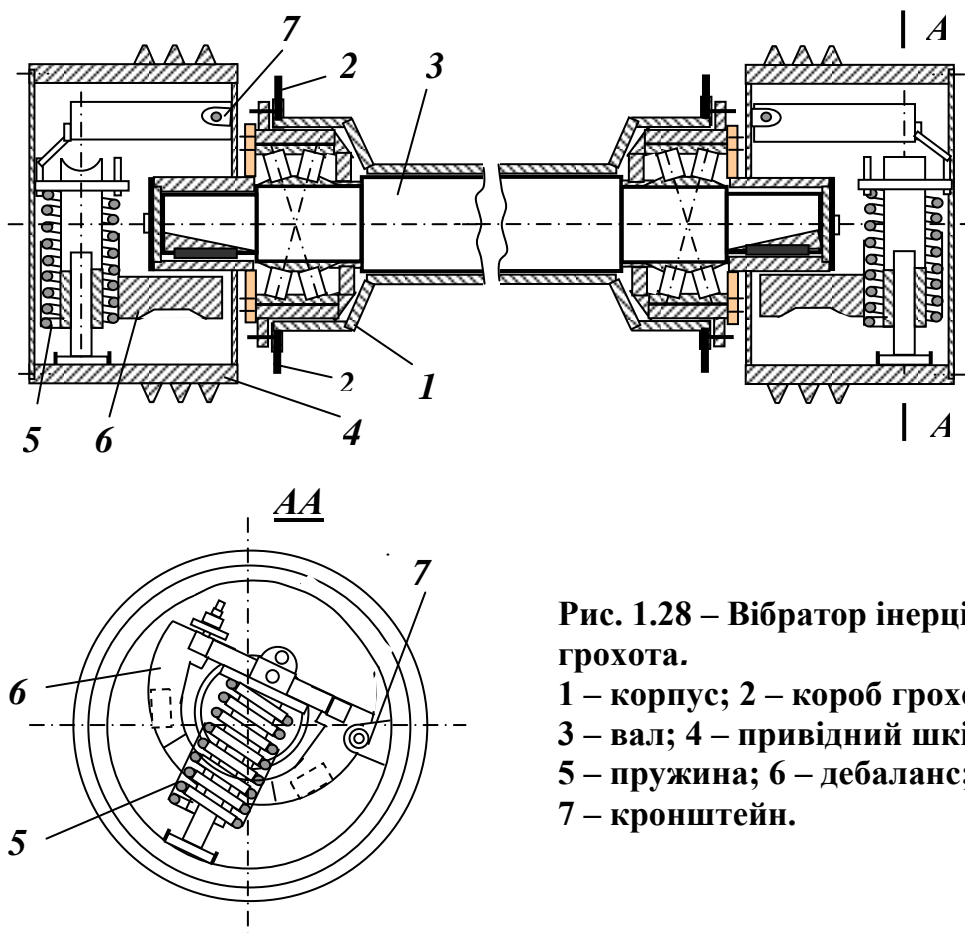
При цьому просіювальна поверхня здійснює коливання і матеріал струшується та розпушується. Кут нахилу сит грохота до горизонту складає  $10 - 25^\circ$ . Завдяки коливанням та похилому розташуванню сита матері-

ал рухається по ньому до розвантажувального кінця, просіваючись через отвори.

Зміна амплітуди коливань короба може бути здійснено зміною маси дебалансів або зміною їхньої відстані від центру ваги.

Максимальні амплітуди коливань короба при резонансних режимах, які виникають при пуску і зупинці грохота, можуть досягати 8 – 10-кратної величини робочої амплітуди. Відповідно зростають й динамічні навантаження на деталі грохота та його опору. Тому резонансні коливання у даному випадку шкідливі, і чим вони коротші за тривалістю, чим менша їхня амплітуда, тим краще.

Для стабілізації роботи і зменшення резонансних коливань у деяких типах інерційних грохотів використовуються вібратори з самоустановлювальними дебалансами (рис. 1.28).



**Рис. 1.28 – Вібратор інерційного грохота.**

- 1 – корпус; 2 – короб грохота;**
- 3 – вал; 4 – привідний шків;**
- 5 – пружина; 6 – дебаланс;**
- 7 – кронштейн.**

Конструктивні особливості вібратора з самоустановлювальними дебалансами: в трубчастому корпусі **1**, що жорстко прикріплений до короба **2**, розташований вал **3**, на дві кінцеві шийки якого ексцентрично насаджені привідні шківів **4**.

У середині шківів змонтовані дебаланси **6**, які вільно висять на кронштейні **7** та опираються на пружину **5**. При запуску грохота в початковий

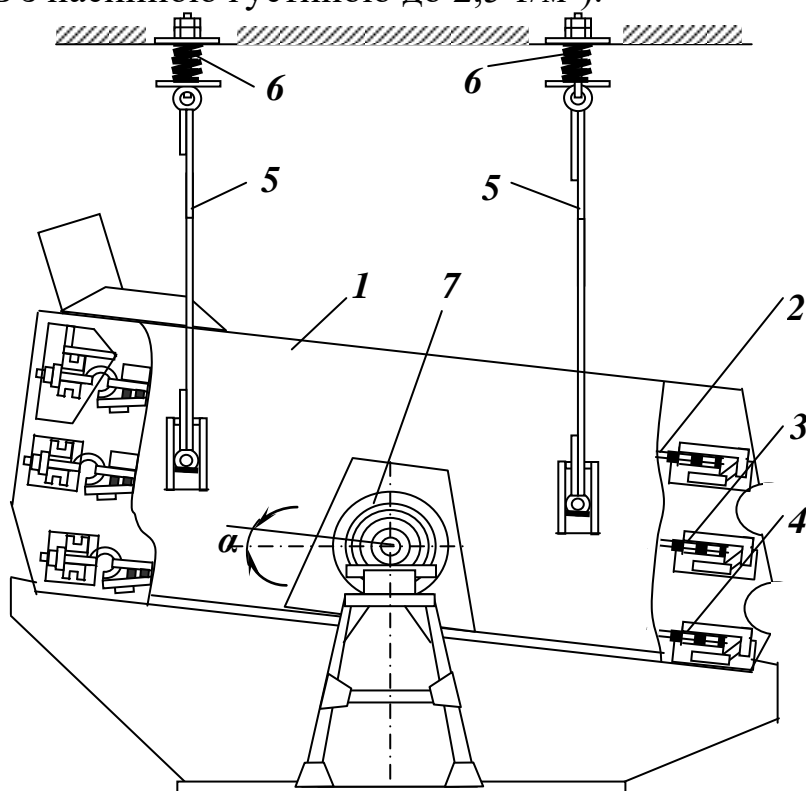
момент дебалансні вантажі утримуються в нейтральному положенні пружинами 5 доти, поки вал вібратора не набере визначеної кутової швидкості. В подальшому дебаланси під дією відцентрової сили переборюють силу пружності пружин, відходять від центру обертання, притискаються до внутрішньої поверхні шківів і займають робоче положення. Автоматичне налагоджування машини на самоцентрувальний режим при зміні швидкості обертання ексцентрикового вала визначається в основному жорсткістю пружин.

Основним параметром інерційного грохота є його динамічна характеристика – добуток подвійного ексцентриситету  $2e$  (м) на частоту обертання вала  $n$  (рад/с). Величина цього параметра впливає на продуктивність агрегата, ефективність його роботи, а також на здатність до самоочищення просіювальної поверхні. Для сучасних конструкцій значення  $2en$  приймається рівним не менше 0,105. Інерційні грохоти випускають трьох типів в опорному і підвісному (рис. 1.29) виконанні:

– грохоти легкого типу (ГЛ) – для підготовчого і остаточного грохочення кам'яного вугілля, антрацитів та інших матеріалів з насипною густиною до  $1 \text{ т/м}^3$ ;

– грохоти середнього типу (ГС) – для грохочення нерудної сировини (в основному матеріалів з насипною густиною до  $1,4 \text{ т/м}^3$ );

– грохоти важкого типу (ГТ) – для грохочення сировини і продуктів збагачення на фабриках чорної і кольорової металургії (в основному матеріалів з насипною густиною до  $2,5 \text{ т/м}^3$ ).



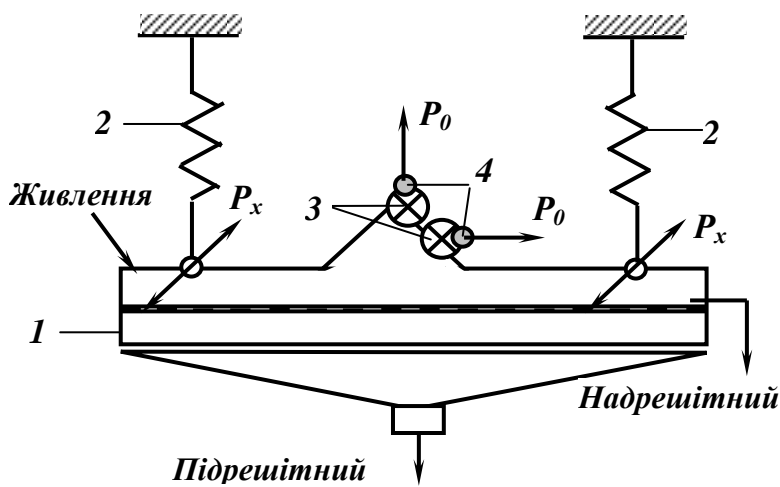
**Рис. 1.29 – Грохот ГЛ-43 у підвісному виконанні.**

**1 – короб; 2, 3, 4 – сита; 5 – підвіски; 6 – пружини; 7 – вібратор.**

Вібраційні грохоти з інерційним віброзбуджувачем мають просту конструкцію, легко регулюються і надійні в експлуатації. Застосування пружних опор або підвісок з пружинами невеликої жорсткості забезпечує значне зменшення динамічних навантажень на раму грохота і перекриття будівлі фабрики.

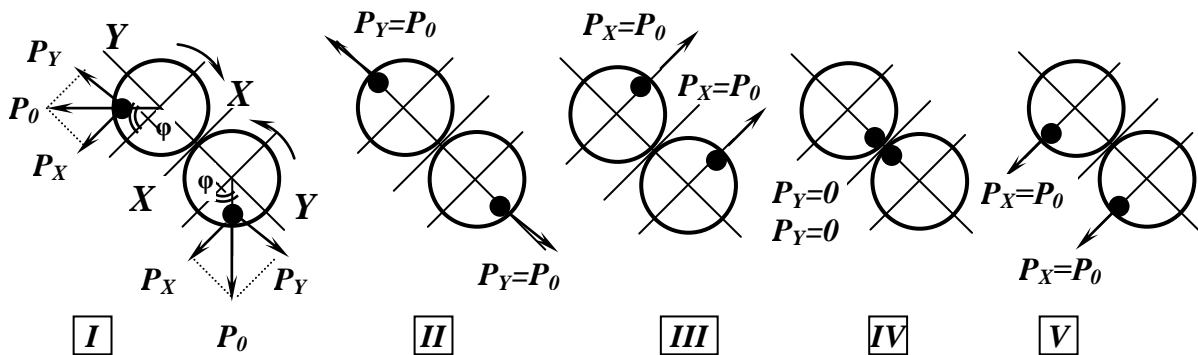
Технічні характеристики інерційних грохотів наведені у додатку А.

*Інерційно-самобалансний грохот* (рис. 1.30) складається з короба *1*, встановленого горизонтально на чотирьох–шести амортизаторах (або пружинах) *2*, самобалансного віброзбуджувача *3*, закріпленого на коробі під кутом  $45^\circ$  до площини сита, і двох електродвигунів.



**Рис. 1.30** – Схема інерційно-самобалансного грохота.  
 1 – короб грохота;  
 2 – пружини;  
 3 – віброзбуджувач;  
 4 – дебаланси.

Самобалансний віброзбуджувач складається з корпусу, усередині якого на підшипниках кочення встановлені паралельно два вали з неврівноваженими масами (дебалансами) *4*, що обертаються з однаковою частотою, але в протилежні сторони (рис. 1.31).



**Рис. 1.31**– Принцип дії самобалансного віброзбуджувача.

При будь-якому положенні вантажів дебалансів вібратора сили діють поздовж осі *X*. Складові відцентрової сили інерції, що діють

вдovж осі  $Y$ , взаємно урівноважуються, так як вони рівні за величиною і протилежно спрямовані.

Якщо через  $\varphi$  позначити кут повороту вала кожного дебаланса, то рівнодіюча поздовж осі  $X$  буде:

$$2P_x = 2P_0 \cos \varphi = 2m\omega^2 R \cos \varphi, \quad (1.28)$$

де  $m$  – маса одного дебаланса, кг;  $\omega$  – кутова швидкість обертання дебаланса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – відстань центру ваги дебаланса до осі обертання, м;  $P_0$  – відцентрова сила інерції:

$$P_0 = m\omega^2 R, \text{ Н.} \quad (1.29)$$

Рівнодіюча  $P_x$  сил інерції дебалансів  $P_0$  змінюється за величиною від нуля до максимуму і за напрямком через кожні півоберта дебаланса.

Привод вібратора працює безпосередньо від двох електродвигунів через карданні вали, які обертаються у протилежних напрямках. Одночасність їх обертання досягається завдяки самосинхронізації.

Коливання коробка під кутом  $45^\circ$  до площини сита забезпечує рух матеріалу до розвантажувального кінця сита з підкиданням й енергійним струшуванням. Якщо грохот працює в несприятливих умовах, кут нахилу коробка може бути збільшений до  $8^\circ$ .

При пересуванні матеріалу по просіювальній поверхні дрібні частинки проходять через отвори сита, а крупні сходять на розвантажувальному кінці грохота.

Жорсткість амортизаторів (пружин) підбирається таким чином, щоб на перекриття передавалися мінімальні динамічні зусилля при роботі грохота.

Режим роботи грохота частіше за все регулюють зміною кута нахилу коробка, напрямку і частоти обертання вала вібратора. Значно рідше режим роботи грохота регулюється зміною маси дебаланса.

У коробі інерційних та інерційно-самобалансних грохотів може бути встановлено від одного до трьох сит.

Інерційні та інерційно-самобалансні грохоти характеризуються високою продуктивністю і ефективністю грохочення, простотою (технологічністю) у виготовленні і зручністю в експлуатації.

Технічні характеристики інерційно-самобалансних грохотів наведені у додатку А.

## 1.5 Технологія процесу грохочення

### 1.5.1 Технологічні показники процесу грохочення

Основними технологічними показниками процесу грохочення є: продуктивність грохота  $Q$  і ефективність грохочення  $E$ . Технологічний розрахунок грохотів зводиться до визначення необхідної площі просіювальної поверхні, а також необхідної ефективності грохочення при заданій продуктивності.

При проектуванні збагачувальних фабрик розміри грохотів вибирають за орієнтовними усередненими показниками їхньої продуктивності. За основу розрахунку приймається продуктивність по вихідному матеріалу на  $1 \text{ м}^3$  площі сита при даному розмірі отворів.

Конкретні умови грохочення ураховуються введенням ряду коефіцієнтів, що залежать від характеристики крупності вихідного матеріалу, ефективності грохочення, форми зерен, способу грохочення та ін.

Необхідну площу грохочення *колосникових грохотів* розраховують залежно від ширини щілини між колосниками і визначають за формулою:

$$F = Q / (q_o a \delta k), \text{ м}^2, \quad (1.30)$$

де  $Q$  – необхідна продуктивність, т/год;  $q_o$  – питома об'ємна продуктивність на 1 мм щілини (табл. 1.4),  $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ;  $a$  – розмір щілини решітки грохота, мм;  $\delta$  – насипна густина живлення,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;  $k$  – коефіцієнт, що враховує ефективність грохочення.

**Таблиця 1.4 – Питома об'ємна продуктивність колосникових грохотів**

| Ефективність грохочення, % | Питома об'ємна продуктивність $q_o$ ( $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ) при ширині щілини решітки грохота (мм) |    |     |     |     |     |
|----------------------------|---|----|-----|-----|-----|-----|
|                            | 50  | 75 | 100 | 125 | 150 | 200 |
| 65 – 70                    | 15  | 21 | 25  | 28  | 30  | 36  |
| 50 – 60                    | 30  | 42 | 50  | 56  | 60  | 72  |

Після розрахунку необхідної площі колосникового грохота із співвідношення  $L \geq 2B$  визначають довжину і ширину колосникової решітки. При цьому щоб уникнути зависання грудок матеріалу між бічними стінками грохота, мінімальна його ширина приймається в три рази більша від розміру максимальної грудки у вихідному матеріалі ( $B \geq D_{\text{max}}$ ). Крім того, при виборі ширини грохота необхідно враховувати

конкретні умови завантаження колосникового грохота: при подачі корисної копалини з вагоноперекидача ширина грохота приймається рівною довжині вагона, при завантаженні пластинчастим живильником – ширині живильника.

Об’ємна продуктивність *дугових і конусних грохотів* по вихідній пульпі прямо пропорційна площі живого перетину та швидкості подачі пульпи і визначається за формулою:

$$Q = 160F_{жс} V, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1.31)$$

де  $F_{жс}$  – площа живого перетину сита (коефіцієнт живого перетину щілинних сит дорівнює 0,3 – 0,4);  $V$  – швидкість пульпи на вході в апарат ( $V = 3 – 8$  м/с).

Розмір щілинних отворів в ситах дугових і конусних грохотів залежить від крупності розділення (табл. 1. 5).

**Таблиця 1.5 – Залежність розміру щілини сита від крупності розділення**

|                          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Крупність розділення, мм | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| Ширина щілини сита, мм   | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 1,4 | 1,6 | 2,2 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |

Об’ємна продуктивність *барабанних грохотів* з штампованими або дрововими ситами може бути визначена за формулою:

$$Q = q_o F a \varphi, \text{ м}^3/\text{год} \quad (1.32)$$

де  $q_o$  – питома об’ємна продуктивність на 1 мм щілини сита,  $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$  (табл. 1.6);  $F$  – площа сита,  $\text{м}^2$ ;  $a$  – розмір щілини сита грохота, мм;  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення грохота ( $\varphi = 0,15 – 0,25$ ).

**Таблиця 1.6 – питома об’ємна продуктивність барабанних грохотів**

|  |               |               |
|--|---------------|---------------|
| Ефективність грохочення  | E = 75 – 80 % | E = 50 – 60 % |
| Питома об’ємна продуктивність ( $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ) на 1 мм щілини сита | 0,2 – 0,6     | 0,8 – 1,5     |



Продуктивність *циліндричних грохотів* зі спіральною просіювальною поверхнею (ГЦЛ) рекомендується визначати за емпіричною формулою:

$$Q = 470k_a \delta \varphi n s D^2, \text{ т/год}, \quad (1.33)$$

де  $k_a$  – коефіцієнт, що враховує ширину щілин просіювальної поверхні (табл. 1.7),  $\delta$  – насипна густина живлення, т/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення грохота ( $\varphi = 0,15 - 0,25$ ); частота обертання просіювальної поверхні, хв<sup>-1</sup>;  $s$  – крок спіралі, м;  $D$  – діаметр циліндра, м.

**Таблиця 1.7 – Значення поправкового коефіцієнта, що враховує ширину щілин просіювальної поверхні**

|                            |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ширина щілини, мм          | 50   | 75   | 100  | 125  | 150  | 200  | 250  |
| Значення коефіцієнта $k_a$ | 1,00 | 1,33 | 1,42 | 1,73 | 1,83 | 2,00 | 2,13 |

Продуктивність *інерційних грохотів*, що працюють в режимі сухого грохочення, може бути визначена за формулою:

$$Q_o = F \cdot q \cdot \delta \cdot k \cdot l \cdot m \cdot n \cdot o \cdot p, \quad (1.34)$$

де  $F$  – робоча поверхня грохота, м<sup>2</sup>;  $q$  – питома продуктивність грохота, м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup> (табл. 1.8);  $\delta$  – насипна густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – поправковий коефіцієнт на вміст у початковому матеріалі частинок розміром менше половини розміру отворів сита;  $l$  – поправковий коефіцієнт на вміст у початковому живленні частинок більше розміру отвору сита;  $m$  – поправковий коефіцієнт на ефективність грохочення;  $n$  – поправковий коефіцієнт на форму зерен;  $o$  – поправковий коефіцієнт на вологість матеріалу;  $p$  – поправковий коефіцієнт на спосіб грохочення (сухе або мокре).

**Таблиця 1.8 – Питома продуктивність інерційних грохотів при сухому грохоченні**

|   |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |
|---|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| Розмір отвору сит, мм                                     | 1   | 3   | 6  | 13 | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 |
| Питома продуктивність, м <sup>3</sup> /год·м <sup>2</sup> | 4,0 | 7,5 | 13 | 22 | 31 | 42 | 55 | 63  | 90  | 110 |

При мокрому розсіві матеріалу на ситах з розмірами отворів до 25 мм питому продуктивність слід збільшити в 1,5 – 2 рази.

Значення поправкових коефіцієнтів наведено в табл. 1.9.

Вираз (1.34) внаслідок великої кількості емпіричних коефіцієнтів складно застосовувати для розрахунку в реальних умовах, але на якісному рівні він відображає практично усі фактори, від яких залежить продуктивність грохота.

Продуктивність багатоярусних грохотів розраховується окремо для кожного сита. Внаслідок неповного використання сит нижніх ярусів їхня ефективна площа приймається з урахуванням коефіцієнта використання: для II-го сита  $i_2 = 0,9$ ; для III-го сита  $i_3 = 0,6$  (для I-го сита  $i_1 = 1,0$ ).

Залежно від типу сита вводиться поправка на форму його отворів (табл. 1.10).

В практичних умовах розрахунок продуктивності грохота (по одному сити) може бути з достатньою точністю виконаний за формулою:

$$Q = q\delta F, \text{ т/год} \quad (1.35)$$

Ефективність грохочення характеризує повноту відсівання нижнього класу (матеріалу, дрібнішого від розміру отворів сит) у підрешітний продукт. Ефективністю грохочення називається виражене у відсотках або частках одиниці відношення маси підрешітного продукту ( $Q_n$ ) до маси нижнього класу у вихідному матеріалі ( $Q_{нк}$ ):

$$E = 100 Q_n / Q_{нк}, \%, \quad (1.36)$$

Ефективність грохочення може бути отримана за іншою формулою в залежності від вмісту нижнього класу в продуктах грохочення:

$$E = \frac{(\alpha - \beta)(\mathcal{G} - \alpha) \cdot 10^4}{\alpha(100 - \alpha)(\mathcal{G} - \beta)}, \%, \quad (1.37)$$

де  $\alpha$  – вміст нижнього класу у вихідному живленні грохота, % ;  $\beta$  – вміст нижнього класу в надрешітному продукті, % ;  $\mathcal{G}$  – вміст нижнього класу в підрешітному продукті, % .

З достатньою точністю можна вважати, що підрешітний продукт складається тільки з нижнього класу ( $\beta = 100$  %). Тоді одержуємо:

$$\mathring{A} = \frac{\alpha - \beta}{\alpha \cdot (100 - \beta)} \cdot 10^4, \%. \quad (1.38)$$

Таблиця 1.9 – Поправкові коефіцієнти для розрахунку продуктивності інерційних грохотів

| Показники   | Умови грохочення і чисельні значення коефіцієнтів |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | 10  | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 75   | 80   | 90   |
| Вміст у вихідному матеріалі дріб'язку (частинки дрібніше половини розміру отвору сита), % | 0,7   | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 2,0  |
| Значення коефіцієнта <i>k</i>   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Вміст у вихідному матеріалі крупних зерен (частинки крупніше розміру отвору сита), %      | 10  | 20   | 25   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Значення коефіцієнта <i>l</i>   | 0,94  | 0,97 | 1,00 | 1,03 | 1,09 | 1,18 | 1,32 | 1,55 | 2,00 | 3,36 |
| Ефективність грохочення, %  | 80  | 85   | 87,5 | 90   | 92   | 93   | 94   | 95   | 96   | 98   |
| Значення коефіцієнта <i>m</i>   | 1,45  | 1,28 | 1,20 | 1,11 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,80 | 0,67 | 0,44 |
| Форма зерен   | Дроблений матеріал (крім вугілля)                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Значення коефіцієнта <i>n</i>   | 1,00  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Вологість матеріалу   | Сухий   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Значення коефіцієнта <i>o</i> при розмірі отворів сит:                                    | Зерна округлої форми (напр., морська галька)      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| менше 25 мм   | 1   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| більше 25 мм  | 1   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Спосіб грохочення   | Суше  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Значення коефіцієнта <i>p</i> при розмірі отворів сит:                                    | Вологий   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| менше 25 мм   | 0,75 – 0,85                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| більше 25 мм  | 0,9 – 1,0   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Мокре   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1,25 – 1,4  |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Вугілля   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1,50  |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Матеріал, що грудкується  |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,2 – 0,6   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,9 – 1,0   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

**Таблиця 1.10 – Значення поправкового коефіцієнта на форму отворів сит**

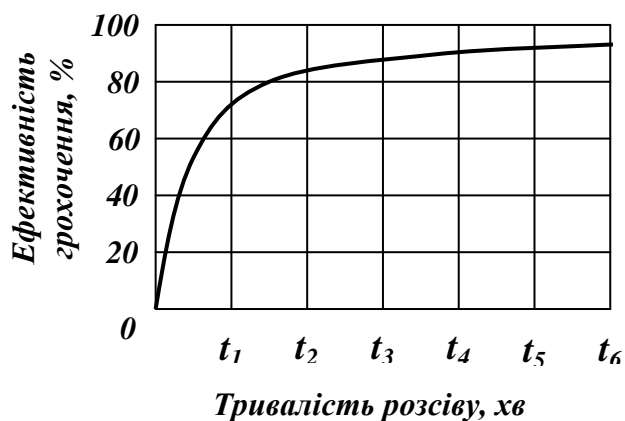
| Сито                | Дротове   |            | Штамповане |        | З гуми або поліуретану |            | Струнне                      |
|---------------------|-----------|------------|------------|--------|------------------------|------------|------------------------------|
|                     | Квадратна | Прямокутна | Квадратна  | Кругла | Щілинна                | Спеціальна |                              |
| Форма отворів сит   |           |            |            |        |                        |            | Поперечне розташування струн |
| Коефіцієнт $k_\phi$ | 1,0       | 1,2        | 0,85       | 0,7    | 1,3                    | 1,4        | 1,8                          |

Між продуктивністю і ефективністю існує зворотна залежність: якщо перша зростає, то друга, за інших рівних умов, знижується.

### 1.5.2 Кінетика процесу грохочення

Ефективність грохочення залежить від ряду технологічних і механічних факторів: гранулометричного складу, форми зерен та вологості матеріалу, що надходить на грохочення, співвідношення середнього діаметра зерен просіюваного матеріалу та діаметра отворів сита, конструкції грохота, товщини шару матеріалу на грохоті (навантаження грохота), режиму його роботи та ін.

Однак, незважаючи на розходження в технологічних і механічних параметрах при грохоченні сипкого матеріалу, спостерігається загальна для усіх випадків залежність ефективності грохочення від тривалості розсіву: в перші проміжки часу ефективність грохочення росте дуже швидко, а потім її ріст сповільнюється (рис. 1.32). Такий характер залежності ефективності грохочення від тривалості розсіву пояснюється тим, що в перші проміжки часу крізь сито проходять «легкі» зерна.



**Рис. 1.32 – Залежність ефективності грохочення від тривалості розсіву.**

В подальші моменти часу на ситі «легких» зерен залишається все менше й менше, а залишаються «важкі» зерна, які вимагають тривалого часу для проходження крізь отвори сита. Крім того, в ході розсіву в матеріалі, що залишився на ситі, зростає вміст «утруднюючих» зерен, які забивають отвори сита і перешкоджають проходженню крізь них матеріалу. Чим менше у вихідному матеріалі «важких» і «утруднюючих» зерен, тим легше його грохочення і тим вище ефективність грохочення.

Залежність ефективності грохочення від тривалості розсіву має експоненціальний характер і може бути визначена за формулою:

$$E = 1 - \exp(-kt^n), \quad (1.39)$$

де  $E$  – ефективність грохочення в момент часу  $t$ , частки од.;  $t$  – тривалість розсіву, с;  $k, n$  – параметри грохочення, які залежать від гранулометричної характеристики вихідного матеріалу, його вологості, вмісту «важких» зерен, режиму роботи грохота та ін.

Після двократного логарифмування рівняння (1.43) має вид:

$$\ln \ln \frac{1}{1-E} = n \ln t + \ln k, \quad (1.40)$$

Залежність ефективності грохочення від тривалості розсіву в системі координат  $\ln \ln \frac{1}{1-E}$ ,  $\ln t$  зображується прямою лінією з кутовим коефіцієнтом  $n$  (рис. 1.33).

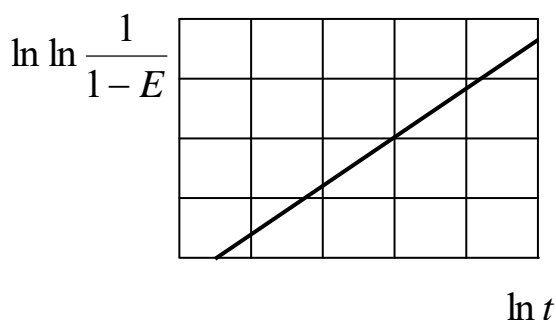


Рис. 1.33 – Залежність ефективності грохочення від тривалості розсіву в системі координат  $\ln \ln [1/(1-E)], \ln t$ .

Якщо швидкість  $V$  переміщення матеріалу по ситі грохота не буде змінюватись по його довжині  $L$ , то тривалість грохочення можна описати як  $t = L/V$ . Тоді формула (1.39) залежності ефективності грохочення від тривалості прийме вигляд:

$$E = 1 - \exp[-k(L/V)]. \quad (1.41)$$

Аналіз рівнянь (1.39) і (1.41) показує, що зі збільшенням навантаження на грохот ефективність грохочення зменшується.

Зі збільшенням навантаження на грохот ефективність знижується, спочатку – повільно, потім – дуже швидко. Це пов'язано з тим, що шар матеріалу на ситі, досягає такої товщини, що за час його просування не відбувається необхідного розшарування і майже весь матеріал сходить з грохота у вигляді надрешітного продукту, тобто грохот перетворюється в транспортний пристрій. Таким чином, висота шару матеріалу на ситі грохота визначається навантаженням по вихідному матеріалу. Чим більше навантаження, тим більше висота шару матеріалу й тим нижче ефективність грохочення, тому що нижньому класу важче пройти до сита крізь товстий шар матеріалу. При зменшенні навантаження нижче деякої межі ефективність грохочення також знижується, тому що при недовантаженні грохота рух матеріалу по грохоту приймає стрибкоподібний характер і число зіткнень зерен з ситом зменшується.

Залежність ефективності грохочення від навантаження визначається багатьма факторами: характеристикою крупності і вологості матеріалу, наявності у ньому «важких» і «утруднюючих» зерен, розміру отворів сит, довжини і кута нахилу короба грохота.

На практики регулювання ефективності грохочення здійснюють зміною кута нахилу сит, розміру та форми їхніх отворів, зміною режиму роботи грохота (амплітуда і частота), зміною витрати води в операцію грохочення.

### **1.5.3 Фактори, що впливають на процес грохочення**

Основні технологічні показники процесу грохочення – *продуктивність грохота і ефективність процесу грохочення* залежать від багатьох факторів, які можна розділити на дві групи:

– фактори, що залежать від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу (гранулометричний склад матеріалу, його густина і вологість, вміст і склад глинистих домішок);

– конструктивно-механічні фактори грохота (спосіб грохочення, рівномірність живлення, форма і розмір отворів просіювальної поверхні, кут нахилу короба, амплітуда і частота коливань).

*Вплив гранулометричного складу.* Просівання зерен нижнього класу сипкого матеріалу крізь сито складається з двох стадій: по-перше, зерна нижнього класу повинні пройти крізь шар зерен матеріалу, щоб досягти поверхні сита; по-друге, зерна нижнього класу повинні пройти крізь отвори сита. Здійсненню цих двох стадій відділення нижнього класу сприяє рух короба грохота. Коливання короба приводять матеріал

в розпушений стан, звільняють отвори сита від зерен, що застряють, а також сприяють сегрегації (крупні зерна переходять у верхній шар, дрібні зерна – в нижній). Дрібні зерна легко проходять крізь отвори сита, але зерна близькі за розміром мають певні утруднення.

Практика грохочення показала, що зерна з діаметрами менше  $\frac{3}{4}$  діаметра отворів сита легко проходять в проміжках між крупними зернами, досягають просіювальної поверхні і негайно провалюються крізь отвори. Такі зерна відносно процесу грохочення називають «легкими» ( $d_l < 0,75d_o$ ). Зерна крупніше  $\frac{3}{4}$  діаметра отворів сита важко проходять в проміжках між крупними зернами і крізь отвори сита. Трудність проходження зростає по мірі приближення розміру зерен до величини розміру отвору сита. Такі зерна відносно процесу грохочення називають «важкими» ( $0,75d_o < d_g < d_o$ ). Зерна, діаметр яких більше 1,5 діаметра отворів сита, суттєво не впливають на переміщення «легких» і «важких» зерен до просіювальної поверхні ( $d_n > 1,5d_o$ ). Але якщо нижній шар матеріалу на ситі складається з зерен, що мають розмір від 1 до 1,5 діаметра отворів сита, процес проникнення «важких» зерен до просіювальної поверхні утруднюється і, крім того, ці зерна забивають отвори сита. При цьому зменшується площа живого перетину сита і знижується якість грохочення. Такі зерна відносно процесу грохочення називають «утруднюючими» ( $d_o < d_y < 1,5d_o$ ).

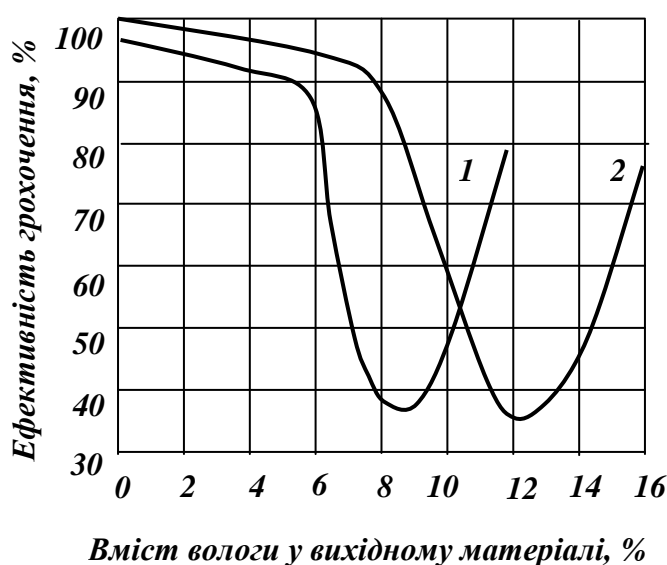
Зі зменшенням вмісту в матеріалі «важких» і «утруднюючих» зерен ефективність процесу грохочення при інших рівних умовах підвищується.

*Вологість вихідного матеріалу.* Вода, що знаходиться в порах і тріщинах зерен, а також хімічно зв'язана на процес грохочення не впливає. Для грохочення має значення вміст зовнішньої вологи, яка вкриває поверхню зерен матеріалу плівкою. Зовнішня волога спричиняє злипання дрібних частинок між собою, налипання їх на великі грудки та замазування отворів сит. Наявність в матеріалі глини навіть при малій вологості значно утруднює процес грохочення. При грохоченні глинистих та в'язких матеріалів приймають спеціальні заходи: перед грохоченням глину відмивають або матеріал підсушують; застосовують мокре грохочення або підогрів сит.

Конкретні дані про вплив вологості на процес грохочення даного матеріалу можна отримати тільки на основі експериментальних робіт. Так, у разі грохочення кам'яного вугілля його розсів сильно утруднюється при вологості понад 6 %. Особливо сильно впливає вологість матеріалу при грохоченні дрібних класів на ситах з невеликими отворами (0,5; 6; 13 мм). Дрібні класи мають найбільшу вологість внаслідок їх порівняно великої питомої поверхні. Зовнішня волога в матеріалі, а також наявність глинистої компоненти спричиняє

злипання дрібних частинок між собою, налипання їх на великі грудки і замазування отворів сит в'язким матеріалом. Все це перешкоджає розшаруванню матеріалу за крупністю на ситі і утруднює проходження дрібних зерен через отвори, внаслідок чого вони залишаються в надрешітному продукті. При певному граничному вмісті вологи (8 – 12%), який залежить від властивостей матеріалу і розміру отворів сита, ефективність грохочення різко падає (рис. 1.34).

Зі збільшенням вологості матеріалу понад 12% рухливість зерен зростає і поступово настають умови для *мокрого грохочення*, тобто грохочення матеріалу з водою, яке і застосовують для обводнених продуктів.



**Рис. 1.34 – Залежність ефективності грохочення від вологості матеріалу.  
1 – невологоємкий матеріал;  
2 – вологоємкий матеріал.**

Витрати води при мокрому грохоченні складають 1 – 3 м<sup>3</sup>/т в залежності від вмісту глинистих домішок, дріб'язку й пилу, які необхідно видалити у підрешітний продукт. Застосування мокрого грохочення переважніше, ніж сухого, тому що воно ефективніше і, крім того, сприяє зниженню запилення виробничих приміщень.

*Розміри поверхні грохочення.* Продуктивність грохота майже прямо пропорційна ширині сита. Збільшення довжини підвищує імовірність проходження частинок крізь сито, збільшуючи ефективність грохочення. Довжина сита повинна бути у 2 – 3 рази більша від ширини сита.

*Насипна густина і форма зерен.* Продуктивність грохочення зростає по мірі збільшення насипної густини і наближення форми частинок до кулястої. Крім того, насипна густина матеріалів, які піддають розсіву, визначає вибір типу грохота: легкого ( $\delta \leq 1,4 \text{ т/м}^3$ ), середнього ( $\delta \leq 1,8 \text{ т/м}^3$ ) або важкого ( $\delta \leq 2,8 \text{ т/м}^3$ ).



*Форма отворів сита.* У практиці грохочення застосовуються просіювальні поверхні з квадратними, щілинними, прямокутними і круглими отворами. Вибір форми отвору залежить від вимог до крупності продуктів грохочення і продуктивності грохота.

Круглі отвори в порівнянні з іншими формами того ж номінального розміру дозволяють отримати більш дрібний підрешітний продукт. Вважають, що максимальний розмір зерен, які проходять крізь квадратні отвори в 1,2 рази, а крізь прямокутні – в 1,4 рази більше максимального розміру зерен, які проходять крізь круглі отвори. При цьому найбільш широко використовуються сита з отворами квадратної форми внаслідок їх легкого виготовлення. Однак щілинні і прямокутні отвори мають переваги більшого живого перетину, меншої схильності до забивання. Для перфорованих поверхонь часто використовують круглі отвори, оскільки вони дають найбільш точне розділення.

*Кут нахилу просіювальної поверхні.* Кут нахилу просіювальної поверхні впливає на розмір зерна, що вільно проходить крізь отвори сита (рис. 1.35).

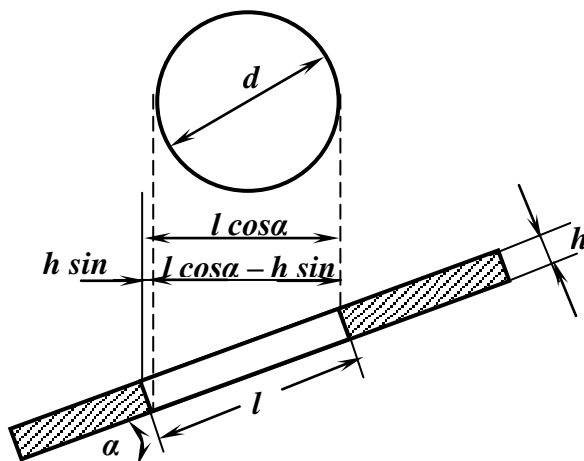


Рис. 1.35 – Проходження зерна крізь отвір похилого решета.

Діаметр зерна, що вільно проходить крізь отвір похилого решета:

$$d = l \cos \alpha - h \sin \alpha, \quad (1.42)$$

де  $d$  – розмір зерна, мм;  $l$  – розмір отвору решета, мм;  $h$  – товщина решета, мм;  $\alpha$  – кут нахилу решета, град.

Вважають, що на похилому решеті віброгрохота отримують нижній продукт тієї ж крупності, що й на горизонтальному, якщо розмір отворів похилого решета більше розміру отворів горизонтального в 1,15 рази при куті нахилу  $20^\circ$  і в 1,25 рази при куті нахилу  $25^\circ$ .

Пропорційно зміні кута нахилу просіювальної поверхні змінюється продуктивність грохота і обернено пропорційно – ефективність грохочення та крупність нижнього продукту.

*Товщина шару матеріалу на ситі.* Існує оптимальна товщина шару матеріалу, при якій спостерігається максимальна швидкість грохочення. Для найбільш успішного грохочення вихідна товщина шару матеріалу на ситі не повинна перевищувати 3 – 4 кратних розміри отворів сита.

*Швидкість руху зерен по просіювальній поверхні.* Швидкість руху зерен матеріалу по просіювальній поверхні визначає продуктивність грохота як транспортного засобу.

При русі зерна по просіювальній поверхні можливі два варіанта (рис. 1.36):

– при нормальній швидкості (рис. 1.36 *a*) після зіткнення з кромкою  $A_1$  отвору решета центр  $O_1$  зерна займає положення на рівні або нижче точки  $A_1$ , при якому викид зерна угору на поверхню решета неможливий, тому що відновлювальний момент відсутній; зерно пройде через отвір решета;

– при підвищеній швидкості (рис. 1.36 *б*) після зіткнення з кромкою  $A_1$  отвору решета центр  $O_1$  зерна займає положення на рівні вище точки  $A_1$ , при якому можливий викид зерна угору на поверхню решета, тому що присутній відновлювальний ефект; зерно не пройде через отвір решета.

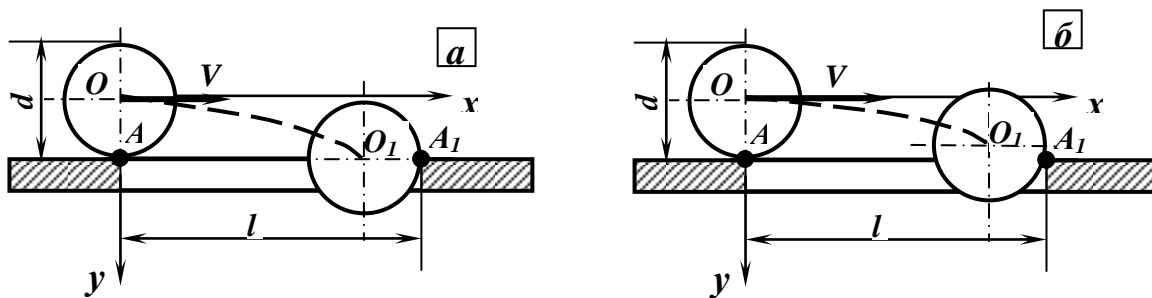


Рис. 1.36 – Вплив швидкості руху зерна на його проходження скрізь отвір решета.

Для проходження крізь отвір решета швидкість руху зерна повинна бути:

$$V \leq (l - d/2)\sqrt{g/d}, \text{ м/с.} \quad (1.43)$$

де  $d$  – діаметр зерна, м;  $l$  – розмір отвору решета, м.

Швидкість руху зерна отримана без урахування його підкидання тобто відновлювальний момент після удару зерна об поверхню решета

відсутній. Експериментальні дані показують, що фактична швидкість руху зерна в декілька разів перевищує швидкість, яка розрахована з використанням формули (1.43). Тому оптимальна швидкість подачі зерна на грохот повинна встановлюватись експериментально в залежності від продуктивності грохота і необхідної ефективності. Для інерційних грохотів з похилою просіювальною поверхнею рекомендується приймати швидкість подачі матеріалу в межах 0,6 – 0,8 м/с.

*Амплітуда і частота коливань короба.* Амплітуда і частота коливань короба впливають на продуктивність і ефективність грохочення. Збільшення амплітуди і частоти коливань приводить до збільшення числа контактів зерен з просіювальною поверхнею, поліпшення умов самоочищення сита від зерен, що застряють в отворах, внаслідок чого збільшуються продуктивність і ефективність грохочення. Однак збільшення амплітуди і частоти обмежене механічною міцністю грохота.

При грохоченні крупного матеріалу приймають більші амплітуди і менші частоти, при грохоченні дрібного матеріалу – менші амплітуди і більші частоти.

Для віброгрохотів рекомендується застосовувати такі емпіричні формули для визначення параметрів коливань короба:

– для похилих віброгрохотів з круговими коливаннями:

$$n = 265\sqrt{l/r}, \quad (1.44)$$

– для горизонтальних віброгрохотів з прямокутними коливаннями:

$$n = \frac{5(1 + 12,5l)}{a}, \quad (1.45)$$

де  $n$  – частота коливань,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $l$  – розмір отвору решета, м;  $r$  – радіус коливань, м;  $a$  – напіврозмах коливань:

$$a = 0,004 + 0,14l, \text{ м.} \quad (1.46)$$

Частота коливань повинна зменшуватися, а амплітуда зростати по мірі збільшення розміру отворів сита грохота.

## 2 ДРОБЛЕННЯ

### 2.1 Характеристика процесів дроблення і подрібнення

Дробленням і подрібненням називають процеси руйнування і зменшення розмірів грудок сировини під дією зовнішніх механічних, теплових, електричних сил, направлених на подолання внутрішніх сил зчеплення, що зв'язують між собою частинки твердого тіла. В практиці для дроблення і подрібнення корисних копалин застосовують переважно зовнішні механічні впливи.

Між дробленням і подрібненням принципового розходження немає. Умовно вважають, що при дробленні одержують зерна крупністю більше 5 мм, а при подрібненні – менше 5 мм. Залежно від крупності вихідного і дробленого (подрібненого) продуктів розрізняють три стадії дроблення і три стадії подрібнення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. – Стадії дроблення і подрібнення

| Дроблення         |                         |            | Подрібнення         |                     |              |  |
|-------------------|-------------------------|------------|---------------------|---------------------|--------------|--|
| Стадія            | Крупність продуктів, мм |            | Стадія              | Крупність продуктів |              |  |
|                   | вихідного               | дробленого |                     | Розмір зерна (мм) у |              | Вміст класу – 0,074 мм у подрібненому, % |
|                   |                         |            |                     | вихідному           | подрібненому |  |
| Крупне дроблення  | 1200 - 500              | 350 - 100  | Крупне подрібнення  | 20 - 40             | до 5         | 50 - 60                                  |
| Середнє дроблення | 350 - 100               | 100 - 40   | Середнє подрібнення | до 5                | до 0,6       | 60 - 80                                  |
| Дрібне дроблення  | 100 - 40                | 40 - 10    | Тонке подрібнення   | до 5                | до 0,15      | понад 85                                 |

Дроблення і подрібнення на збагачувальних фабриках використовують для роз'єднання тісно переплетених і зрослих між собою зерен різних мінералів, що містяться в корисній копалині. Чим повніше відбувається розкриття зерен корисної копалини при дробленні і подрібненні, тим більш успішне його наступне збагачення. Крупність дроблення і подрібнення корисних копалин залежить від їхнього

мінерального складу, вкраплення корисних мінералів, подальшого методу збагачення і характеру використання продуктів збагачення.

При дробленні і подрібненні будь-яких матеріалів слід дотримуватися принципу «не дробити нічого зайвого», тому що переподрібнення приводить до зайвої витрати електроенергії, збільшення зносу дробарок і млинів, зменшення їхньої продуктивності і погіршення показників збагачення.

Кількісною характеристикою процесів дроблення і подрібнення служить *ступінь дроблення* або *подрібнення*, яка показує у скільки разів зменшився розмір грудок (зерен) матеріалу при дробленні або подрібненні.

*Ступенем дроблення (подрібнення)* називається відношення розмірів зерна вихідного матеріалу до розмірів зерна дробленого (подрібненого) матеріалу.

Для визначення ступеня дроблення (подрібнення) запропоновано декілька розрахункових формул.

У промислових умовах для орієнтовного визначення ступеня дроблення (подрібнення) широко використовують формулу із застосуванням максимальних розмірів зерен вихідного і дробленого матеріалів:

$$i = D_{\max} / d_{\max}, \quad (2.1)$$

де  $i$  – ступінь дроблення (подрібнення);  $D_{\max}$ ,  $d_{\max}$  – розміри максимального зерна (грудки) у вихідному і дробленому (подрібненому) матеріалі, мм.

З більшою точністю ступінь дроблення (подрібнення) визначають як відношення середніх діаметрів зерен у продуктах до  $i$  після дроблення (подрібнення):

$$i = D_{\text{сер}} / d_{\text{сер}}, \quad (2.2)$$

де  $D_{\text{сер}}$ ,  $d_{\text{сер}}$  – середні діаметри зерен (грудок) вихідного і дробленого (подрібненого) матеріалу, мм.

Також знаходять застосування формули:

– для оцінки ступеня дроблення:

$$i = D_{80} / d_{80}; \quad (2.3)$$

– для оцінки ступеня подрібнення:

$$i = D_{95} / d_{95}, \quad (2.4)$$

де  $D_{80}$ ,  $d_{80}$  – розмір квадратних отворів, крізь які проходить 80 % вихідного і дробленого матеріалу, мм;  $D_{95}$ ,  $d_{95}$  – розмір квадратних отворів, крізь які проходить 95 % вихідного і подрібненого матеріалу, мм.

На машинобудівних заводах для характеристики дробарок використовують конструктивну ступінь дроблення, яка визначається за формулою:

$$i = 0,85B/s, \quad (2.5)$$

де  $B$  – ширина завантажувального отвору дробарки, мм;  $s$  – ширина розвантажувальної щілини дробарки, мм.

Величину  $0,85B$  називають ефективною шириною завантажувального отвору дробарки. Вважають, що розмір максимальної грудки матеріалу, який надходить у дробарку, повинен бути на 15 % менше ширини завантажувального отвору, а розмір максимальної грудки у дробленому продукті повинен дорівнювати ширині розвантажувальної щілини.

На збагачувальних фабриках дроблення і подрібнення корисних копалин звичайно здійснюють за кілька стадій, тому що необхідний ступінь дроблення в одній машині одержати практично важко. Частина загального процесу дроблення або подрібнення, яка здійснена в одній машині, називається *стадією дроблення (подрібнення)*. Ступінь дроблення (подрібнення), що досягається в окремій стадії, називається частковим, а у всіх стадіях – загальним. Загальний ступінь дроблення дорівнює добутку ступенів дроблення (подрібнення) в окремих стадіях:

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n. \quad (2.6)$$

Число стадій дроблення і подрібнення залежить від фізико-механічних властивостей корисної копалини, вкраплення корисного мінералу і крупності, що допускається подальшим процесом збагачення. Машини, у яких здійснюються процеси дроблення і подрібнення, називаються відповідно *дробарками* і *млинами*.

Ефективність  $E$  роботи дробарок (млинів) оцінюється кількістю дробленого (подрібненого) продукту на 1 квт·год витраченої електроенергії, а величина зворотна ефективності називається питомою витратою енергії  $e$ :

$$E = Q / E^*, \text{ т/Дж}; \quad (2.7)$$

$$e = E^* / Q, \text{ Дж/т}, \quad (2.8)$$

де  $Q$  – маса дробленого (подрібненого) продукту, т;  $E^*$  – енергія витрачена на дроблення (подрібнення), Дж.

## 2.2 Закони дроблення

Закони дроблення визначають роботу, яку виконують зовнішні сили при руйнуванні грудок корисної копалини, що дробиться. Ця робота витрачається на подолання сил взаємного зчеплення частинок твердої речовини. Сили зчеплення, що діють у зернах (грудках) гірських порід, можна розділити на дві групи :

- сили, що діють всередині кристалів,
- сили, що діють між окремими кристалами.

Ці сили мають однакову фізичну природу і розрізняються між собою тільки величиною (сили другої групи значно менші сил першої групи). Величина сил зчеплення визначається природою і структурою кристалів, що утворюють зерна (грудки, шматки) корисної копалини, але залежить також від різних дефектів у кристалічній структурі (мікро- і макротріщин), що послабляють міцність зерен. При дробленні зерна корисних копалин руйнуються по найбільш слабких перетинах (тріщинах, дислокаціях тощо). Таким чином, при дробленні відбувається ніби ліквідація слабких місць і зміцнення матеріалу.

Робота, витрачена на дроблення, частково витрачається на деформацію грудок, що руйнуються, частково витрачається на утворення поверхонь, що знову оголюються.

В сучасній теорії і практиці дроблення і подрібнення використовують чотири основних закони (гіпотези), які є емпіричними.

За законом *Ріттингера*, робота, витрачена на подрібнення, пропорційна новоутвореній поверхні:

$$A = k\Delta S, \quad (2.9)$$

де  $k$  – коефіцієнти пропорційності;  $\Delta S$  – нова утворена поверхня.

Припустимо, що при дробленні однієї кубічної грудки з ребром  $D$  вона руйнується на  $n$  кубиків з ребром  $d$  ( $n = D^3 / d^3$ ).

Площі поверхонь первинного  $S_1$  і отриманих  $S_2$  кубів будуть:

$$S_1 = 6D^2; \quad S_2 = 6d^2 D^3 / d^3.$$

Площа нової утвореної поверхні:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 6D^2(D/d - 1) = 6D^2(i - 1), \quad (2.10)$$

де  $i$  – ступінь подрібнення.

Робота, затрачувана на подрібнювання цього зерна, буде:

$$A = A_0 \Delta S = 6A_0 D^2 (i - 1) = k_R D^2, \quad (2.11)$$

де  $A_0$  – робота затрачувана на утворення одиниці нової поверхні;  $k_R$  – коефіцієнт пропорційності при роботі, затрачуваній на утворення нової поверхні  $k_R = 6A_0(i - 1)$ .

Питома робота, затрачувана на утворення нової поверхні, залежить від природи матеріалу, його крупності, ступеня і способу подрібнення. Закон Ріттингера справедливий при тонкому подрібненні, коли енергія витрачається в основному на утворення нової поверхні, тобто при високому ступені подрібнення. Він не враховує зміни опору матеріалу подрібненню в міру зменшення його крупності.

За законом Кіка-Кірпічова, витрата енергії на дроблення матеріалу (деформацію грудок) пропорційна його об'єму або масі:

$$A = k \Delta V = k_k D^3, \quad (2.12)$$

де  $k$ ,  $k_k$  – коефіцієнти пропорційності при роботі, затрачуваній на деформацію грудок матеріалу, що дробиться;  $\Delta V$  – деформований об'єм руйнованої грудки з ребром  $D$ .

Це рівняння справедливе при дробленні великих грудок з малим ступенем дроблення, коли енергією, що витрачається на утворення нової поверхні, можна зневажити.

За законом Ребіндера повна робота дроблення дорівнює сумі робіт деформацій і утворення нової поверхні:

$$A = K_k \cdot D^3 + K_R \cdot D^2, \quad (2.13)$$

тобто Ребіндер обґрунтовано припустив, що руйнування грудки настає після її деформації. Таким чином, закон Ребіндера об'єднує два попередніх (Ріттингера і Кірпічова-Кіка).

За законом Бонда, робота, затрачувана на дроблення, пропорційна середньому геометричному об'єму і площі зерна, що руйнується:

$$A = k_B \sqrt{D^2 D^3} = k_B D^{2,5}, \quad (2.14)$$

де  $k_B$  – коефіцієнт пропорційності при визначенні повної роботи.



За законом Бонда, роботу можна приблизно визначити для крупного, середнього і дрібного дроблення при середніх ступенях дроблення.

Існує також ряд інших узагальнених формул для визначення роботи дроблення (подрібнення).

Так як коефіцієнти пропорційності рівняння законів дроблення (2.11) – (2.14) невідомі, ці закони не можуть бути використані для кількісних розрахунків по визначенню величини роботи, але їх можна застосувати при якісному дослідженні процесів дроблення і подрібнення.

### **2.3 Міцнісні характеристики гірських порід і способи їх руйнування**

Основні властивості гірських порід можна розділити на дві групи: *фізичні і механічні*.

*Фізичні* – густина, пористість, вологість, змочуваність, магнітна сприйнятливість, електричний опір та ін. *Механічні* – міцність, твердість, тривкість, пластичність та ін.

При руйнуванні гірських порід механічним способом першорядне значення мають їх механічні властивості, які характеризують здатність до опору силовим впливам і в залежності від виду й інтенсивності останніх до зміни розмірів, форми і стану.

*Міцність* – властивість гірської породи в певних умовах і межах, не руйнуючись, сприймати ті або інші силові впливи (зокрема впливи механічних навантажень, температурних, магнітних, електричних і інших полів, нерівномірне протікання фізико-хімічних процесів у різних частинах гірських порід і ін.).

Показниками, що характеризують *міцність гірських порід* для різних випадків, є: границі міцності порід на стиснення  $\sigma_{cm}$ , розтягнення  $\sigma_p$ , зсув  $\sigma_{zc}$ , вигин  $\sigma_{виг}$ , а також текучості  $\sigma_m$ , повзучості  $\sigma_n$  та ін. Для більшості порід границя міцності на розтягнення  $\sigma_p$  не перевищує 20 МПа. Границі міцності порід при зсуві, вигині та інших видах деформацій завжди менші  $\sigma_{cm}$  і більші  $\sigma_p$ , але ближчі до останньої. З породотвірних мінералів найбільшу міцність має кварц. У нього  $\sigma_{cm}$  перевищує 500 МПа, у польових шпатів, піроксенів, авгіту, рогової обманки, олівіну та інших залізо-магнезійних мінералів  $\sigma_{cm} = 200-500$  МПа, у кальциту  $\sigma_{cm}$  близько 20 МПа. У полікристалічних гірських породах міцність в основному визначається силами взаємного зчеплення безпосередньо дотичних між собою зерен і насамперед залежить від їх міцності, а також будови. Найбільші значення границі

міцності при стисненні мають щільні дрібнозернисті кварцити і нефрити (500-600 МПа). Значну міцність (більше 350 МПа) мають щільні дрібнозернисті граніти, трохи меншу – габро, діабазити і грубозернисті граніти. Міцність вугілля при стисненні змінюється в залежності від ступеня його метаморфізму і зольності від 1 МПа (коксівне вугілля) до 35 МПа (антрацити). Для вугілля показники міцності на стиснення  $\sigma_{cm}$ , зсув  $\sigma_{zc}$ , розтягнення  $\sigma_p$  знаходяться в такому співвідношенні:  $\sigma_{cm} : \sigma_{zc} : \sigma_p = 1 : 0,3 : 0,1$ .

*Твердість* – властивість гірської породи, не руйнуючись, чинити опір при зосередженому контактному силовому впливі. Твердість – характеристика гірських порід, що відображає їх *міцність*.

У залежності від методу випробування розрізняють *твердість дряпання, втиснення, шліфування*.

При використанні методу дряпання по поверхні переміщують гострий алмазний наконечник або еталонний мінерал. Міра твердості – величина зусилля, з яким протягається наконечник, ширина і об'єм подряпини. У практиці широко застосовується шкала Мооса – десятибальна шкала твердості мінералів, за якою розрізняють десять ступенів твердості. Відносна твердість мінералів за цією шкалою визначається шляхом дряпання мінералу, який досліджується, гострими краями еталонних мінералів (пасивна твердість) або дряпання еталонних мінералів досліджуваним зразком (активна твердість). Еталонами є: 1 – тальк, 2 – гіпс, 3 – кальцит, 4 – флюорит, 5 – апатит, 6 – ортоклаз, 7 – кварц, 8 – топаз, 9 – корунд, 10 – алмаз. Мінерал з більшою твердістю дряпає мінерал з меншою твердістю, тобто кожний наступний мінерал цього ряду здатний дряпати попередній мінерал, але не дряпає наступного за ним, більш твердого. Якщо, напр., гіпс не залишає подряпини на поверхні мінералу, що досліджується, а кальцит залишає, то його твердість вважають рівною 2,5. Шкалу Мооса використовують для швидкої діагностики мінералів. Визначення твердості за шкалою Мооса зручне в польових умовах.

У методах свердлування твердість визначають за показниками взаємодії свердла і породи. Критерії твердості в цьому випадку: об'ємна робота руйнування, величина крутильного моменту і ін. За методом Ф.Пфаффа і Т.А.Джаггара використовують алмазні наконечники, за методом А.М.Янчура і О.М.Кульбачного – різці, армовані твердими сплавами. Поширене також визначення твердості за висотою відскоку бойка з алмазним наконечником, що скидається на поверхню гірської породи з фіксованої висоти (метод А.Ф.Шора). У сучасній практиці широко використовують методи втиснення інденторів у досліджуваний зразок. При цьому твердість визначають методами Ю.Брінелля, С.Роквелла і ін., випробуваними в металознавстві. У гірничій справі

застосовується показник твердості, що визначається за методом Л.А.Шрейнера шляхом виколювання (заглибини) лунки в шліфованій поверхні породи під дією навантаження, прикладеного до штампу з плоскою круглою основою. Чисельне значення твердості – відношення максимальної сили, що діє на штамп у момент виколювання лунки, до площі контактної поверхні. Аналогічним шляхом визначають контактну міцність за методом Л.І.Барона і Л.Б.Глатмана. Відмінність полягає в тому, що індентор втискують у природну (необроблену) поверхню породи. Показники твердості використовують при проектуванні засобів механізації гірничих робіт, оптимізації режимів експлуатації породоруйнуючих органів, обґрунтуванні нормативів продуктивності різних конструкцій інструментів і т.д.

*Пластичність* – властивість гірської породи під дією зовнішніх сил змінювати, не руйнуючись, свою форму і розміри.

Глинисті породи, леси, мергелі, крейда, ґрунти, що залягають на поверхні землі, набувають пластичності за певних умов зволоження, глибинні гірські породи – під дією температури й тиску (пластичність збільшується із зростанням температури і тиску). Пластичність залежить від мінерального складу гірських порід. Наявність жорстких кварцових зерен та польового шпату у породі зменшує її пластичність. Пластичність вугілля залежить від вмісту в ньому вуглецю. При переході від малометаморфізованого вугілля до антрацитів пластичність зменшується в 30 разів. Щодо глинистих порід, то в залежності від ступеня їх зволоженості вони можуть бути крихкими, пластичними і текучими.

*Тривкість гірських порід* – загальне умовне поняття, яке символізує сукупність механічних властивостей гірських порід, що виявляється в різних технологічних процесах при видобутку і переробці корисних копалин. Тривкість залежить від твердості, в'язкості, крихкості, пружних властивостей, мінералогічного складу і структури. Тривкість зростає зі збільшенням сил зв'язку між частинками і окремостями гірських порід та вмісту міцних мінералів у породі і знижується, як правило, при зволоженні. За М.М.Протодьяконовим, виділено 10 категорій тривкості (табл. 2.2). Метод експериментального визначення коефіцієнта тривкості ( $f$ ), запропонований М.М.Протодьяконовим, оснований на відносній оцінці роботи, затраченої на дроблення гірської породи вантажем масою 2,4 кг, що вільно падає з висоти 0,6 м.

Коефіцієнт тривкості  $f$  визначають у залежності від межі міцності на стиск  $\sigma_{cm}$ :

$$f = 0,01\sigma_{cm}. \quad (2.15)$$

**Таблиця 2.2. – Класифікація тривкості гірських порід  
(за М.М.Протодьяконовим)**

| Категорія | Ступінь тривкості породи   | Гірські породи  | $K_{тр}$ |
|-----------|----------------------------|---|----------|
| I         | Найвищий                   | Кварцити, базальти та ін. винятково міцні породи  | 20       |
| II        | Дуже тривкі породи         | Граніт, кварцові порфіри, кременистий сланець, пісковики та вапняки підвищеної міцності, деякі кварцити   | 15       |
| III       | Тривкі породи              | Граніти та гранітні породи, пісковики і вапняки, міцні мінерали залізних руд  | 10       |
| III-a     | Тривкі породи              | Вапняки, деякі граніти (неміцні), пісковики, мрамур, доломіт, колчедани   | 8        |
| IV        | Досить тривкі породи       | Звичайний пісковик, залізисті руди  | 6        |
| IV-a      | Досить тривкі породи       | Піскуваті сланці, сланцеві пісковики  | 5        |
| V         | Породи середньої тривкості | Міцний глинистий сланець, неміцні різновиди пісковика і вапняку, м'який конгломерат   | 4        |
| V-a       | Те саме                    | Різноманітні неміцні сланці, щільний мергель  | 3        |
| VI        | Досить м'які породи        | М'який сланець, дуже м'який вапняк, крейда, кам'яна сіль, гіпс, мерзлий ґрунт, антрацит, звичайний мергель, зруйнований пісковик, кам'янистий ґрунт | 2        |
| VI-a      | Досить м'які породи        | Щебенистий ґрунт, зруйнований сланець, злежалі галька та щебінь, тверде кам'яне вугілля, затверділа глина   | 1,5      |
| VII       | М'які породи               | Глина (щільна), м'яке кам'яне вугілля, міцні наноси   | 1,0      |
| VII-a     | М'які породи               | Легка піскова глина, лес, гравій  | 0,8      |
| VIII      | Землянисті породи          | Чорнозем, торф, легкий суглинок, сирий пісок  | 0,6      |
| IX        | Сипучі породи              | Пісок, осипи, дрібний гравій, насипна земля, видобуте вугілля   | 0,5      |
| X         | Пливкі породи              | Пливуни, болотистий ґрунт, розріджений лес, розріджено-зволожений ґрунт   | 0,3      |

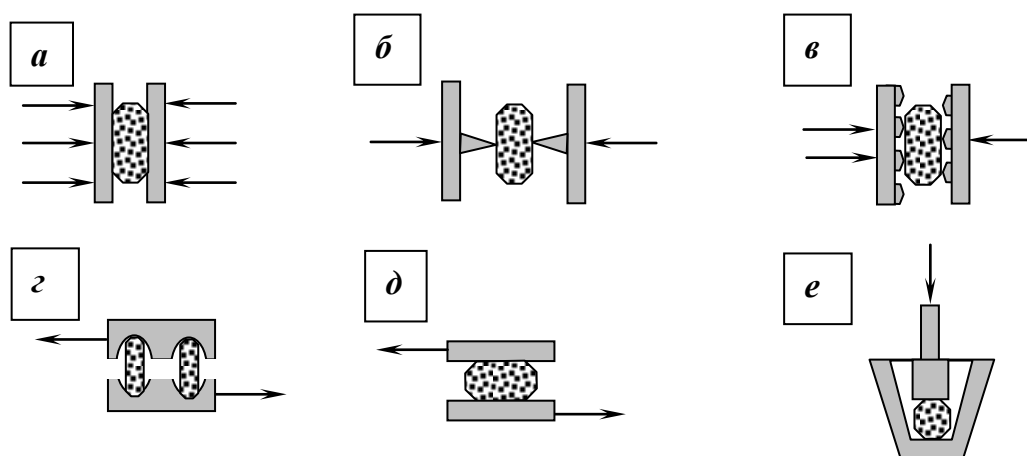
Показники властивостей гірських порід залежать від їхнього складу і будови. Сили зчеплення між кристалами, цементуючою речовиною і уламками змінюються в широкому діапазоні, що обумовлює великі коливання у механічних властивостях гірських порід. На механічні властивості гірських порід впливають вологість, пористість, шаруватість, крупність мінеральних зерен, поверхневі характеристики тонко дисперсних гірських порід, зокрема ступінь їх гідрофільності та ін.

Процес дроблення і подрібнення гірської породи починається з її руйнування по тріщинах і найбільш слабких місцях. Машини для дроблення і подрібнення забезпечують необхідні для руйнування грудок корисної копалини зусилля (рис. 2.1), основні з яких – роздавлювання, розколювання, стирання і удар (злам і зрізання мають в процесі підлегле значення):

– *роздавлювання* (рис. 2.1 а) – руйнування грудки в результаті стиснення між двома подрібнюючими поверхнями. При дробленні роздавлюванням утворюється велика кількість дрібних зерен, особливо при дробленні крихких корисних копалин. Цей спосіб застосовується, якщо при дробленні корисної копалини допускається підвищений вихід дріб'язку;

– *розколювання* (рис. 2.1 б) – руйнування грудки в результаті її розклинення між вістрями подрібнюючих поверхонь. Розколювання характеризується мінімальним утворенням дріб'язку, тому застосовується у тих випадках, коли переподрібнення небажане (напр., при підготовці вугілля до збагачення);

– *злам* (рис. 2.1 в) – руйнування грудки в результаті згину, виявляється при ребристій формі подрібнюючих поверхонь; має підлегле значення;



**Рис. 2.1 – Способи дроблення корисних копалин:**  
**а** – роздавлювання; **б** – розколювання; **в** – злам;  
**г** – зрізання; **д** – стирання; **е** – удар.

– *зрізання* (рис. 2.1 *з*) – руйнування грудки в результаті створюваних при дробленні напругах зрушення (зсуву); має також підлегле значення;

– *стирання* (рис. 2.1 *д*) – руйнування грудки в результаті впливу двох подрібнюючих поверхонь, які зміщаються одна відносно одної. Стирання характеризується утворенням великої кількості тонких класів, тому широко використовується в пробообробних машинах;

– *удар* (рис. 2.1 *е*) – руйнування грудки в результаті впливу короткочасних динамічних навантажень. Дроблення ударом приводить насамперед до руйнування по тріщинах, поверхнях зіткнення, дислокаціях зерен окремих компонентів. Цей спосіб знаходить застосування при дробленні промпродуктів і тонкому подрібненні корисних копалин.

Конструкція дробарки звичайно базується на використанні одного зі способів дроблення, а інші можуть мати підлегле значення.

Вибір способу руйнування корисної копалини, а отже, і типу дробарки або млина, залежить від її дробильності, мінерального складу, тріщинуватості, крупності та інших властивостей, а також від необхідного гранулометричного складу дробленого продукту.

Процеси дроблення і подрібнення застосовують головним чином для підготовки корисної копалини до подальшого збагачення. Основна мета цих процесів – доведення розмірів грудок корисної копалини до кінцевої крупності, обумовленої вкрапленням корисних мінералів і необхідною повнотою їхнього розкриття.

З міркувань конструктивного характеру, а також унаслідок небажаності переподрібнення, на збагачувальних фабриках застосовуються дробарки, що працюють головним чином роздавлюванням і ударом при додаткових стираючих і згинаючих діях на матеріал, що дробиться.

Машини для дроблення і подрібнення, застосовувані на збагачувальних фабриках, за способом руйнування гірських порід і механіко-конструктивними ознаками розділяються на п'ять основних класів: дробарки щоківі, конусні, валкові, ударної дії і барабанні млини.

## **2.4 Дослідження дробимості корисних копалин**

Доцільність використання того або іншого типу дробарки визначається на самперед фізико-механічними властивостями корисної копалини. При дробленні узагальнюючим параметром механічних властивостей корисної копалини є дробимість (дробильність).

Існує значна кількість методів визначення дробимості, які розроблені у відповідності з вимогами окремих галузей промисловості.

Для дроблення мінеральної сировини з метою її подальшого збагачення застосовуються такі методики: стандартна, Механобрчормету, Уралмеханобру, Механобру та фірми «Алліс-Чалмерс».

Стандартна методика. Дробимість визначається на гідравлічному пресі руйнуванням проб матеріалу крупністю  $-10+6$ ,  $-20+10$ ,  $-40+20$  мм. Пробу засипають у циліндр діаметром 75(100) мм і вводять у нього плунжер. Циліндр установлюють на нижню плитку преса. Підвищуючи зусилля на плунжер зі швидкістю 1 – 2 кН/с, доводять його до 50 кН. При цьому плунжер опускається на відстань  $g$ . Пробу висипають з циліндра і просівають на контрольному ситі (1,25; 2,5 або 5 мм у залежності від крупності вихідного матеріалу). Залишок на контрольному ситі після сухого або мокрого просівання зважують.

Дробильність  $D^*$  матеріалу визначається за формулою:

$$D^* = 100(m - m_1) / m, \%, \quad (2.16)$$

де  $m$  і  $m_1$  – маса відповідно вихідної навіски і залишку на контрольному ситі, кг.

Формула (2.16) відображує відносну зміну крупності матеріалу наростанням вмісту якогось вузького класу. Оскільки витрачена енергія при умові  $P_{\max} / t = \text{const}$  може бути визначена як  $N = 9,81 P_{\max} S / t$  (де  $P_{\max}$  – навантаження руйнування,  $t$  – час руйнування), то хід плунжера визначає енергію руйнування.

*Методика Механобрчормету.* Визначення дробильності засновано на оберненій пропорційності ходу плунжера та руйнуючого навантаження (міцності порід). Енергія дроблення у даному випадку виражається питомою роботою руйнування, що базується на стандартному методі визначення коефіцієнта міцності. Питома робота руйнування визначається як:

$$a = A / V, \text{ МДж/м}^3, \quad (2.17)$$

де  $A$  – робота руйнування корисної копалини, МДж;  $V$  – об'єм дріб'язку ( $-0,5$  мм), що утворився у процесі дроблення,  $\text{м}^3$ .

Методика полягає у наступному. Відбирають зразки матеріалу крупністю 20 – 30 мм, з яких готують 5 ідентичних наважок масою по 150 г. Кожну наважку послідовно руйнують у трубчастому копрі діаметром 50 – 60 мм, в якому з висоти 500 мм скидають копрову гирю ма-

сою 2,4 кг. Число скидань складає 5 – 20 (чим міцніше матеріал, тим більше число скидань). Роздроблену наважку просіюють крізь сито з чарунками 0,5 мм. Після ущільнення вимірюють об'єм дрібного продукту і визначають питому роботу руйнування:

$$a = 49Hnm_* / V, \text{ Дж/м}^3, \quad (2.18)$$

де 49 – емпіричний коефіцієнт, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – висота скидання копрової гирі, м;  $n$  – число скидань;  $m_*$  – маса копрової гирі, кг;  $V$  – сумарний об'єм дріб'язку, м<sup>3</sup>.

Перехід від питомої роботи руйнування до коефіцієнта міцності по М.М.Протодьяконову здійснюється за емпіричною формулою:

$$f = 1,98(a/9,8)^{0,1}. \quad (2.19)$$

*Методика Уралмеханобру* призначена для визначення дробильності проб невеликого об'єму в лабораторній дробарці. Як еталонну використовують пробу, відібрану на діючому підприємстві. Еталонну та досліджувану проби масою 0,2 – 5 кг подрібнюють до крупності 3 – 20 мм в лабораторній щоківій дробарці при ширині розвантажувальної щілини 3 мм. Визначають потужність робочого та холостого ходу дробарки за допомогою ватметра (самописця), а також характеристики крупності вихідних та дроблених продуктів. Розраховують продуктивність  $Q$  (кг/год) і питому витрату енергії  $E$  (кВт·год/т). За результатами експерименту визначають такі показники:

- відносну продуктивність:

$$Q = Q_{\text{досл}} / Q_{\text{ет}}, \quad (2.20)$$

- відносну крупність:

$$d = d_{\text{досл}} / d_{\text{ет}}, \quad (2.21)$$

- відносну питому витрату енергії:

$$E = E_{\text{досл}} / E_{\text{ет}}, \quad (2.22)$$

де  $Q_{\text{досл}}$ ,  $Q_{\text{ет}}$  – продуктивність дробарки на досліджуваній та еталонній руді, відповідно;  $d_{\text{досл}}$ ,  $d_{\text{ет}}$  – крупність досліджуваної та еталонної руди, що визначена по 5 %-му залишку на ситі;  $E_{\text{досл}}$ ,  $E_{\text{ет}}$  – питома витрата енергії при дробленні на досліджуваній та еталонній руді.



*Методика Механобру* полягає у тому, що пробу для досліджень одержують дробленням матеріалу у шоковій дробарці ЩДП-2,3х3,2 та після видалення з нього дрібного класу крупністю менше ширини розвантажувальної щілини конусної дробарки КСД-600 направляють на дроблення у КСД-600. У конусній дробарці КСД-600 підготовлену пробу масою 150 – 300 кг крупністю 7(5) – 50(40) мм дроблять і визначають потужність дробарки при роботі під навантаженням.

Як показник дробильності прийнятий індекс роботи  $W_i$  (кВт·год/т), який являє собою опір матеріалу при дробленні або подрібненні. Індекс роботи дорівнює витраті енергії (кВт·год/т), що необхідна для скорочення матеріалу від теоретично безкінечного розміру до 80 % класу – 0,1 мм.

Індекс роботи визначають за формулою:

$$W_i = \frac{0,1(N_p - N_x)}{Q} \cdot \frac{\sqrt{l_1}}{\sqrt{l_1/l_2} - 1}, \text{ кВт}\cdot\text{год/т}, \quad (2.23)$$

де  $N_p$  – потужність дробарки при роботі під навантаженням, кВт;  $N_x$  – потужність холостого ходу дробарки; кВт;  $Q$  – продуктивність дробарки, т/год;  $l_1$  і  $l_2$  – розміри квадратних отворів сит, крізь які проходить 80 % вихідного і дробленого, мм.

Експериментальні дані дозволяють вносити поправки на дробильність порід у розрахунки:

- продуктивності  $Q$  (т/год.) дробарок:

$$\frac{Q_{\text{досл}}}{Q_{\text{ем}}} = \frac{1 - (0,41W_{i_{\text{досл}}})^3}{1 - (0,04W_{i_{\text{ем}}})^3}; \quad (2.24)$$

- номінальної крупності  $d$  (мм) дроблення:

$$\frac{d_{\text{досл}}}{d_{\text{ем}}} = 3 \sqrt{\frac{W_{i_{\text{досл}}}}{W_{i_{\text{ем}}}}}. \quad (2.25)$$

*Лабораторна методика фірми «Аліс-Чалмерс» (США)* також за показник дробильності використовує індекс роботи  $W_i$  (кВт·год/т). Для досліджень застосовують подвійний маятниковий копер (рис. 2.2) з вагами (молоти) масою 13,6 кг.

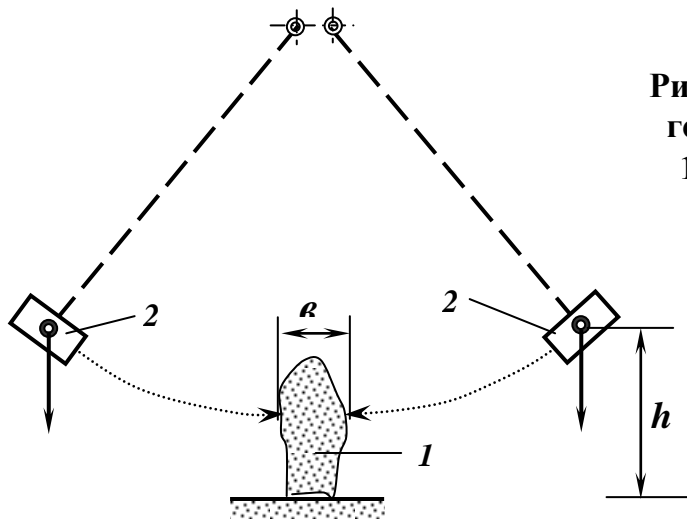


Рис. 2.2 – Схема подвійного маятнікового копра.  
1 – зразок; 2 – молоти.

Ваги фіксують на визначеній висоті  $h$ . В робочу зону поміщають зразок таким чином, щоб його менший розмір був розташований у напрямку удару молотів з двох сторін. Висоту  $h$  падіння молотів поступово підвищують доти, поки досліджуваний зразок зруйнується. Дослідженню піддають 10 зразків розміром 50 – 65 мм і після досліджень розраховують індекс роботи:

$$W_i = 1,295 \cdot 10^8 h / b, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}, \quad (2.26)$$

де  $h$  – висота падіння молота при руйнуванні зразка, м;  $b$  – товщина зразка, м.

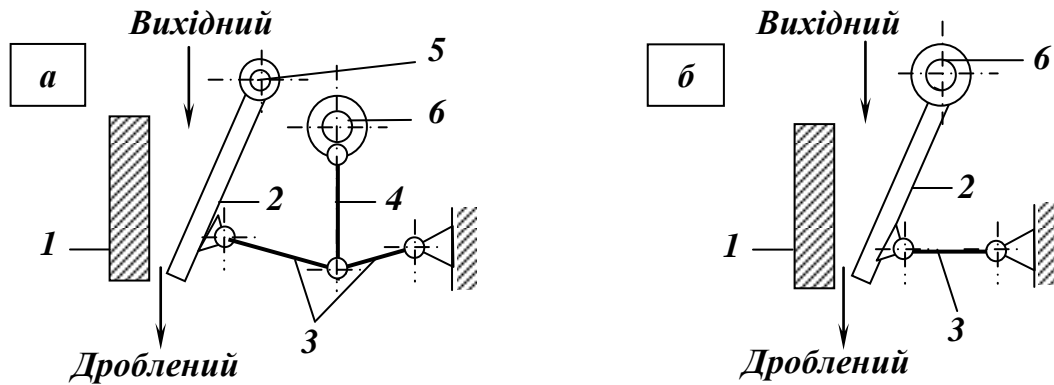
Основною перевагою оцінки дробильності за допомогою індексу роботи є одночасне врахування енергетичних та геометричних змін матеріалу в процесі його деформування.

## 2.5 Шокові дробарки

### 2.5.1 Конструкція і принцип дії шокових дробарок

Шокові дробарки установлюють переважно на збагачувальних фабриках невеликої продуктивності. Вони в порівнянні з конусними дробарками більш пристосовані для дроблення глинистих і вологих руд, займають менше місця по висоті, простіші конструктивно, але менш пристосовані для дроблення матеріалів пластинчастої форми.

Шокові дробарки працюють за принципом роздавлювання і частково згину між двома щоками, з яких одна – нерухома, а інша – рухома. Шокові дробарки розділяються на два кінематичних класи: із простим рухом щоки – ЩДП (рис. 2.3 а) і складним – ЩДС (рис. 2.3 б).



**Рис. 2.3.** – Схеми щоківних дробарок:

**а** – з простим рухом щоки, **б** – зі складним рухом щоки.

**1** – нерухома щока; **2** – рухома щока; **3** – розпірні плити; **4** – шатун; **5** – вісь; **6** – ексцентриковий вал.

У дробарку з простим рухом щоки (рис. 2.3 *а*) вихідний матеріал завантажується зверху в робочий простір між рухомою **1** і нерухомою **2** щоками. При обертанні ексцентрикового валу **6** шатун **4** рухається у вертикальному напрямку, його рух через розпірні плити **3** передається рухомій щоці **2**. Таким чином, рух шатуна вгору супроводжується наближенням рухомої щоки до нерухомої і дробленням матеріалу. При русі шатуна униз рухома щока відходить від нерухомої, у цей час здійснюється розвантаження дробленого продукту під дробарку.

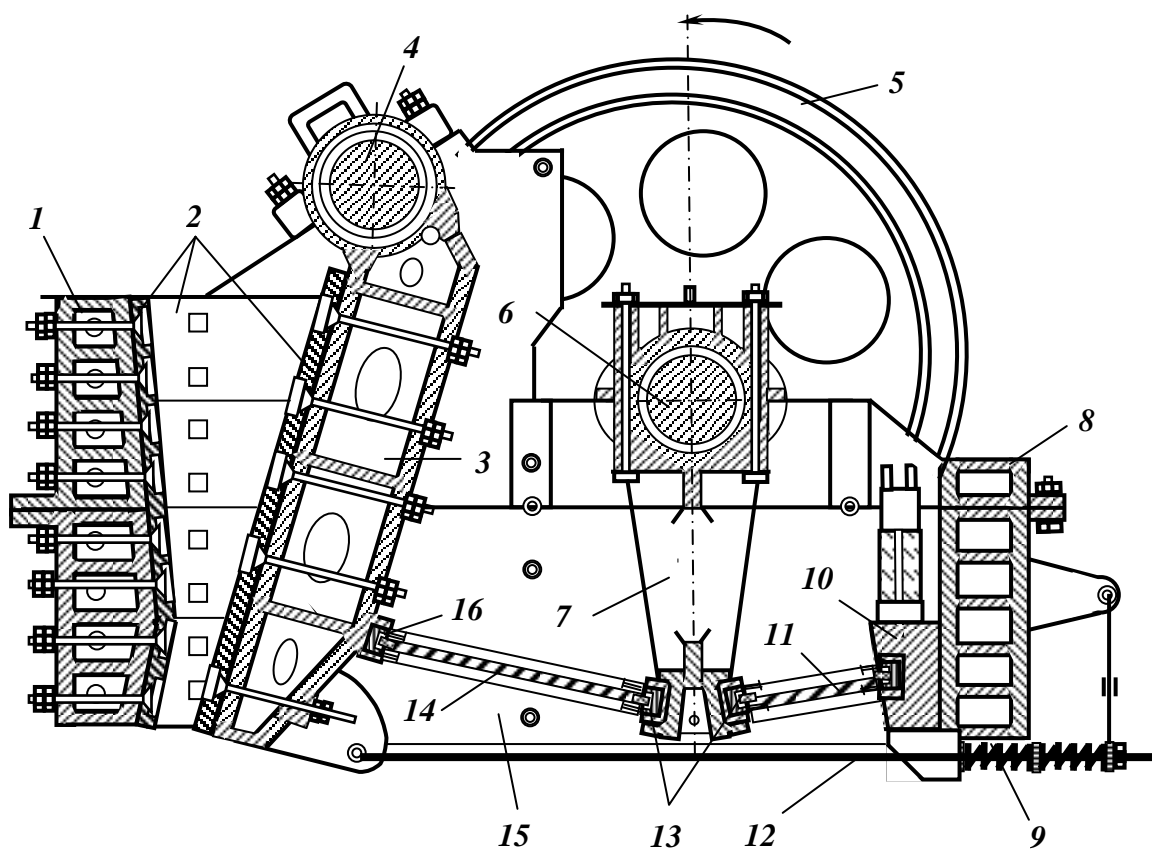
У дробарках зі складним рухом (рис. 2.3 *б*) рухома щока **2** підвішена безпосередньо на ексцентриковий вал **6**. Внаслідок цього всі точки поверхні рухомої щоки описують овальні траєкторії, тому матеріал піддається не тільки роздавлюванню, але й стиранню.

Крупність дробленого продукту щоківних дробарок визначається шириною розвантажувальної щілини (мінімальною відстанню між щоками при їхньому зближенні).

На збагачувальних фабриках для крупного дроблення корисних копалин широко застосовуються *щоківі дробарки з простим рухом щоки* (рис. 2.4). Корпус дробарки з простим рухом щоки складається з передньої стінки **1** (нерухома щока), задньої **8** та двох бокових **15** стінок. Рухома щока **3** підвішена на осі **4**, яка опирається на два підшипники. Робочий простір дробарки між внутрішніми поверхнями бокових стінок і щік (рухомої і нерухомої) футерований змінними плитами **2** зі сталі з високим вмістом марганцю.

На ексцентриковому заточенні вала **6**, що обпирається на корінні підшипники, надягнута головка шатуна **7**, яка при обертанні вала отримує зворотно-поступальний рух у вертикальному напрямку. В гніздах шатуна знаходяться вкладиші **13**, в які вільно вставлені кінці розпірних

плит *11* і *14*. Другий кінець передньої розпірної плити вставлений у вкладиш *16* в гнізді рухомої щоки, а задньої розпірної плити – у вкладиш в гнізді упорної деталі *10*. Зусилля дроблення в щоковій дробарці передається через розпірні плити. Тому вкладиші, в які входять кінці плит, а також кінці плит виготовляють з матеріалу великої твердості для протистояння великим навантаженням та зносу. Міцність розпірних плит також використовується для запобігання дробарок від поломок при попаданні в їхній робочий простір предметів, що не дробляться (напр., металічних). Розпірні плити виготовляють з чавуну, їхні перетини ослаблюють отворами і розраховують тільки на нормальні зусилля дроблення. При поломці однієї з розпірних плит коливання щоки припиняються, дробарка зупиняється і аварія запобігається.



**Рис. 2.4 – Щокова дробарка з простим рухом щоки типу ЩДП.**

**1** – передня стінка; **2** – змінні футерувальні плити; **3** – рухома щока; **4** – вісь; **5** – маховик; **6** – ексцентрикове заточення валу; **7** – шатун; **8** – задня стінка; **9** – пружина; **10** – упорна деталь; **11, 14** – розпірні плити; **12** – тяга; **13, 16** – вкладиші; **15** – бокові стінки.

Задню розпірну плиту іноді роблять клепаною з двох частин (рис. 2.5). При небезпечних навантаженнях заклепки зрізаються – дробарка зупиняється.

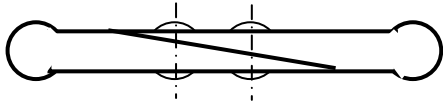


Рис. 2.5 – Розпірна плита.

При русі шатуна угору кут між розпірними плитами збільшується і рухома щока наближається до нерухомої (робочий хід). У цей момент відбувається дроблення матеріалу роздавлюванням, а також частково за допомогою згину і зсуву. Останні види деформації обумовлені тим, що футерувальні плити мають ребристу або хвилясту поверхню, при цьому виступи на плиті рухомої щоки розташовані проти впадин нерухомої щоки (рис. 2.6). Бокові стінки футеруються гладкими плитами.

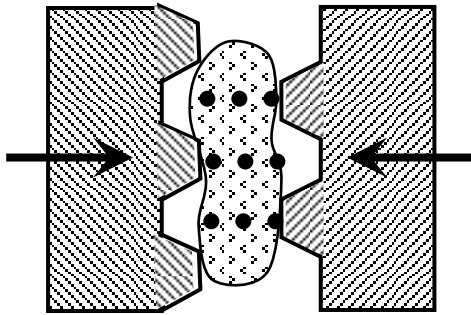


Рис. 2.6 – Схема руйнування грудки при ребристій поверхні футерувальних плит.

При русі шатуна униз рухома щока відходить від нерухомої під дією сили ваги і пружини **9**, яка зв'язана тягою **12** з рухомою щокою (холостий хід). У цей момент відбувається розвантаження дробленого продукту.

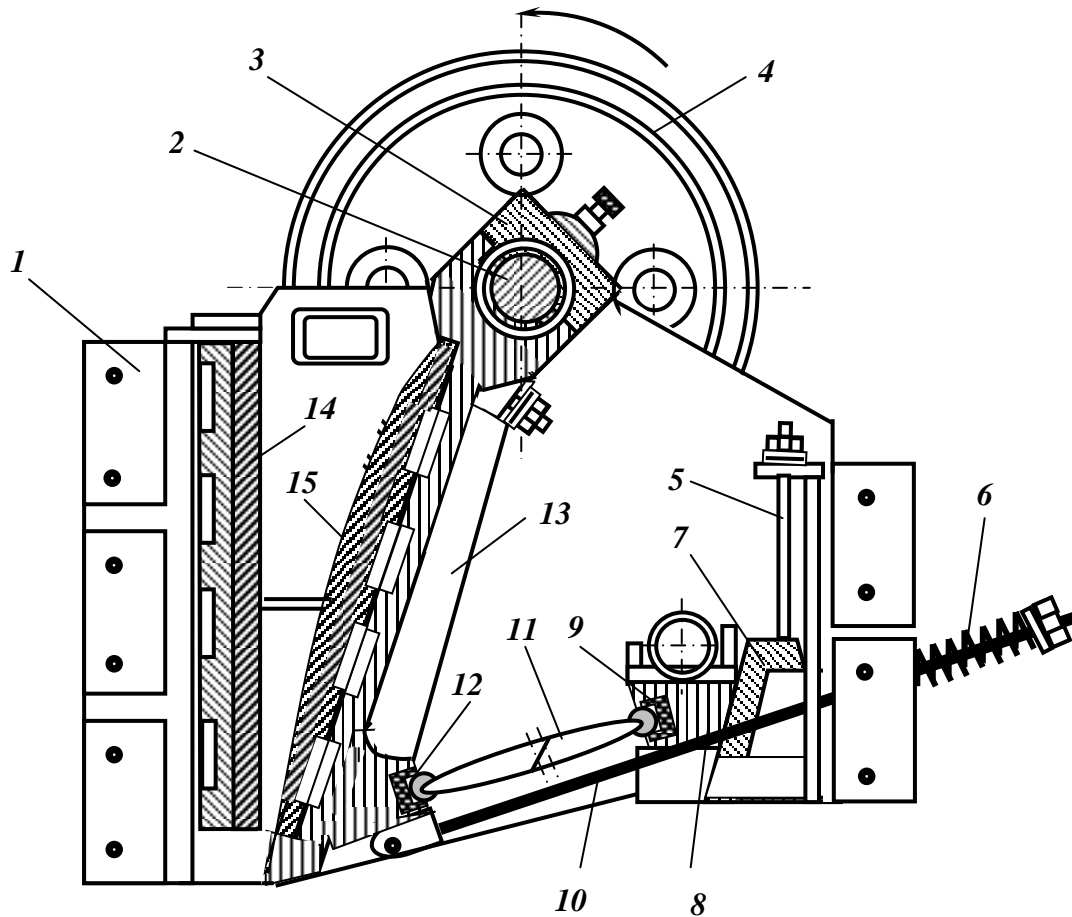
У зв'язку з наявністю у щоківних дробарок робочого і холостого ходів навантаження на привод дуже нерівномірне. Для вирівнювання навантажень на вал **6** насаджені два маховика **5**, один з яких служить приводним шківом. Привод щоківних дробарок здійснюється від електродвигуна через клиноремінну передачу на один з маховиків.

Зміна ширини розвантажувального отвору щоківних дробарок провадиться регулювальними клинами або зміною розпірних плит.

На відміну від дробарок з простим рухом щоки в *дробарках зі складним рухом щоки* (рис. 2.7) рухома щока підвішена безпосередньо на ексцентрик вала і внизу опирається на одну розпірну плиту, яка вставлена у вкладиші в гніздах на щоці і регулювальному клині.

Нерухома щока **1** є частиною станини дробарки, рухома щока **13** за допомогою рухомого підшипника підвішена на ексцентриковому валу **2**. Внутрішня поверхня робочого простору дробарки футерується змінними плитами **14** і **15**. Розпірна плита **11** одним кінцем опирається на вкладиш **12** рухомої щоки, а другим у вкладиш **9** упора **8**. Між упором і станиною дробарки розташований клин **7** закріплений на двох гвинтах **5**. Зміною положення клина **7** у вертикальній площині регулюється ширина розвантажувальної щілини дробарки. Необхідний контакт

між рухомою щогою і розпірною плитою забезпечується тягою **10** з пружиною **6**, натяг якої регулюється гайкою. Ексцентриковий вал **2**, що змонтований в корінних підшипниках **3** корпуса, отримує рух від електродвигуна через клиноремінну передачу і шків **4**.



**Рис. 2.7 – Щогова дробарка зі складним рухом щогои типу ЩДС.**  
**1** – нерухома щого; **2** – ексцентриковий вал; **3** – корінні підшипники;  
**4** – шків; **5** – гвинт; **6** – пружина; **7** – клин; **8** – упор; **9, 12** – вкладиші;  
**10** – тяга; **11** – розпірні плити; **13** – рухома щого; **14, 15** – змінні футерувальні плити.

Рухома щого при роботі поперемінно то наближається до нерухоми щогои, то віддаляється від неї, крім того, одночасно рухома щого здійснює рух вздовж нерухоми щогои. Таким чином, траєкторія руху точок рухоми щогои утворює овал, за рахунок чого руйнування грудок здійснюється роздавлюванням та стиранням. При такому характері руху щогои холостий хід складає не половину оберту, а тільки 1/5.

Щогові дробарки зі складним рухом щогои застосовуються для середнього та дрібного дроблення твердих і в'язких порід. Вони характеризуються більш високою продуктивністю і меншою витратою електроенергії ніж дробарки з простим рухом. Але конструктивним недоліком

дробарок зі складним рухом щоки є то, що зусилля майже повністю передаються на ексцентриковий вал, а це утруднює створення дробарок великих розмірів. Крім того, специфічна траєкторія руху щоки обумовлює підвищене зношування футеровки за рахунок стирання.

Технічні характеристики щоккових дробарок ШДП і ЩДС наведені у додатку Б.

### 2.5.2 Технологічні характеристики щоккових дробарок

Основними технологічними характеристиками щоккових дробарок є: кут захоплення  $\alpha$ , частота обертання колінчатого валу  $n$ , продуктивність  $Q$  і потужність електродвигуна  $N$ .

*Кутом захоплення* називається кут між нерухомою і рухомою щоками (при зближених щоках). Величина кута захоплення змінюється при регулюванні розвантажувальної щілини дробарки. Зменшення ширини розвантажувальної щілини супроводжується збільшенням кута захоплення і відповідно збільшенням ступеня дроблення та зменшення продуктивності дробарки. Збільшення ширини розвантажувальної щілини проводить до протилежних результатів.

Граничне значення кута захоплення визначається при умові повного зрівноважування сил, що виштовхують грудку з робочого простору дробарки, і сил тертя грудки об щоки (рис. 2.8).

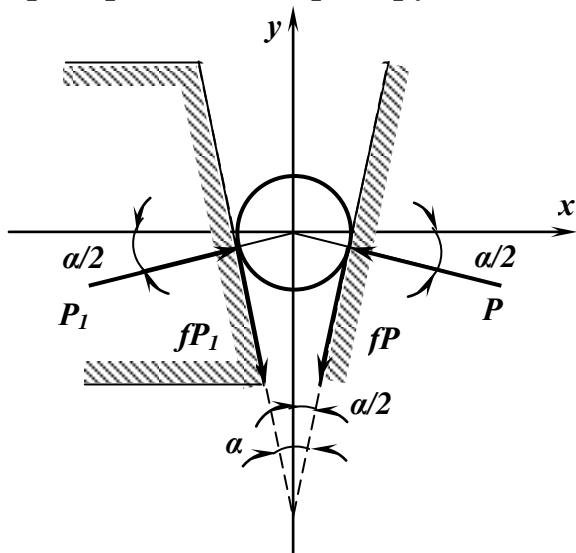


Рис. 2.8 – Рівноважне положення грудки, яка затиснута між щоками дробарки.

Якщо  $\alpha$  – граничний кут захоплення, то для грудки, що знаходиться у рівновазі сума проєкцій сил на координатні вісі буде дорівнювати нулю:

$$\sum x = -P \cos \frac{\alpha}{2} + P_1 \cos \frac{\alpha}{2} - fP \sin \frac{\alpha}{2} + fP_1 \sin \frac{\alpha}{2} = 0;$$

$$\sum y = P \sin \frac{\alpha}{2} + P_1 \sin \frac{\alpha}{2} - fP \cos \frac{\alpha}{2} - fP_1 \cos \frac{\alpha}{2} = 0,$$

(2.27)

де  $P$  – тиск рухомої щоки;  $P_1$  – реакція нерухомої щоки;  $fP$  – сили тертя грудки по рухомій щоці;  $fP_1$  – сили тертя грудки по нерухомій щоці.

Сила  $P_1$  дорівнює силі  $P$  ( $P = P_1$ ), тому  $2 \sin \frac{\alpha}{2} = 2f \cos \frac{\alpha}{2}$  або  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = f$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом і щоками. Якщо коефіцієнт тертя ковзання  $f$  виразити через кут тертя  $\varphi$ , одержимо:

$$\alpha = 2\varphi. \quad (2.28)$$

Таким чином, граничний кут захоплення дорівнює подвійному куту тертя. Тому кут захоплення щоківних дробарок повинен завжди бути менше подвійного кута тертя ( $\alpha < 2\varphi$ ). Коефіцієнт тертя ковзання каменя по сталі  $f = 0,3$ , що відповідає куту тертя  $\varphi = 16^\circ$ , тобто кут захоплення повинен бути  $\alpha < 36^\circ$ . Практично кут захоплення звичайно не перевищує  $24^\circ$ . Однак, при роботі дробарок трапляються викиди грудок матеріалу угору, що пояснюється можливістю такого розташування грудок у робочому просторі, коли для окремих з них кут захоплення більше подвійного кута тертя ( $\alpha > 2\varphi$ ).

Оптимальна частота обертання валу дробарки  $n$  ( $\text{хв}^{-1}$ ) визначається з припущення, що при відході рухомої щоки грудки матеріалу, які знаходяться нижче площини  $DCFE$  (рис. 2.9), вільно розвантажуються під дією сили ваги. Час  $t$  (с) відходу рухомої щоки в крайнє праве положення дорівнює часу половини оберту вала:

$$t = 30 / n, \text{ с.} \quad (2.29)$$

Цей час  $t$  повинен бути достатнім для опускання матеріалу, що розвантажуються на глибину  $h$ , яка за умови вільного падіння тіла складає:  $h = gt^2 / 2$ , тобто

$$t = \sqrt{2h / g}, \quad (2.30)$$

Вирішуючи систему рівнянь (2.29) і (2.30) відносно  $n$  одержуємо:

$$n = 30\sqrt{g / 2h}, \text{ хв}^{-1}. \quad (2.31)$$

Висоту  $h$  находимо з прямокутника  $BB_1C$



$$h = e / \operatorname{tg} \alpha = (S_2 - S_1) / \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.32)$$

де  $S_1$  і  $S_2$  – мінімальна і максимальна ширина розвантажувального отвору дробарки, м;  $\alpha$  – кут захоплення, град;  $e$  – довжина ходу рухомої щоки біля розвантажувального отвору, м.

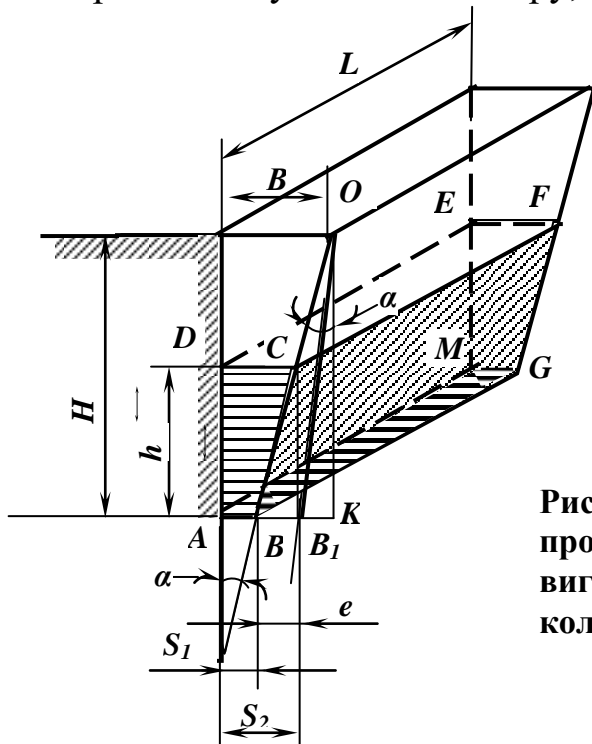


Рис. 2.9 – Розвантаження дробленого продукту з шокової дробарки при найвигіднішій швидкості обертання колінчатого вала.

Після підстановки (2.32) в рівняння (2.31) отримуємо:

$$n = 30 \sqrt{g \operatorname{tg} \alpha / 2e}, \text{ хв}^{-1}, \quad (2.33)$$

Частота обертання колінчатого вала визначена за формулою (2.33) відповідає максимальній продуктивності дробарки, тому вона називається найвигіднішою. При  $\alpha = 22^\circ$  ( $\operatorname{tg} \alpha = 0,4$ ) і  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  отримуємо просте рівняння для визначення найвигіднішої частоти обертання колінчатого вала шокової дробарки:

$$n = 42e^{-0,5}, \text{ хв}^{-1}. \quad (2.34)$$

Продуктивність розраховують за об'ємом дробленого продукту, що випадає за один оберт вала дробарки, яка працює з найвигіднішою частотою. При цьому об'єм дробленого продукту  $V_1$  дорівнює об'єму призми  $ABCDEFGM$  (див. рис. 2.8):

$$V_1 = 0,5(S_2 - S_1)hL, \text{ м}^3, \quad (2.35)$$

де  $L$  – довжина робочого простору дробарки, м.

З використанням рівняння (2.32) об'єм дробленого продукту складає:

$$V_1 = 0,5(S_2 + S_1)(S_2 - S_1)L / \operatorname{tg} \alpha = 0,5(S_2^2 - S_1^2)L / \operatorname{tg} \alpha.$$

Годинна об'ємна продуктивність щоквої дробарки:

$$Q_o = 60nV_1 = 30n(S_2^2 - S_1^2)L / \operatorname{tg} \alpha, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (2.36)$$

Масова продуктивність дробарки при  $\operatorname{tg} \alpha = 0,4$ :

$$Q = Vk\delta = 75k\delta n(S_2^2 - S_1^2)L, \text{ т/год,} \quad (2.37)$$

де  $k$  – коефіцієнт розпушення матеріалу при виході з дробарки ( $k = 0,25 - 0,70$ );  $\delta$  – густина матеріалу,  $\text{т/м}^3$ ;  $n$  – частота коливань щоки,  $\text{хв}^{-1}$ .

Формула (2.37), яка одержана з геометричних побудов, не враховує вплив на продуктивність дробарки фізичних властивостей вихідного матеріалу, тому результати отримані за цією формулою відрізняються від практичних. Але вона дозволяє з'ясувати вплив основних факторів на продуктивність дробарки.

Звичайно продуктивність щоквих дробарок визначають з використанням емпіричних формул, даних каталогів та експериментально.

За емпіричною формулою Механобру повна розрахункова продуктивність щоквої дробарки визначається:

$$Q = k_{кр} k_{вл} k_m (150 + 750B) L e \delta_n, \text{ т/год,} \quad (2.38)$$

де  $k_{кр}$ ,  $k_{вл}$ ,  $k_m$  – коефіцієнти, що враховують вплив крупності, вологості і міцності матеріалу, який дробиться (табл. 2.3);  $(150 + 750B)$  – питома дослідна продуктивність,  $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ;  $B$  – ширина завантажувального отвору дробарки, м;  $L$  – довжина завантажувального отвору дробарки, м;  $e$  – ширина розвантажувальної щілини у фазі розкриття профілів (при найбільшому віддаленні щік), м;  $\delta_n$  – насипна густина матеріалу,  $\text{т/м}^3$ .

За паспортними даними розрахункова продуктивність щоквої дробарки:

$$Q = k_{кр} k_{вл} k_m Q_n \frac{e}{e_n} \cdot \frac{\delta_n}{1,6}, \text{ т/год,} \quad (2.39)$$

де  $k_{кр}, k_{вл}, k_m$  і  $\delta_n$  – мають попередні значення;  $Q_n$  – продуктивність дробарки за паспортом, м<sup>3</sup>/год;  $e$  – ширина розвантажувальної щілини у фазі розкриття профілів (при найбільшому віддаленні щік), м;  $e_n$  – номінальна ширина розвантажувальної щілини, м.

Вибір щоквої дробарки визначається продуктивністю при заданій ширині розвантажувальної щілини і розміром максимальної грудки у вихідному матеріалі  $D_{max}$ . Ширина завантажувального отвору дробарки повинна бути на 15 – 20 % більше розміру максимальної грудки вихідного матеріалу. Продуктивність дробарки приймають за даними заводів, що їх виготовляють, але з введенням поправки на насипну густину матеріалу.

**Таблиця 2.3 – Поправкові коефіцієнти на умови дроблення**  
( $k_{кр}, k_{вл}, k_{тв}$ )

| Коефіцієнт   | Руда   |      |                    |      |                  |      |                       |      |
|--|--|------|--------------------|------|------------------|------|-----------------------|------|
|  | малої міцності                                     |      | середньої міцності |      | великої міцності |      | дуже великої міцності |      |
| Міцності за шкалою Протодьяконова  | 5 – 10   |      | 10 – 15            |      | 15 – 18          |      | 18 – 20               |      |
| Поправковий на міцність руди $k_{да}$  | 1,20   |      | 1,00               |      | 0,95             |      | 0,90                  |      |
| Поправковий на вологість (при наявності в руді дріб'язку, що грудкується) $k_{вл}$ | Вологість руди, %                                  |      |                    |      |                  |      |                       |      |
|  | 4  | 5    | 6                  | 7    | 8                | 9    | 10                    | 11   |
|  | 1,00   | 1,00 | 0,95               | 0,90 | 0,85             | 0,80 | 0,75                  | 0,65 |
| Поправковий на крупність руди $k_{кр}$   | Вміст крупних класів (крупніше 0,5В) у живленні, % |      |                    |      |                  |      |                       |      |
|  | 10   | 20   | 30                 | 40   | 50               | 60   | 70                    | 80   |
|  | 1,08   | 1,05 | 1,03               | 1,00 | 0,97             | 0,95 | 0,92                  | 0,89 |

Потужність електродвигуна щоквої дробарки визначається за емпіричною формулою:

$$N = cLB, \text{ кВт}, \quad (2.40)$$

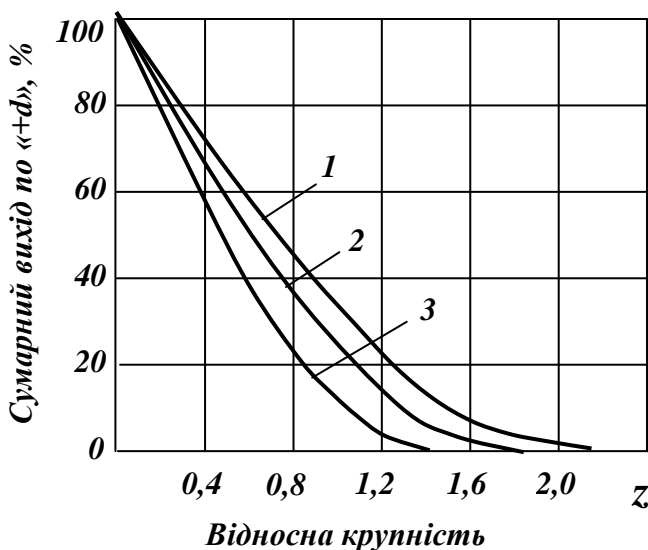
де  $L$  і  $B$  – довжина і ширина завантажувального отвору дробарки, см;  $c$  – коефіцієнт, що приймається залежно від розмірів завантажувального отвору (табл. 2.4).

**Таблиця 2.4 – Величина поправкового коефіцієнта  $c$**

|                                      |                               |   |                                |
|--------------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|
| Розміри завантажувального отвору, мм | $L \times B < 250 \times 400$ | $L \times B = (250 \times 400) \div \div (900 \times 1200)$ | $L \times B < 900 \times 1200$ |
| Коефіцієнт $c$                       | 1/60                          | 1/100   | 1/120                          |

Ступінь дроблення щокочових дробарок звичайно складає від 3 до 4 і може регулюватися зміною ширини розвантажувального отвору дробарки. Дроблений продукт щокочових дробарок містить значну кількість надлишкових зерен, що залежить від міцності руди, стану футерувальних плит та ін.

Типові характеристики крупності продуктів дроблення щокочових дробарок наведені на рис. 2.10. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен  $z$  (в частках від максимальної ширини розвантажувальної щілини дробарки), а по осі ординат сумарний вихід класів по «+ $d$ ». Якщо точку перетину перпендикуляра від осі  $z$  з типовою кривою спроектувати на вісь виходів по «+ $d$ » отримуємо вихід шуканого класу.



**Рис. 2.10 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення щокочових дробарок.**  
**1 – руди великої міцності;**  
**2 – руди середньої міцності;**  
**3 – руди малої міцності.**

Умовною максимальною крупністю грудок у дробленому продукті вважають розмір отворів сита, крізь яке проходить 95 % матеріалу. Умовна максимальна крупність визначається як відношення розміру грудки до ширини розвантажувальної щілини дробарки ( $z = d/B$ ).

При розрахунках схем дроблення типові характеристики крупності застосовують для визначення гранулометричного складу дроблених продуктів, якщо реальний гранулометричний склад продукту не був отриманий при попередніх дослідженнях. Також сумарний вихід класів по «+ $d$ »

може бути розрахований за емпіричними формулами, що наведені в табл. 2.5.

**Таблиця 2.5 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту щоккових дробарок**

| Тип руди           | Розрахункова формула  | Формула вірна    |
|--------------------|---|------------------|
| Малої міцності     | $b^{+z} = (1 - 0,70z - 1,41z^2 + 1,76z^3 - 0,54z^4) \cdot 10^2$<br>(2.41) | при $z \leq 1,4$ |
| Середньої міцності | $b^{+z} = (1 - 0,27z - 1,69z^2 + 1,64z^3 - 0,44z^4) \cdot 10^2$<br>(2.42) | при $z \leq 1,7$ |
| Великої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,39z - 0,47z^2 + 0,40z^3 - 0,09z^4) \cdot 10^2$<br>(2.43) | при $z \leq 2,2$ |

Характеристика крупності дробленого продукту залежить від міцності руди, ширини вихідної щілини дробарки, а також ефективності роботи грохота в стадії дроблення.

## 2.6 Конусні дробарки крупного дроблення

### 2.6.1 Конструкція і принцип дії конусних дробарок крупного дроблення

Конусні дробарки встановлюють на збагачувальних фабриках великої продуктивності. Для крупного дроблення руд застосовуються конусні дробарки з підвісним валом і розвантаженням під дробарку (рис. 2.11).

Дроблення матеріалу відбувається у кільцевому робочому просторі між зовнішньою нерухомою конічною чашею **1** і рухомим дробильним конусом **2**, який жорстко закріплений на валу **3**. Верхній кінець вала шарнірно підвішений у точці **O**, а нижній – вільно вставлений в ексцентриковий стакан **4**. Вісь  $O - O'$  вала **3** нахилена до осі симетрії  $O - O'$  корпусу дробарки. Ексцентриковий стакан обертається в центральному вертикальному підшипнику **5** корпусу дробарки і підтримується підп'ятником **6**. При обертанні ексцентрикового стакана навколо осі дробарки  $O - O'$  вісь вала **3** описує конічну поверхню з вершиною у точці **O**. При цьому рухомий конус виконує круговий рух усередині неру-

хомої конусної чаші і послідовно наближається до її стінок з однієї сторони і віддаляється від стінок протилежної сторони (рис. 2.12).

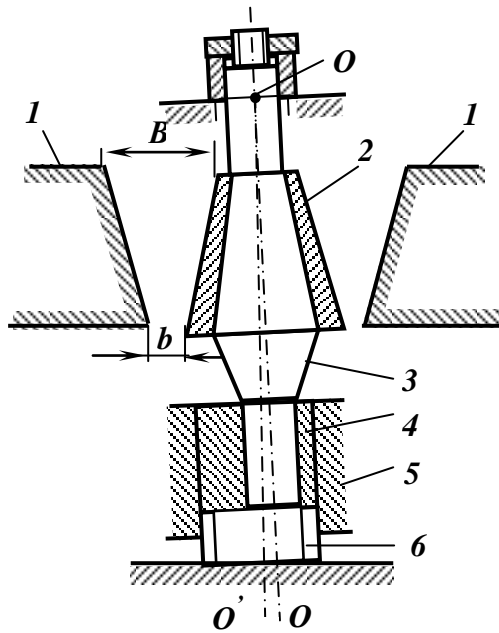


Рис. 2.11 – Принципова схема конусної дробарки крупного дроблення.

$B$  – розмір завантажувального отвору;  $b$  – ширина кільцевої розвантажувальної щілини.

- 1 – нерухома конусна чаша;
- 2 – рухомий дробильний конус;
- 3 – вал;
- 4 – ексцентриковий стакан;
- 5 – підшипник;
- 6 – підп'ятник (опирач).

Наближення подрібнюючого конуса до чаші супроводжується дробленням грудок матеріалу, що надходить у дробарку зверху, а віддалення – розвантаженням дробленого продукту, що виходить униз, під дробарку.

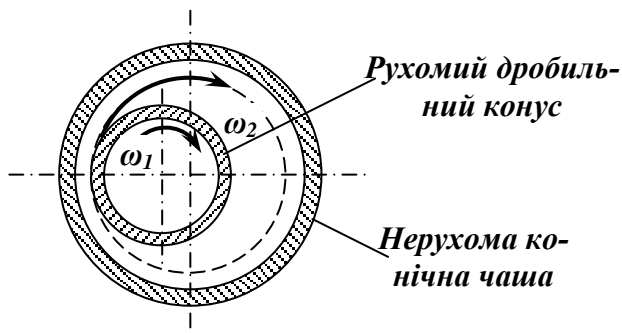


Рис. 2.12 – Напрямок обертання рухомого конуса:

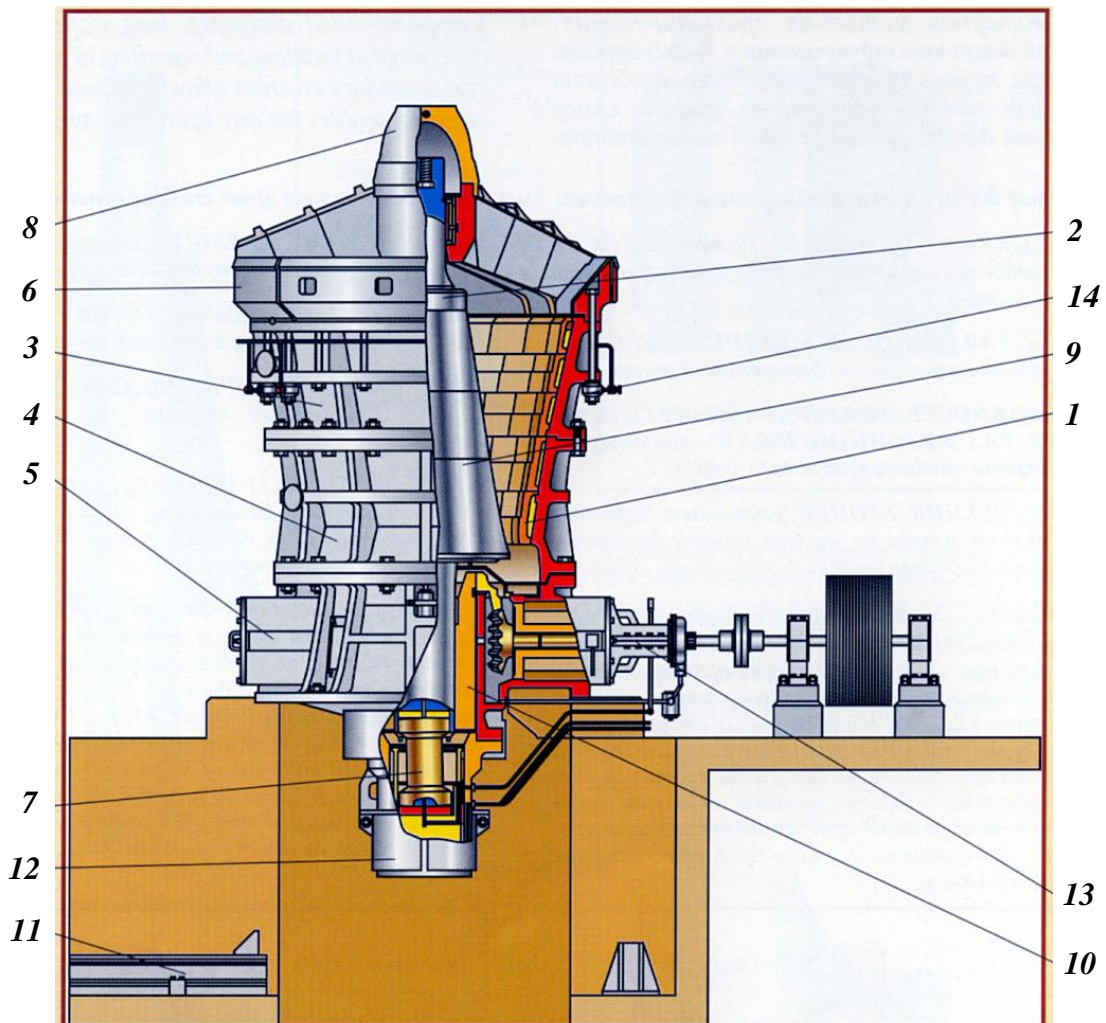
- $\omega_1$  – навколо осі  $O - O'$ ;
- $\omega_2$  – навколо осі  $O - O'$ .

У конусних дробарках матеріал дробиться в кільцевому просторі, утвореному нерухомою конічною чашею 1 і розташованим усередині цієї чаші рухомим подрібнювальним конусом 2, закріпленим на ексцентрично встановленому (завдяки стакану 4) валу 3. Основне подрібнювальне зусилля в конусних дробарках – роздавлювання, але має місце і розлам грудок при вигині, що виникає, коли грудка затиснута між увігнутою поверхнею чаші 1 і опуклою поверхнею рухомого конуса 2.

Конусні дробарки крупного дроблення випускають з механічним і гідравлічним регулюванням розвантажувальної щілини.

Конструкція конусної дробарки крупного дроблення з підвісним валом, розвантаженням під дробарку і гідравлічним регулюванням ви-

пускної щілини наведена на рис. 2.13. Робочі поверхні нерухомої чаші *1* і дробильного конуса *2* вкриті футерувальними плитами з марганцевистої сталі.



**Рис. 2.13 – Конусна дробарка з гідравлічним регулюванням вихідної щілини типу ККД.**

**1 – нерухома конічна чаша; 2 – дробильний конус; 3, 4, 5 – верхнє, середнє і нижнє кільця станини; 6 – траверса; 7 – головний вал; 8 – ковпак; 9 – броня рухомого конуса; 10 – ексцентриковий стакан; 11 – рейкова колія; 12 – плунжер; 13 – привід дробарки; 14 – гідравлічний домкрат.**

Станина дробарки роз'ємна і складається з трьох частин *3*, *4* і *5*. Верхня частина станини *3* являє собою нерухому конічну чашу, на якій укріплена футерована плитами траверса *6*, що відлита заодно з опорним кільцем. На траверсі *6* підвішується головний вал *7*, верхній кінець якого захищений ковпаком *8*, а нижній поміщений у ексцентриковий стакан *10*. При обертанні ексцентрикового стакана у вертикальній втулці, що

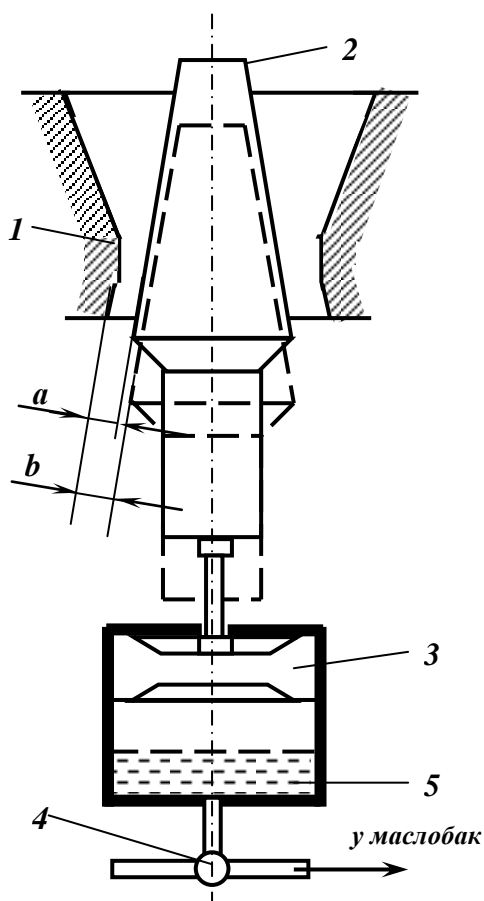
жорстко закріплена в станині дробарки, кожна точка осі вала описує коло, радіус якої залежить від відстані до точки підвісу вала (чим точка нижче, тим радіус більше).

Нижній кінець вала переміщується по колу, радіус якої дорівнює ексцентриситету стакану **10**. Амплітуда відхилення конуса становить 20-30 мм. За один оберт ексцентрика дробильний конус послідовно наближається до усіх точок внутрішньої поверхні нерухомої чаші і здійснює дроблення руди. При відході дробильного конуса від нерухомої чаші відбувається розвантаження дробленого продукту.

Привод дробарки **13** здійснюється через клинопасову передачу і пару конічних зубчатих коліс. Обертання ексцентрикового вала в дробарках великих розмірів (з діаметром конуса від 1200 до 1500 мм) здійснюється від двох електродвигунів. Другий двигун призначений для пуску дробарки під завалом.

Для механізації ремонтних робіт передбачений гідравлічний домкрат **14**, а під дробаркою передбачений ремонтний майданчик з рейковою колією **11** для переміщення важких деталей. Дробильний конус з валом спирається на плунжер **12** гідравлічного циліндра. Між плунжером і кришкою циліндра знаходиться шар масла висотою 120 мм.

Регулювання випускної щілини дробарки здійснюється підйомом або опусканням дробильного конуса у результаті зміни рівня масла в циліндрі **5** під плунжером **3** (рис. 2.14).



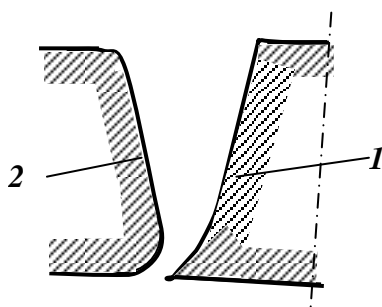
**Рис. 2.14 – Гідравлічний пристрій для регулювання розвантажувальної щілини дробарки.**

- 1 – нерухома конічна чаша;**
- 2 – дробильний конус;**
- 3 – плунжер;**
- 4 – клапан;**
- 5 – циліндр.**



На ряді збагачувальних фабрик застосовують чотиристадіальні схеми дроблення. Перша стадія крупного дроблення може здійснюватися у конусних дробарках з підвішеним валом або у щоккових, а друга – у конусних редукційних дробарках типу КРД з гідравлічним регулюванням ширини вихідного отвору (гідравлічним домкратом).

За конструкцією конусні редукційні дробарки схожі на дробарки крупного дроблення з підвішеним валом, але для отримання більш однорідного за крупністю дробленого продукту і зменшення забивання дробарки рудою профіль футеровки в зоні розвантаження роблять криволінійним (рис. 2.15), однак довжина цієї зони для цих дробарок невелика.



**Рис. 2.15 – Криволінійний профіль футеровок конусних дробарок крупного дроблення.**

**1 – дробильний конус;  
2 – нерухома конічна чаша.**

Конусні дробарки крупного дроблення характеризуються високою продуктивністю, надійністю у роботі, рівномірним ходом, відносно меншим (в порівнянні з щокковими дробарками) і більш рівномірним по крупності дробленим продуктом, особливо при дробленні плитнякового матеріалу.

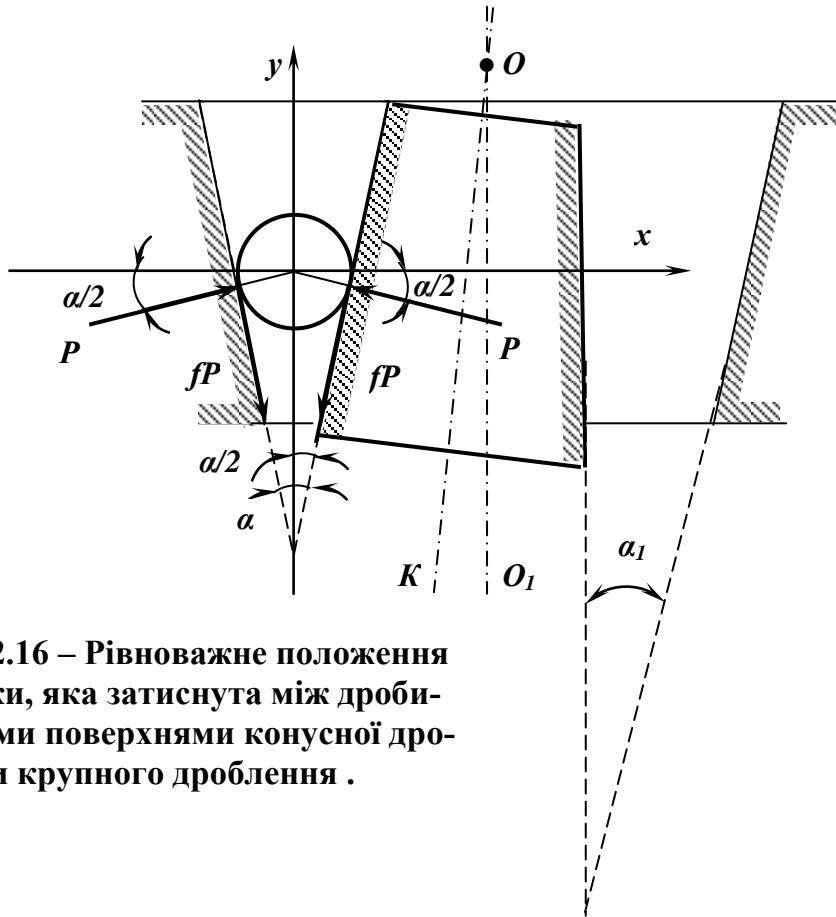
Однак через складність конструкції конусних дробарок при малій продуктивності збагачувальних фабрик перевагу віддають щокковим дробаркам.

Технічні характеристики конусних дробарок типів ККД і КРД наведені у додатку Б.

### **2.6.2 Технологічні характеристики конусних дробарок крупного дроблення**

До основних технологічних характеристик конусних дробарок крупного дроблення належать: кут захоплення  $\alpha$ , частота обертання ексцентрикового стакану  $n$ , продуктивність  $Q$  і потужність електродвигуна  $N$ .

*Кутом захоплення* конусних дробарок крупного дроблення називається кут між твірними внутрішньої поверхні нерухомої конічної чаші і зовнішньої поверхні дробильного конуса (рис. 2.16).



**Рис. 2.16** – Рівноважне положення грудки, яка затиснута між дробильними поверхнями конусної дробарки крупного дроблення .

Величина кута захоплення змінюється від  $\alpha$  у точці зближення дробильних поверхонь до  $\alpha_1$  у діаметрально протилежній точці, де дробильний конус відходить від чаші. Незначною різницею між величиною кутів  $\alpha$  і  $\alpha_1$  нехтують, тому що вона не має практичного значення, і кутом захоплення вважають кут  $\alpha$  .

Умови рівноваги грудки матеріалу у камері дроблення конусної дробарки крупного дроблення аналогічні умовам рівноваги грудки матеріалу в щоківній дробарці, що дозволяє поширити висновки, які були зроблені для щоківних дробарок, на конусні дробарки крупного дроблення. Таким чином, кут захоплення конусних дробарок крупного дроблення не повинен перевищувати подвійний кут тертя. Практично кут захоплення конусних дробарок крупного дроблення складає від  $24$  до  $28^\circ$  .

Оптимальна частота обертання ексцентрикового стакану  $n$  ( $\text{хв}^{-1}$ ), при якій досягається максимальна продуктивність дробарки, може бути визначена, як і для щоківної дробарки, за формулою (2.31).

З трикутника  $BB_1K$  (рис. 2.17) визначаємо  $h$ :

$$h = BL / \text{tg} \alpha_1 = LK / \text{tg} \alpha_2 . \quad (2.44)$$

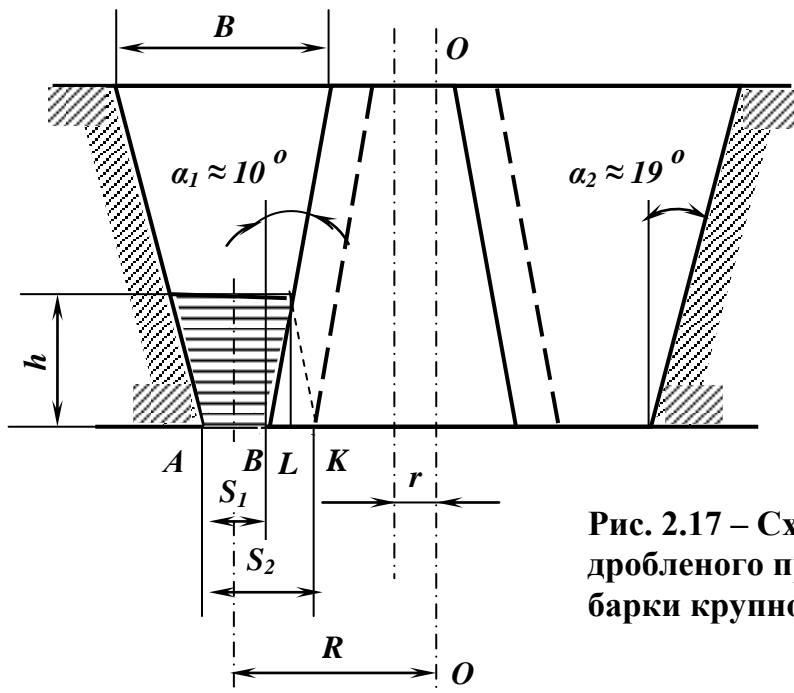


Рис. 2.17 – Схема розвантажування дробленого продукту з конусної дробарки крупного дроблення.

Використовуючи властивість похідної пропорції отримуємо:

$$h = \frac{DL + LK}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{e}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2}. \quad (2.45)$$

Після підстановки в рівняння (2.33) отримуємо:

$$n = 30 \sqrt{g(\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) / 2e}. \quad (2.46)$$

де  $e = 2r$  – хід дробильного конуса на лінії розвантажувального отвору, м;  $r$  – ексцентриситет, м.

В конусних дробарках крупного дроблення ексцентриситет на рівні розвантажувальної щілини залежно від розміру дробарки складає 13 – 25 мм. При цьому дробарки одного розміру можуть мати різні ексцентриситети. Аналіз конструктивних розмірів дробарок показує, що середній хід конуса  $e$  (м) на горизонті вихідної щілини (подвійний ексцентриситет) пов'язаний з шириною завантажувального отвору  $B$  (м) лінійною залежністю:

$$e = 0,02B + 0,01. \quad (2.47)$$

Формула (2.47) отримана без урахування опору руху дробленого продукту при виході його з дробарки, тому вона дає приблизно в два ра-

зи більші значення частоти обертання вала. Для практичних розрахунків частоти обертання ексцентрикового стакана конусних дробарок крупного дроблення  $n$  ( $\text{хв}^{-1}$ ) користуються формулою:

$$n = 15\sqrt{g(\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2) / 2e}. \quad (2.48)$$

Якщо у формулу (2.48) підставити значення середнього ходу конуса  $e$  (2.47) і тангенсів кутів зовнішньої чаші  $\alpha_1$  та дробильного конуса  $\alpha_2$ , то після перетворення отримуємо:

$$n = 240 / \sqrt{2B + 1}, \text{ хв}^{-1}. \quad (2.49)$$

Для редуційних дробарок типу КРД частоту обертання конуса приймають на 10 – 20 % менше, ніж для дробарок типу ККД того ж розміру.

*Продуктивність* розраховують по об'єму дробленого продукту, що випадає за один оберт дробильного конуса. Згідно з теоремою Гульдена за один оберт дробильного конуса з дробарки вивантажується об'єм матеріалу, що дорівнює добутку площі кільця з трапецеїдальним поперечним перетином  $AA_1BB_1$  на середню довжину цього кільця (рис. 2.17):

$$V = F \cdot 2\pi R, \quad (2.50)$$

де  $F$  – площа перетину кільця;  $R$  – відстань від осі обертання  $O - O$  до центра ваги трапеції.

Як видно з рис. 2.17,

$$F = \frac{s_1 + s_2}{2} \cdot h = \frac{s_1 + s_2}{2} \cdot \frac{e}{\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2}.$$

Після підстановки у формулу (2.38) одержуємо:

$$V = \frac{s_1 + s_2}{2} \cdot \frac{e}{\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2} \cdot 2\pi R, \quad (2.51)$$

де  $s_1$  і  $s_2$  – максимальна і мінімальна ширина вихідного отвору, м.

Для середніх значень ширини вихідного отвору є така залежність між шириною завантажувального отвору  $B$ , площею перетину кільця  $F$  і відстанню  $R$  центра ваги трапеції від осі обертання:

$$F = 0,0056B^2 + 0,0026B - 0,0001; \quad R = 0,83B.$$

Після підстановки значень  $F$  і  $R$  у формулу (2.49) отримуємо вираз для визначення об'єму:

$$V = 0,0292B^3 + 0,0136B^2 - 0,0005B. \quad (2.52)$$

Об'ємну продуктивність дробарки розраховують з використанням формул (2.49) і (2.52):

$$Q_o = 60nV = \frac{420,5B^3 + 195,8B^2 - 7,2B}{\sqrt{2B+1}}, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (2.53)$$

Масова продуктивність конусної дробарки крупного дроблення:

$$Q = k\delta \frac{420,5B^3 + 195,8B^2 - 7,2B}{\sqrt{2B+1}}, \text{ т/год.}, \quad (2.54)$$

або приблизно

$$Q = 210k\delta B^2 \sqrt{2B+1}, \text{ т/год.}, \quad (2.55)$$

де  $k$  – коефіцієнт розпушення;  $\delta$  – густина вихідного матеріалу, т/м<sup>3</sup>.

Результати розрахунку з використанням формули (2.54) не збігаються з даними каталогів заводів-продуцентів, тому що ця формула виведена для середніх значень ширини розвантажувального отвору, ексцентриситету і основних розмірів робочого простору дробарки. Для урахування реальних значень ширини вихідного отвору і довжини ходу дробильного конуса необхідно визначити продуктивність на 1 мм ширини розвантажувального отвору та помножити її на нове значення ширини.

За емпіричною формулою Механобру повна розрахункова продуктивність конусної дробарки визначається:

$$Q = 0,6k_{кр}k_{вл}k_{тв}D^2rne\delta_n, \text{ т/год.}, \quad (2.56)$$

де  $k_{кр}, k_{вл}, k_{тв}$  – коефіцієнти, що враховують вплив крупності, вологості і твердості матеріалу, який дробиться (табл. 2.3);  $D$  – діаметр основи дробильного конусу, м;  $r$  – ексцентриситет вала у площині вихідного отвору, м;  $n$  – частота обертів рухомого конуса, хв<sup>-1</sup>;  $e$  – ширина розван-

тажувальної щілини у фазі розкриття профілів (на відкритій стороні), м;  
 $\delta_n$  – насипна густина матеріалу, т/м<sup>3</sup>.

Потужність електродвигуна конусної дробарки визначається за емпіричною формулою:

$$N = 36D^2rn, \text{ кВт}, \quad (2.57)$$

де  $D$  – діаметр основи дробильного конуса, м;  $r$  – ексцентриситет вала у площині вихідного отвору, м;  $n$  – частота обертів рухомого конуса, хв<sup>-1</sup>.

Ступінь дроблення конусних дробарок крупного дроблення може досягати 8, але звичайно вони працюють при ступенях дроблення від 3 до 4. Конусні дробарки крупного дроблення великих розмірів можуть працювати «під завалом». Дроблений продукт конусних дробарок крупного дроблення містить значну кількість надлишкових зерен, що залежить від фізичних властивостей руди, стану футеровочних плит дробарки та ін.

Типові характеристики крупності продуктів дроблення конусних дробарок крупного дроблення наведені на рис. 2.18, вони використовуються так само, як і характеристики для щоккових дробарок. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен  $z$  (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по «+d».

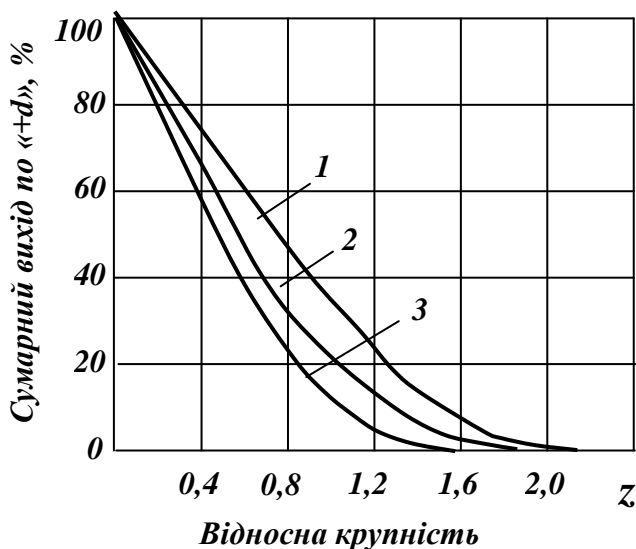


Рис. 2.18 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення конусних дробарок крупного дроблення.

- 1 – руди великої міцності;
- 2 – руди середньої міцності;
- 3 – руди малої міцності.

При розрахунках схем дроблення типові характеристики крупності застосовують для визначення гранулометричного складу дроблених продуктів, якщо реальний гранулометричний склад продукту не був отриманий при попередніх дослідженнях. Також сумарний вихід класів по «+d»

може бути розрахований за емпіричними формулами, що наведені в табл. 2.6.

**Таблиця 2.6 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту конусних дробарок крупного дроблення**

| Тип руди           | Розрахункова формула  | Формула вірна    |
|--------------------|---|------------------|
| Малої міцності     | $b^{+z} = (1 - 1,04z + 0,01z^2 + 0,27z^3 + 0,07z^4) \cdot 10^2$<br>(2.58) | при $z \leq 1,6$ |
| Середньої міцності | $b^{+z} = (1 - 0,80z + 0,11z^3 - 0,02z^4) \cdot 10^2$<br>(2.59)           | при $z \leq 1,8$ |
| Великої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,69z + 0,04z^2 + 0,03z^3) \cdot 10^2$<br>(2.60)           | при $z \leq 2,0$ |

Характеристика крупності дробленого продукту залежить від міцності руди, ширини вихідної щілини дробарки, а також ефективності роботи грохота в стадії дроблення.

Конусні дробарки крупного дроблення використовують для дроблення порід великої міцності і в'язких. Дробарка повинна забезпечити необхідну продуктивність при заданій крупності дробленого продукту. Ширина приймального отвору дробарки повинна бути на 15 % більша розміру максимального зерна у вихідному матеріалі.

## 2.7 Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення

### 2.7.1 Конструкція і принцип дії конусних дробарок середнього і дрібного дроблення

Конусні дробарки середнього (КСД) і дрібного (КМД) дроблення призначені відповідно для другої і третьої стадій (у тристадіальних схемах) або для третьої і четвертої стадій (у чотирістадіальних схемах) при дробленні руд середньої твердості і твердих.

Конструктивно і за принципом дії конусні дробарки середнього і дрібного дроблення практично мало відрізняються від конусних дробарок крупного дроблення. Їх основна конструктивна відмінність полягає у способі установки головного вала: у конусних дробарок крупного дроблення головний вал підвішується до траверси, а у конусних дробарок середнього і дрібного дроблення – обпирається на сферичний підшипник.

Характерною особливістю конусних дробарок середнього і дрібного дроблення є великий нахил утворюючих дробильного конуса. Тому при наближенні дробильного конуса до нерухомої конічної чаші біля вихідної щілини утворюється паралельна зона, тобто частина робочого простору, де конічні поверхні паралельні.

Конусна дробарка середнього або дрібного дроблення (рис. 2.19) складається зі станини **2** з циліндричним стаканом **1** у центрі. У середині циліндричного стакану встановлений ексцентрикостакан **12**. Зверху на пружинах **3** встановлена конічна чаша **4**, всередині якої розташований дробильний конус **5**, що опирається на сферичний підшипник **7**. Головний вал **8** нижнім кінцем входить у гніздо ексцентрикостакана і при його обертанні виконує кругові рухи усередині чаші **4**. Ексцентрикостакан **12** отримує обертовий рух від електродвигуна через муфту **9**, привідний вал **10** і конічні шестерні **11**.

Дробарка завантажується зверху за допомогою розподільної тарілки **6**. При наближенні конуса **5** до чаші **4** відбувається дроблення матеріалу роздавлюванням та стиранням, тому що конус обертається не тільки навколо осі конічної чаші, але й навколо своєї власної.

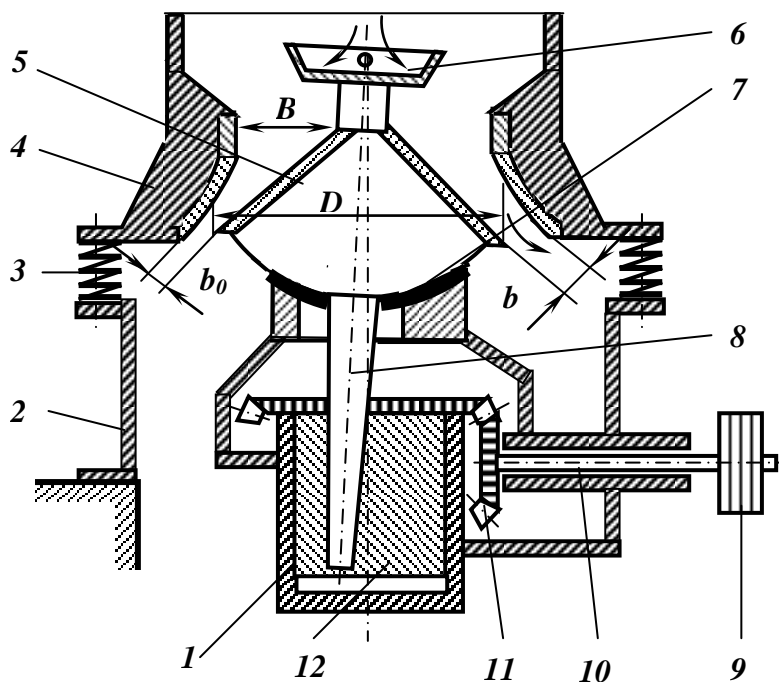


Рис. 2.19 – Схема конусної дробарки середнього і дрібного дроблення.  
**1** – циліндричний стакан; **2** – станина; **3** – пружини; **5** – дробильний конус; **6** – розподільна тарілка; **7** – сферичний підшипник; **8** – головний вал; **9** – муфта; **10** – привідний вал; **12** – ексцентрикостакан.



Розмір дробарок КСД і КМД характеризується діаметром основи рухомого конуса  $D$ .

Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення відрізняються довжиною паралельної зони: у дробарок дрібного дроблення вона дорівнює  $1/6$  діаметра рухомого конуса, а у дробарок середнього дроблення – тільки  $1/10 \div 1/12$ .

Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення більш швидкохідні в порівнянні з дробарками крупного дроблення. Залежно від розміру дробарки частота коливань конуса в 2 – 3 рази більше, чим у дробарок крупного дроблення. Крім того, вони мають більший кут відхилення конуса в порівнянні з дробарками крупного дроблення. Великий нахил твірних дробильного конуса і більш висока частота його коливань забезпечує чотири-, п'ятикратне затиснення грудок руди у робочому просторі, в тому числі не менше одного разу в паралельній зоні.

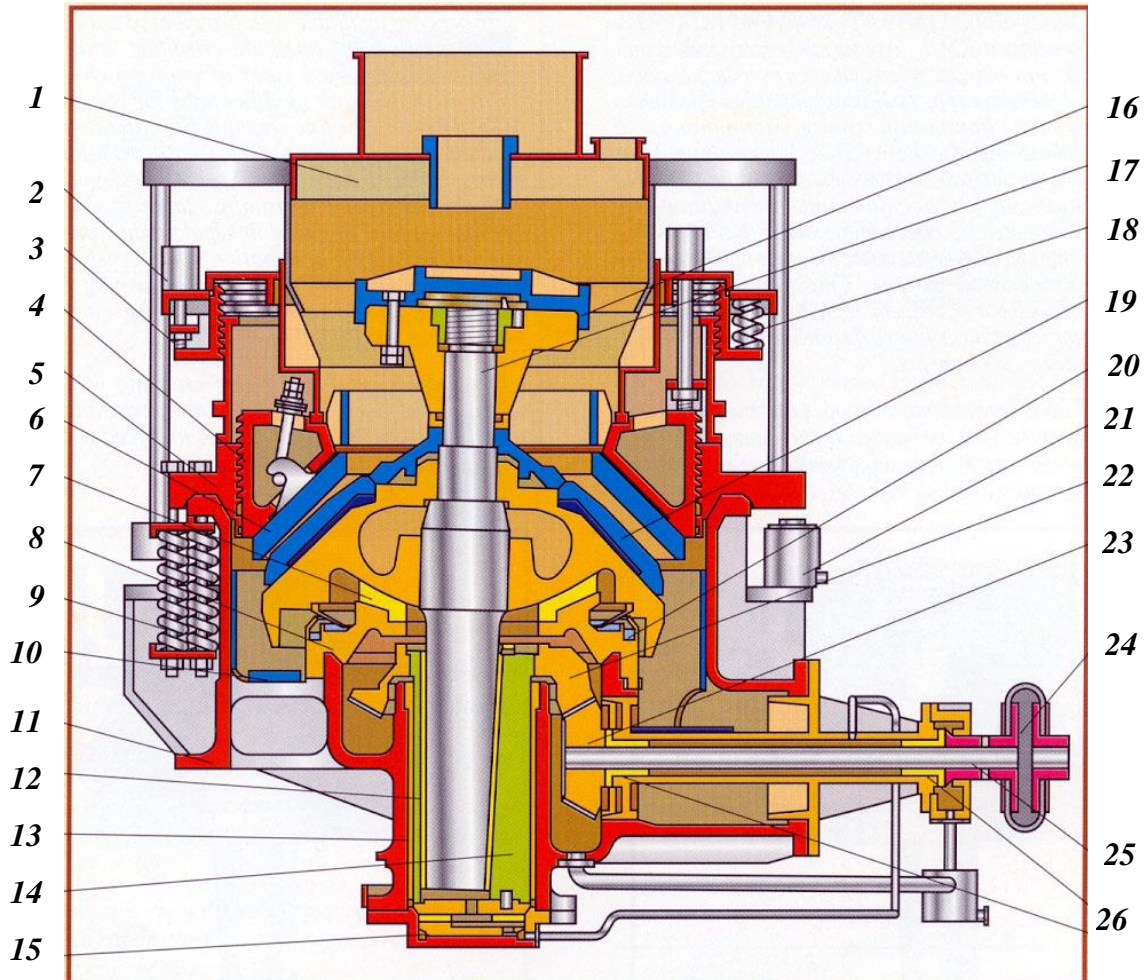
Конусні дробарки середнього (КСД) дроблення випускають у двох виконаннях: ГР – для грубого дроблення; Т – для тонкого дроблення. Конусні дробарки дрібного (КМД) дроблення виготовлюються у трьох виконаннях: ГР – для грубого дроблення; Т – для тонкого дроблення; СТ – для надтонкого дроблення. Розрізняють дробарки КСД і КМД з механічним і гідравлічним регулюванням розвантажувального отвору. Дробарки КСД і КМД призначені для дроблення руд, нерудних та інших матеріалів середньої твердості і твердих.

Конструкції дробарок КСД і КМД подібні, тому нижче розглянуто тільки дробарки КМД-2200Т (рис. 2.20).

Верхня частина дробарки обладнана завантажувальним пристроєм **1** для рівномірного розподілу руди за допомогою тарілки **16**. Зменшення крупності матеріалу здійснюється роздавлюванням у результаті коливального руху дробильного конуса **17** напрусованого на головний вал. Маса валу, а також вертикальна і горизонтальна складові зусиль дроблення сприймаються сферичним під'ятником-опирачем **7**. Нижня поверхня конуса **17** має форму сфери з тонкою бронзовою прокладкою. Опорна чаша **8**, яка служить опорою для сферичної поверхні, насаджена на стінку картера, що складає одне ціле зі станиною **11**. Для запобігання проникнення пилу і дрібних частинок матеріалу у сферичний під'ятник **7** передбачений гідравлічний затвор **20**.

У масивну циліндричну втулку **13** запресована тонкостінна конусна бронзова втулка **12**. У середині втулки **12** обертається ексцентриковий стакан **14**, який спирається на диски **15** плоского під'ятника. Нижня частина головного вала входить у виїмку стакана **14**, який отримує обертальний момент від електродвигуна через зубчасту пару **22** і **23**, привідний вал **25** і еластичну муфту **24**.

Нерухомий конус **6** (з футеровкою) кріпиться до регулювального кільця **4**, яке, у свою чергу, з'єднується з трапецеїдальною різьбою з опорним кільцем **5**, що лежить на верхньому фланці станини **11**. Ширина розвантажувального отвору регулюється переміщенням кільця **4** (за допомогою пристроїв **2** і **3**) по висоті.



**Рис. 2.20 – Конусна дробарка типу КМД-2200Т.**

**1** – завантажувальний пристрій; **2, 3** – пристрої фіксації і розфіксації регулювального кільця; **4** – регулювальне кільце; **5** – опорне кільце; **6** – нерухомий конус (з футеровкою); **7** – сферичний підп'ятник; **8** – опорна чаша; **9** – пружинна система; **10** – броня ребра жорсткості; **11** – станина; **12** – конусна втулка ексцентрика; **13** – циліндрична втулка; **14** – ексцентриковий стакан; **15** – диски підп'ятника; **16** – розподільна тарілка; **17** – дробильний конус; **18** – пружини фіксації; **19** – футеровка конуса; **20** – гідрозатвор; **21** – гідросистема розвантаження тіл, що не дробляться; **22, 23** – конічні зубчаті шестерні приводу; **24** – еластична муфта; **25** – привідний вал; **26** – втулки приводного вала.

Для запобігання дробарки від поломки при попаданні тіл, що не дробляться, конструкція обладнана системою пружин **9**, яка розташована по периметру. При попаданні у робочу зону металевого тіла нерухомий конус разом з опорним і регулювальним кільцями піднімається за допомогою гідравлічної системи **21** і недробиме тіло вивалюється крізь розвантажувальний отвір, якщо його розмір не перевищує ширину отвору при розмиканні. Після цього пружини повертають конус **6** у первісне положення.

При експлуатації конусних дробарок необхідно забезпечити рівномірне надходження в неї вихідного матеріалу по всьому колу завантажувального отвору. Нерівномірне завантаження робочого простору дробарки матеріалом приводить до одностороннього зносу футеровки, після чого дробарка починає видавати нерівномірний за крупністю продукт.

Мінімальна крупність дробленого продукту, яка може бути отримана при роботі дробарок КМД у відкритому циклі, складає 20 – 25 мм. Для отримання більш дрібних продуктів при роботі КМД необхідно застосовувати замкнені цикли дроблення. Однак, при цьому продуктивність дробарок знижується через обмежену ефективність грохочення та повернення на дроблення частини готового по крупності продукту, але у результаті надходження у цикл подрібнення більш дрібного матеріалу продуктивність млинів збільшується.

Для дрібного дроблення фірма «Норенберг» (США) створила *дробарки типу «Жиродиск»*. Вони призначені для дроблення матеріалів крупністю до 40 мм та отримання дробленого продукту крупністю до 6 – 8 мм.

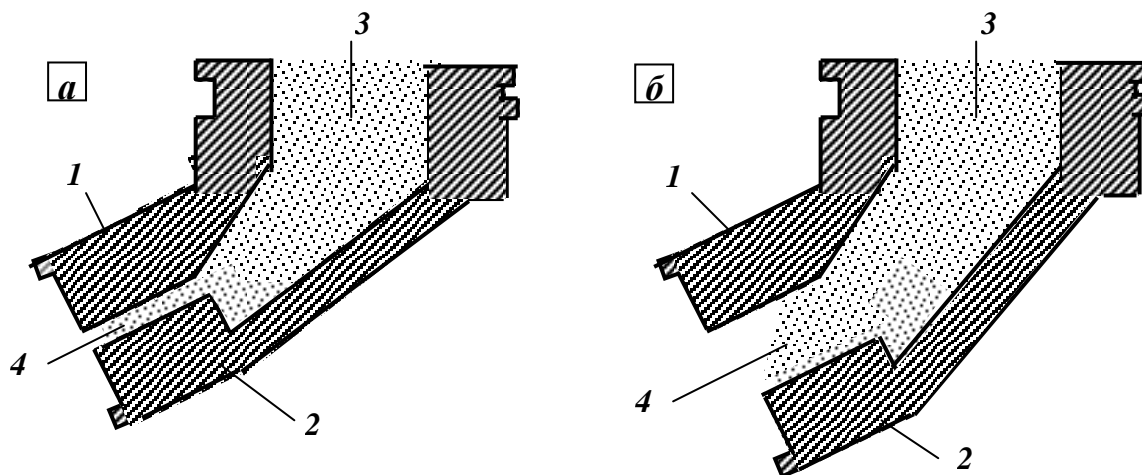
За будовою дробарка «Жиродиск» - це конусна дробарка дрібного дроблення, але дробильний конус у неї зроблений дуже пологим (диск). Конус-диск спирається на сферичний підп'ятник. Захист від поломок при попаданні металу здійснюється притискними пружинами настановного кільця. Вихідна щілина регулюється вгвинчуванням та вигвинчуванням дробильної чаші або гідравлічним способом.

Головна відміна дробарки «Жиродиск» від конусних дробарок полягає у конфігурації камери дроблення: пологий конус-диск і камера, в якій дроблення відбувається в самій масі матеріалу (рис. 2.21). Конус-диск має високу частоту коливань, тому у дробарці руйнування матеріалу відбувається швидким натисканням – ударом і стиранням у багатосферної маси зерен.

При роботі дробарки велике значення має постійне заповнення матеріалом робочого простору, тому подача матеріалу у дробарку регулюється автоматично.

Дробарки «Жиродиск» застосовуються в основному для виготовлення штучного будівельного або дорожнього піску з граніту, базальту,

вапняку. У цій галузі вони успішно конкурують з молотковим дробарками і стержневими млинами. Застосовують дробарки «Жиродиск» й на збагачувальних фабриках для отримання дрібного живлення для кульових млинів (до 5 і навіть до 3 мм).



**Рис. 2.21 – Схема процесу в камері дроблення дробарки «Жиродиск».**  
**а – чаша і конус-диск зближені – матеріал дробиться;**  
**б – вихідна щілина розкрита – матеріал розвантажується;**  
**1 – футеровка чаші; 2 – футеровка конуса-диска; 3 – камера дроблення;**  
**4 – паралельна зона дробарки.**

У такому разі дроблений продукт конусних дробарок крупністю 20 – 25 мм додроблюється у дробарках «Жиродиск», які працюють у замкненому циклі з грохотами. Введення додаткової стадії дроблення окупається підвищенням продуктивності кульових млинів при подачі в них дрібного матеріалу.

*Конусні інерційні дробарки (КІД)* – новий напрямок вітчизняного гірничо-збагачувального машинобудування. Підвищення продуктивності звичайних конусних дробарок зв'язано зі збільшенням їхніх розмірів, що у свою чергу пов'язано з рядом труднощів як у технології, так й у експлуатації. Конусні інерційні дробарки дозволяють у відкритому циклі отримати ступінь дроблення 15 – 20 (у дробарок КСД і КМД ступінь дроблення до 7). Основною характерною особливістю дробарок КІД є дроблення під дією сили інерції, що виникає при швидкому обертанні неврівноваженого вантажу (дебалансу). Така конструктивна особливість дозволяє:

- у два рази підвісити число коливань конуса;
- суттєво збільшити дробильне зусилля;
- забезпечити високу ступінь дроблення;

- застосувати ефективну систему віброізоляції;
- виключити перевантаження приводу і поломки деталей при попаданні металу.

Конусна інерційна дробарка (рис. 2.22) складається зі станини *1*, у середині якої розташований дробильний конус *2*, що спирається на сферичний під'ятник *4*. Інерційний круговий рух конус *2* отримує від двох віброзбуджувачів *3*, що розташовані на кінцях горизонтального коромисла *5*, вісь якого зв'язана з валом *11* конуса *2* за допомогою сферичного шарніра *6*. Віброзбуджувачі працюють синхронно. Обертання дебалансам передається через карданні вали *8* від двох електродвигунів *10*, які встановлені на опорній рамі *9*. Станина спирається на фундамент через пружинні амортизатори *7*.

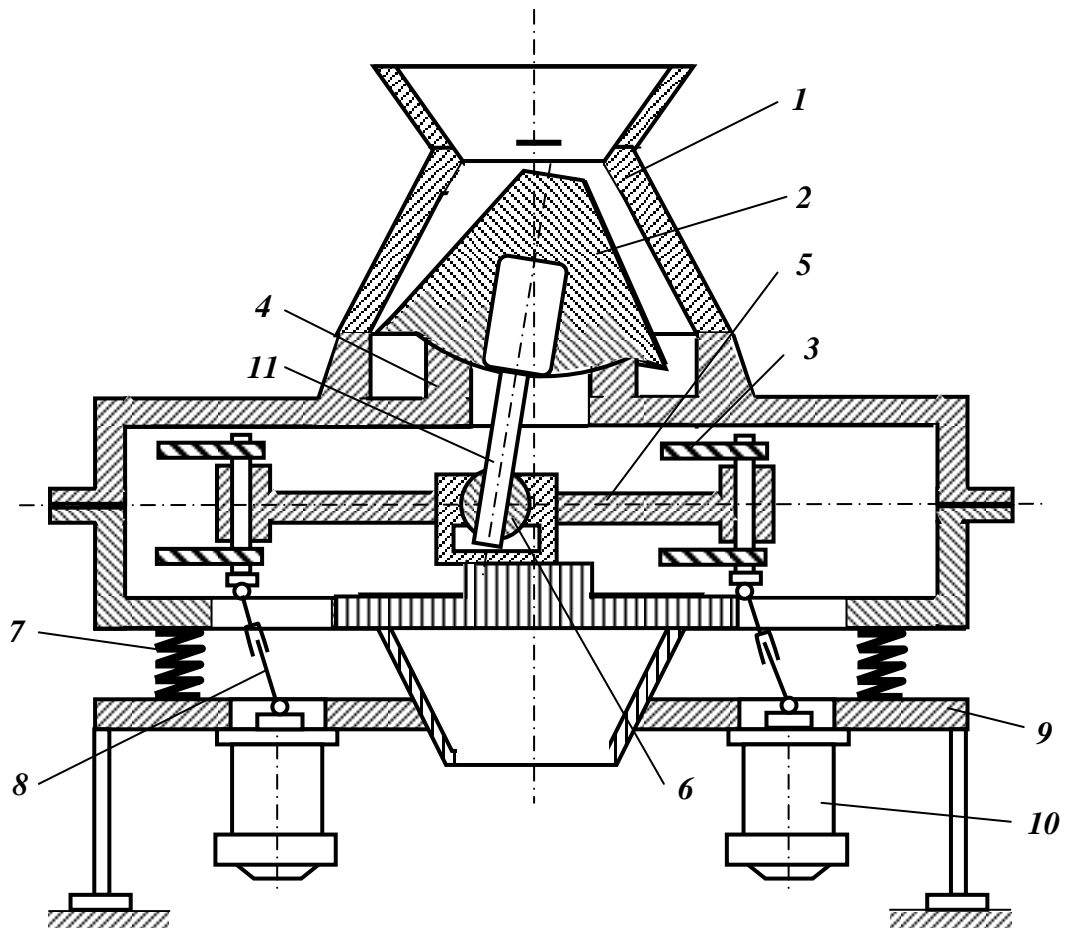


Рис. 2.22 – Схема конусної інерційної дробарки типу КІД.

- 1 – станина; 2 – дробильний конус; 3 – дебалансні віброзбуджувачі;  
 4 – сферичний під'ятник; 5 – коромисло; 6 – сферичний шарнір;  
 7 – пружинні амортизатори; 8 – карданні вали; 9 – опорна рама;  
 10 – електродвигуни; 11 – вал конуса.

Під дією інерційної сили вісь дробильного конуса описує конічну поверхню з вершиною у центрі сфери, по якій оброблений сферичний підп'ятник 4. При переміщенні дробильного конуса по конічній чаші відбувається дроблення матеріалу, який знаходиться у робочому просторі дробарки.

Дробарки типу КІД у порівнянні з дробарками типу КМД дозволяють збільшити ступінь дроблення у 3 – 4 рази і одночасно підвищити продуктивність млинів завдяки більш дрібному живленню.

Дробарки типу КІД можуть застосовуватись для отримання дробленого продукту крупністю менше 4 мм при роботі у відкритому і замкненому циклах.

Технічні характеристики конусних дробарок типів КСД, КМД і КІД наведені у додатках Б.

### 2.7.2 Технологічні характеристики конусних дробарок середнього і дрібного дроблення

До основних технологічних характеристик конусних дробарок середнього і дрібного дроблення належать: кут захоплення  $\alpha$ , частота обертання ексцентрикового стакана  $n$ , продуктивність  $Q$ , хід конуса  $e$  і потужність електродвигуна  $N$ .

Кутом захоплення конусних дробарок середнього і дрібного дроблення називається кут між твірними внутрішньої поверхні нерухокої конічної чаші і зовнішньої поверхні дробильного конуса у верхній частині робочого простору в момент їхнього найбільшого зближення (рис. 2.23).

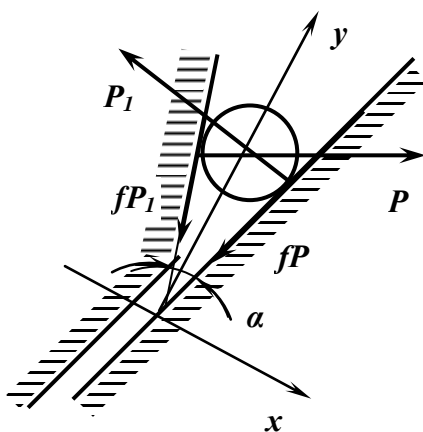
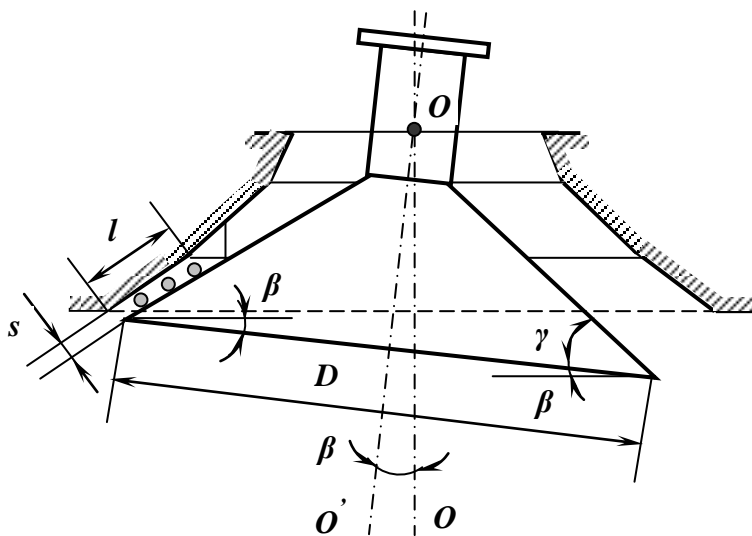


Рис. 2.23 – Кут захоплення конусних дробарок середнього і дрібного дроблення.

Умови рівноваги грудки матеріалу у камері дроблення конусної дробарки середнього і дрібного дроблення аналогічні умовам рівноваги грудки матеріалу в щоківій дробарці, що дозволяє поширити висновки, які були зроблені для щоківих дробарок, також і на конусні дробарки

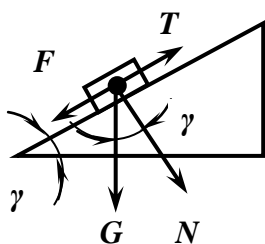
середнього і дрібного дроблення. Таким чином, кут захоплення конусних дробарок середнього і дрібного дроблення не повинен перевищувати подвійного кута тертя. Практично кут захоплення конусних дробарок середнього і дрібного дроблення складає у середньому  $18^\circ$ .

Для одержання більш однорідного за крупністю продукту конусні дробарки середнього і дрібного дроблення мають паралельну зону довжиною  $l$  і шириною  $s$ . Тривалість руху зерна матеріалу у паралельній зоні повинна бути не менше часу одного оберту дробильного конуса. Якщо ця умова виконується кожне зерно буде затиснене у паралельній зоні не менше одного разу (рис. 2.24).



**Рис. 2.24 – Розвантаження дробленого продукту у дробарках середнього і дрібного дроблення.**  
 $\gamma$  – кут нахилу бокової поверхні дробильного конуса до його основи;  
 $\beta$  – кут між віссю дробарки і віссю дробильного конусу.

При русі у паралельній зоні (рис. 2.25) грудки ковзають по поверхні дробильного конусу, яка нахилена до горизонту під кутом, що змінюється у межах від  $\gamma - \beta$  до  $\gamma + \beta$ .



**Рис. 2.25 – Сили, які діють на грудку матеріалу при ковзанні його по дробильному конусу.**

Оптимальна частота обертання ексцентрикового стакану  $n$  ( $\text{хв}^{-1}$ ) визначається з припущення, що грудки матеріалу під дією сили ваги ковзають по поверхні дробильного конусу, яка нахилена до горизонту під кутом  $\gamma$ . Впливом сил інерції, які виникають внаслідок обертання осі дробильного конусу, нехтуємо. Таким чином, основні сили, що діють на грудку матеріалу, це – сила ваги  $G$  та сила тертя  $T$ . Сила, яка рухає грудку по похилій площині, дорівнює різниці між цими силами:

$$F - T = G \sin \gamma - fG \cos \gamma = G(\sin \gamma - f \cos \gamma), \text{ Н}, \quad (2.61)$$

де  $F$  – складова сили ваги паралельна похилій площині, Н;  $\gamma$  – кут нахилу бокової поверхні дробильного конуса до його основи, град;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання.

Ця формула показує, що при заданих куті нахилу площини і коефіцієнті тертя рушійна сила за увесь час руху грудки не змінюється, а отже грудка буде рухатись рівноприскорено.

З використанням другого закону Ньютона рівняння (2.61) можна записати:

$$ma = F - T = mg(\sin \gamma - f \cos \gamma), \text{ Н},$$

звідки прискорення  $a$  грудки:

$$a = \frac{dV}{dt} = g(\sin \gamma - f \cos \gamma), \text{ м/с}^2, \quad (2.62)$$

де  $m$  – маса грудки, кг;  $V$  – швидкість руху грудки, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с;  $t$  – час, с.

Інтегрування рівняння (2.62) дозволяє визначити швидкість руху і шлях, який пройшла грудка матеріалу по похилій площині (поверхні дробильного конусу):

$$V = gt(\sin \gamma - f \cos \gamma), \quad (2.63)$$

$$S = 0,5gt^2(\sin \gamma - f \cos \gamma). \quad (2.64)$$

За час одного оберту ексцентрикового стакану ( $t = n / 60$ ) грудка повинна пройти шлях рівний або дещо менший довжини  $l$  паралельної зони. Після підстановки  $t$  у рівняння (2.64) одержимо формулу для визначення мінімальної довжини паралельної зони:

$$l \geq 0,5g(60/n)^2 \cdot (\sin \gamma - f \cos \gamma), \text{ м}, \quad (2.65)$$

звідси, оптимальна частота обертання ексцентрикового стакану:

$$n \geq 60 \sqrt{\frac{g(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{2l}}, \text{ хв}^{-1}. \quad (2.66)$$



Для дробарок типу КСД частіше за все довжина  $l$  паралельної зони складає  $1/12$  діаметра основи конуса  $D$ , тому після перетворення рівняння (2.66) отримуємо:

$$n \geq 460 \sqrt{(\sin \gamma - f \cos \gamma) / D}. \quad (2.67)$$

Для дробарок типу КМД практично приймається та ж частота обертання ексцентрикового стакану, що й для дробарок КСД, але оскільки довжини паралельної зони дробарок КМД приблизно у два рази більші, ніж у КСД, то прийнята для них частота обертання ексцентрикового стакану відповідає кількаразовому затисненню грудки матеріалу в паралельній зоні.

Частоти обертання ексцентрикового стакану вітчизняних конусних дробарок середнього і дрібного дроблення наведені у табл. 2.7.

**Таблиця 2.7 - Частоти обертання ексцентрикового стакану конусних дробарок типів КСД і КМД**

| Дробарки типу КСД |                     | Дробарка типу КМД |                     |
|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Типорозмір        | $n, \text{хв}^{-1}$ | Типорозмір        | $n, \text{хв}^{-1}$ |
| КСД-1200          | 260                 | КМД-1200          | 260                 |
| КСД-1750          | 245 – 260           | КМД-1750          | 260                 |
| КСД-2200          | 242                 | КМД-2200          | 242                 |
|                   |                     | КМД-3000          | 185                 |

*Продуктивність* дробарки розраховують по об'єму дробленого продукту, що вивантажується за один оберт дробильного конуса:

$$V = sl\pi D, \text{ м}^3, \quad (2.68)$$

де  $s$  і  $l$  – ширина і довжина паралельної зони, м;  $D$  – діаметр дробильного конуса біля розвантажувальної щілини, м.

Об'ємну продуктивність конусної дробарки середнього або дрібного дроблення отримують з використанням формули (2.68):

$$Q_o = 60\pi nslD, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.69)$$

Масова продуктивність конусної дробарки середнього або дрібного дроблення буде:

$$Q = 60\pi nslDk\delta, \text{ т/год}, \quad (2.70)$$

де  $k$  – коефіцієнт розпушення;  $\delta$  – густина вихідного матеріалу,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Розрахункова продуктивність за паспортними даними КСД і КМД визначається за формулами:

– при роботі у відкритому циклі:

$$Q = 10^4 qsk_m k_{вл} k_{кр} k_n; \quad (2.71)$$

– при роботі у замкненому циклі:

$$Q = 10^4 qsk_m k_{вл} k_{кр} k_n k_{ц}, \quad (2.72)$$

де  $q$  – питома продуктивність (табл. 2.8), м<sup>3</sup>/год·м;  $s$  – ширина розвантажувальної щілини, м;  $k_{кр}, k_{вл}, k_m$  – коефіцієнти, що враховують вплив крупності, вологості і твердість матеріалу, який дробиться (табл. 2.3);  $k_n = \delta_n / 1,6$  – коефіцієнт, що враховує вплив насипної густини матеріалу, який дробиться;  $\delta_n$  – насипна густина матеріалу, який дробиться, т/м<sup>3</sup>;  $k_{ц}$  – коефіцієнт, що враховує вплив циркулюючого навантаження ( $k_{ц} = 1,25 \div 1,40$ ).

**Таблиця 2.8 – Питома продуктивність дробарок типів КСД і КМД при дробленні руд середньої міцності з насипною густиною 1,6 т/м<sup>3</sup>**

| Дробарки<br>КСД | Питома продуктивність у відкритому циклі |                           | Дробарки<br>КМД | Питома продуктивність у циклі |                           |             |                           |
|-----------------|--|---------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
|                 |  |                           |                 | відкритому                    |                           | замкненому  |                           |
|                 | т/год·<br>м                              | м <sup>3</sup> /год·<br>м |                 | т/год·<br>м                   | м <sup>3</sup> /год·<br>м | т/год·<br>м | м <sup>3</sup> /год·<br>м |
| КСД-1200        | 0,55                                     | 0,35                      | КМД-1200        | 0,95                          | 0,60                      | 1,30        | 0,80                      |
| КСД-1750        | 0,95                                     | 0,60                      | КМД-1750        | 1,80                          | 1,10                      | 2,30        | 1,45                      |
| КСД-2200        | 1,80                                     | 1,10                      | КМД-2200        | 3,30                          | 2,05                      | 4,30        | 2,70                      |
| КСД-2500        | 2,10                                     | 1,30                      | КМД-2500        | 4,30                          | 2,70                      | 5,60        | 3,50                      |
| КСД-3000        | 2,80                                     | 1,75                      | КМД-3000        | 6,20                          | 3,90                      | 8,00        | 5,00                      |

*Хід конуса* (подвійний ексцентриситет) дробарок типів КСД і КМД значно більше ніж у ККД. Збільшення розмаху коливань необхідно для

прискорення проходження матеріалу через зону дроблення та для полегшення розвантаження і відповідно підвищення продуктивності дробарки.

Кут відхилення осі конуса від осі дробарки (кут прецесії) у дробарок КСД і КМД складає  $1,5 \div 2,5^\circ$ . Великий хід конуса визначає велике закрупнення дробленого продукту (відношення розміру максимальної грудки у дробленому продукті до розміру розвантажувальної щілини у фазі зближення конусів). Закрупнення дробарок типу КСД складає  $2,3 \div 3,0$ , для дробарок типу КМД –  $3,0 \div 4,0$ .

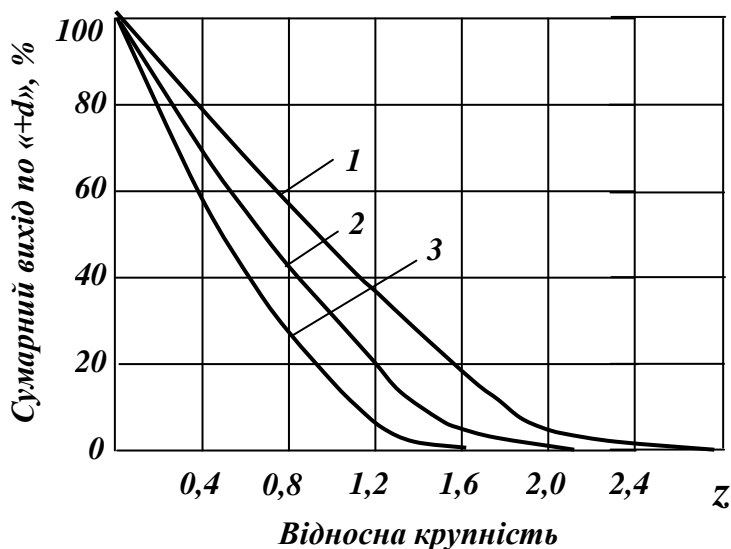
Потужність електродвигуна конусних дробарок КСД і КМД визначається за емпіричною формулою:

$$N = 0,2D^2n, \text{ кВт}, \quad (2.73)$$

де  $D$  – діаметр основи дробильного конусу, м;  $n$  – частота обертів рухомого конуса,  $\text{хв}^{-1}$ .

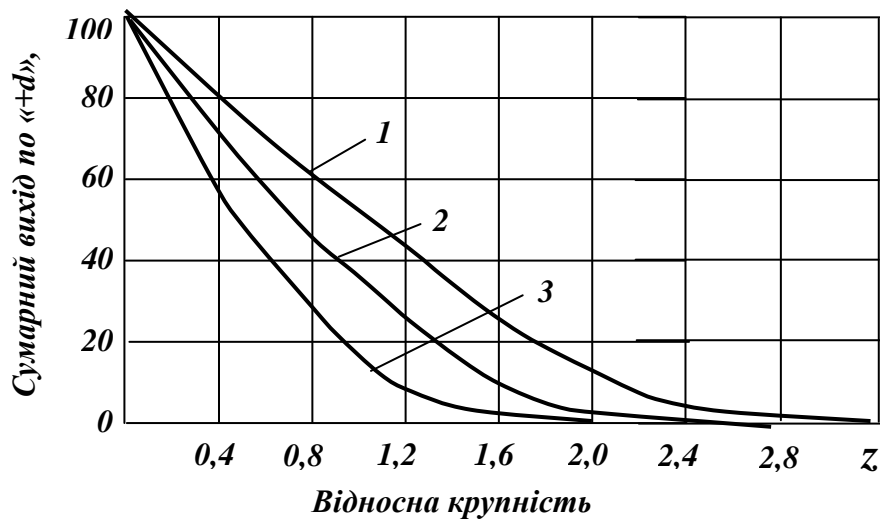
Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення звичайно працюють при ступенях дроблення від 4 до 7.

Типові характеристики крупності продуктів дроблення конусних дробарок середнього і дрібного дроблення наведені на рис. 2.26 і 2.27. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен  $z$  (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по «+ $d$ ».



**Рис. 2.26 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення конусних дробарок середнього дроблення.**

**1 – руди великої міцності; 2 – руди середньої міцності; 3 – руди малої міцності.**



**Рис. 2.27 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення конусних дробарок дрібного дроблення. 1 – руди великої міцності; 2 – руди середньої міцності; 3 – руди малої міцності.**

Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту конусних дробарок середнього і дрібного дроблення наведені у табл. 2.9.

**Таблиця 2.9 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту конусних дробарок середнього і дрібного дроблення**

| Тип руди   | Розрахункова формула  | Формула вірна    |
|--|---|------------------|
| Дроблений продукт конусних дробарок середнього дроблення (КСД) |   |                  |
| Малої міцності   | $b^{+z} = (1 - 1,20z + 0,66z^2 - 0,47z^3 + 0,20z^4) \cdot 10^2$ (2.74)  | при $z \leq 1,6$ |
| Середньої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,82z + 0,17z^2) \cdot 10^2$ (2.75)                      | при $z \leq 2,2$ |
| Великої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,57z + 0,15z^2 - 0,08z^3 + 0,02z^4) \cdot 10^2$ (2.76)  | при $z \leq 2,8$ |
| Дроблений продукт конусних дробарок дрібного дроблення (КМД)   |   |                  |
| Малої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,70z - 0,28z^2 + 0,33z^3 - 0,07z^4) \cdot 10^2$ (2.77)  | при $z \leq 2,0$ |
| Середньої міцності   | $b^{+z} = (1 + 0,12z - 1,13z^2 + 0,62z^3 - 0,10z^4) \cdot 10^2$ (2.78)  | при $z \leq 2,4$ |
| Великої міцності   | $b^{+z} = (1 - 0,48z - 0,01z^2 + 0,04z^3 - 0,006z^4) \cdot 10^2$ (2.79) | при $z \leq 3,2$ |

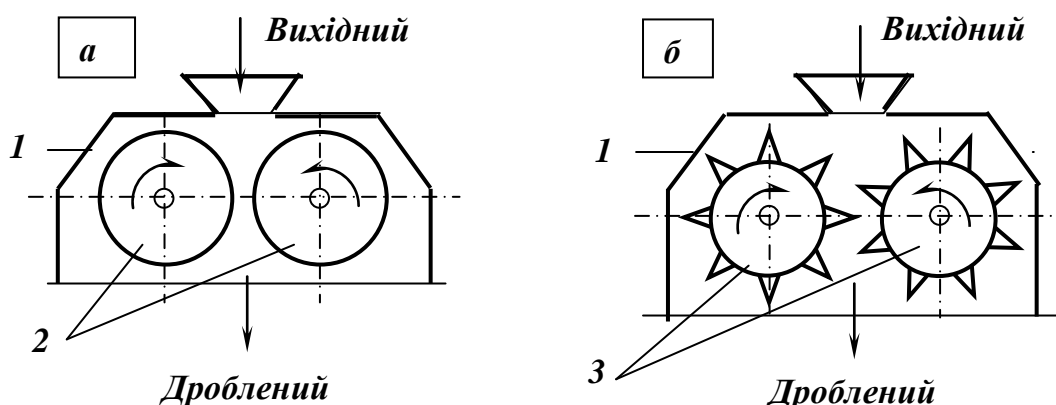
Конусні дробарки середнього і дрібного дроблення використовують для дроблення міцних і в'язких порід. Дробарки вибирають по ширині завантажувального отвору при заданій ширині вихідної щілини.

## 2.8 Валкові дробарки

### 2.8.1 Конструкція і принцип дії валкових дробарок

Валкові дробарки виготовляються з гладкими – ДГ, рифленими ДР і ДГР і зубчатими валками – ДДЗ (рис. 2.28).

Принцип дії дробарок однаковий: вихідний матеріал подається зверху, затягується валками 2 (3), що обертаються назустріч один одному, і при проходженні між ними дробиться. Дроблений продукт випадає з дробарки під дією сили ваги.



**Рис. 2.28 – Валкові дробарки:**  
*a* – з гладкими валками; *б* – з зубчатими валками.  
 1 – корпус; 2 – гладкі валки; 3 – зубчаті валки.

Валкові дробарки з гладкими валками (рис. 2.28 *a*) працюють за принципом роздавлювання вихідного матеріалу при затягуванні його в щілину між валками. Матеріал на валки дробарки подають або потоком товщиною в одну грудку, або валки працюють під завалом. При першому способі завантаження продуктивність дробарки менше ніж при другому, але менше й переподрібнення матеріалу. Однократність стиснення грудок матеріалу при проходженні між валками обумовлює малий вихід дріб'язку у дробленому продукті. Валкові дробарки з гладкими валками застосовуються для середнього і дрібного дроблення твердих порід, коли недопустиме переподрібнення цінного крихкого мінералу (марганце-

ві, каситеритові, вольфрамітові руди, калійні солі), іноді їх застосовують для середнього дроблення вугілля й коксу.

Валкові дробарки з зубчатими валками (рис. 2.28 б) працюють за принципом розколювання вихідного матеріалу при зтягуванні його між валками. При завантаженні матеріалу у дробарку необхідно забезпечити рівномірне його поступлення по всій довжині валків (для того, щоб працювала уся поверхня валків). Дробарки призначені для крупного і середнього дроблення м'яких і крихких порід (вугілля, антрацитів і сланців) при необхідності одержати грудковий дроблений продукт із невеликим вмістом дріб'язку.

Процес дроблення в дробарках із зубчатими валками здійснюється при меншому переподрібненні та витраті енергії, ніж у шоккових і конусних дробарках.

Валкові дробарки з гладкими валками (ДГ) частіше за все випускаються двовалковими (рис. 2.29).

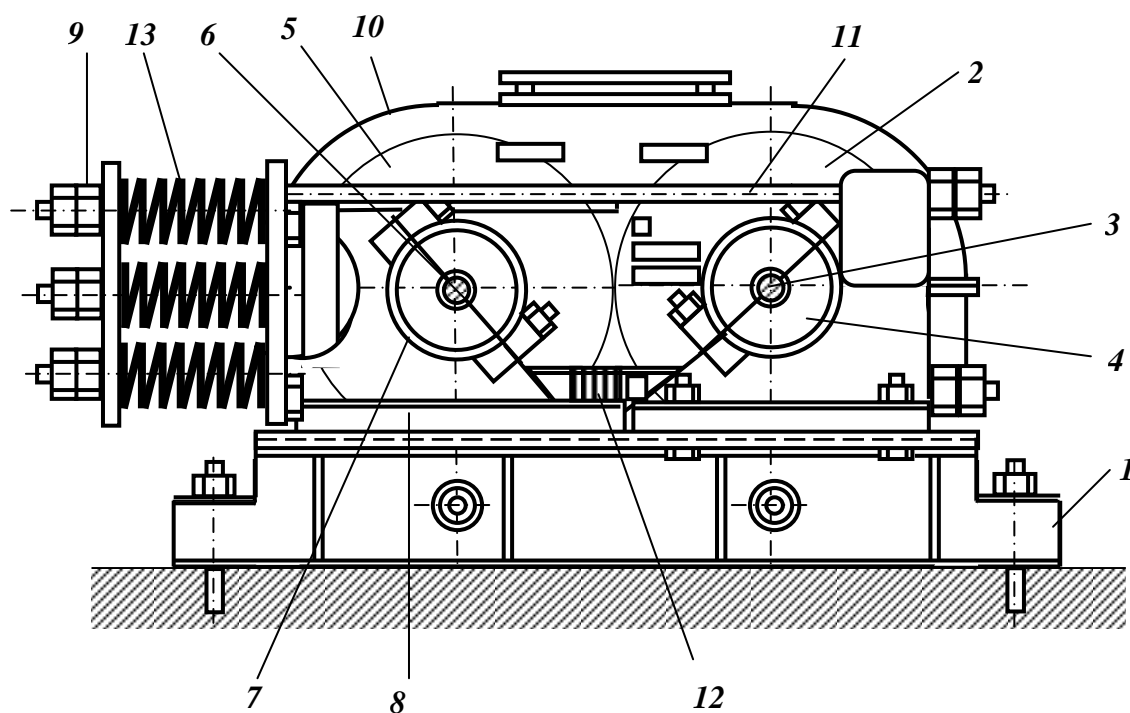


Рис. 2.29 – Валкова дробарка з гладкими валками.

1 – станина; 2, 5 – дробильні валки; 3, 6 – вали; 4, 7 – підшипники;  
8 – напрямні; 9 – зтяжні гайки; 10 – корпус; 11 – тяги; 12 – прокладки;  
13 – пружини.

Станина 1 дробарки являє собою чотирикутну раму конструкцію зварну або литу. Дробильний валок 2 насаджений на вал 3, обертається у підшипниках 4 нерухомо закріплених на станині. Другий дробильний валок 5 насаджений на вал 6, обертається у підшипниках 7, які можуть

переміщатись поздовж станини по напрямним 8. Вали 3 і 6 з дробильними валками 2 і 5 обертаються назустріч один одному і отримують обертання від електродвигуна через редуктор і карданні вали (на рис. не показані). Дробильні валки виготовлюються з чавуну і футеруються по зовнішній поверхні бандажами з високомарганцевистої або вуглецевої сталі.

Положення рухомих підшипників фіксується за допомогою тяг 11, прокладок 12, пружин 13 і затяжних гайок 9. Прокладки 12, розташовані між нерухомими підшипниками 4 і упором на нижніх тягах 11, обмежують переміщення рухомих підшипників 7, а також фіксують відстань між дробильними валками. Затяжні гайки 9 деформують пружини 13, які при цьому притискають рухомі підшипники 7 до прокладок 12.

Попередньо стиснуті пружини компенсують нормальні зусилля, які виникають при дробленні руди. При потраплянні у зазор між валками предметів, що не дробляться, пружини 13 стискаються і рухомі підшипники 7 з дробильним валком 5 відсуваються. При цьому розмір щілини між валками збільшується і предмет, що не дробиться, провалюється униз. З метою герметизації і безпеки експлуатації дробильні валки обертаються у литому корпусі 10.

Розміри валкових дробарок визначаються діаметром і довжиною валків. Окружна швидкість на поверхні валків складає 4 – 6 м/с. Валкові дробарки з гладкими валками працюють при ступені дроблення 3 – 4.

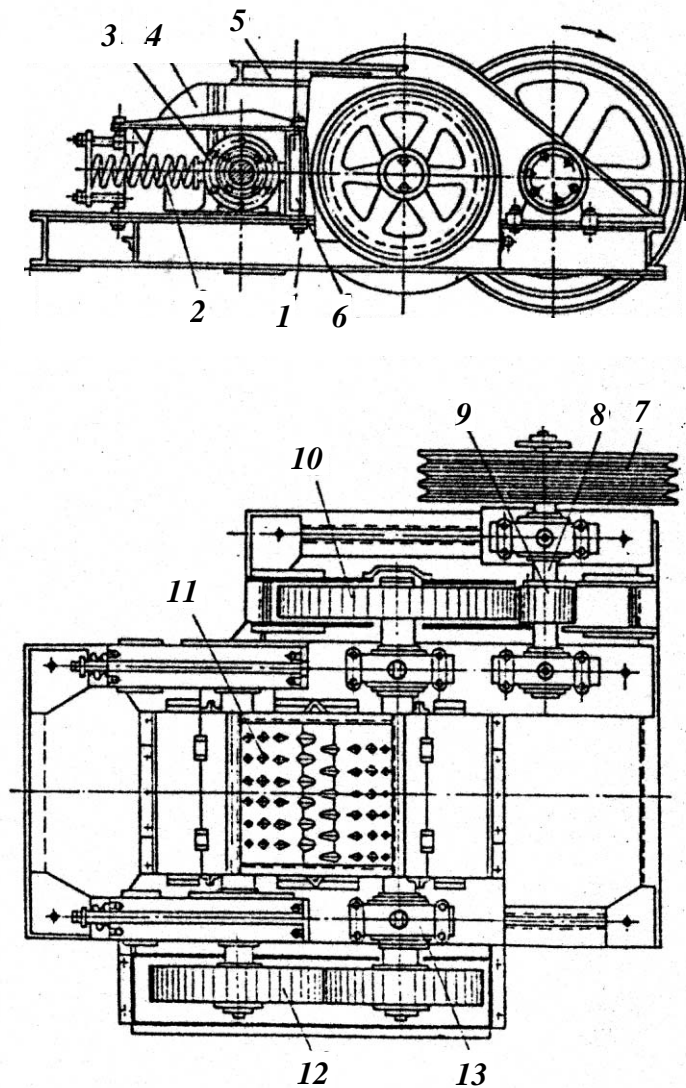
Різновидом дробарок з гладкими валками є двовалкові дробарки з рифленими валками. Виготовлюються дробарки з обома рифленими валками (ДР) і дробарки з одним гладким і одним рифленим (ДГР). Дробарки з рифленими валками застосовуються для дроблення матеріалів твердих і середньої твердості. Окружна швидкість рифлених валків на 10 – 20 % менше швидкості гладких.

Технічні характеристики валкових дробарок з гладкими і рифленими валками наведені у додатку Б.

*Двовалкова зубчата дробарка* – ДДЗ (рис. 2.30) складається з рами 1, на якій встановлені у підшипниках 3 і 13 вали зубчатих валків 11.

Корпуси підшипників 3 можуть переміщуватись по спеціальних напрямних у горизонтальному напрямку. Зусилля дроблення регулюють затяжкою пружинних амортизаторів 2. Валки обертаються від електродвигуна через клинопасову передачу за допомогою шківів 7, вала 8 і шестерень 9, 10 і 12. На рамі монтується металічний корпус 4, якій закриває дробильні валки. Переміщення підшипника 3 обмежується упором 6. Валки обертаються назустріч один одному. Ряди зубів одного валка розташовані між рядами зубів другого валка, що забезпечує отримання однорідного по крупності продукту. Вихідний матеріал надходить у дробарку через завантажувальну лійку 5, захоплюється зубами валків і дро-

битися. При потраплянні у дробарку предметів, що не дробляться пружини 2 стискаються, рухомий валок відходить і пропускає цей предмет. Після проходження предмету, що не дробиться, пружини повертають валок у попередню позицію. Пружини дозволяють також регулювати відстань між валками для одержання необхідної крупності дробленого продукту.



**Рис. 2.30 – Двовалкова зубчата дробарка.**

**1 – рама; 2 – пружинні амортизатори; 3, 13 – підшипники; 4 – корпус; 5 – завантажувальна лійка; 6 – упор; 7 – шків; 8 – привідний вал; 9, 10, 12 – шестерні; 11 – зубчаті валки.**

Валок має форму багатогранника, який жорстко насаджений на вал. До граней валка за допомогою болтів кріпляться зубчаті сегменти виготовлені з марганцевистої сталі. Набір сегментів створює зубчатий валок циліндричної форми.



При крупному дробленні форма зубів дзьобоподібна з висотою зубів від 70 до 110 мм, при дрібному дробленні – списоподібна з висотою зубів близько 30 мм.

Двовалкові зубчаті дробарки працюють при ступені дроблення 4 – 6.

До основних переваг двовалкових зубчатих дробарок слід віднести: простоту конструкції, зручність ремонту і обслуговування, мале переподрібнення матеріалу, низька витрата електроенергії.

В зубчаті дробарки не допускається потрапляння випадкових металічних предметів. Для захисту дробарок від них на тракті живлення встановлюють електромагнітні залізовіддільники.

Технічні характеристики валкових дробарок із зубчатими валками наведені у додатку Б.

### 2.8.2 Технологічні характеристики валкових дробарок

До основних технологічних характеристик валкових дробарок належать: кут захоплення  $\alpha$ , окружна швидкість валків  $V$ , продуктивність  $Q$  і потужність електродвигуна  $N$ .

*Кутом захоплення* валкових дробарок називається кут між твірними до поверхні валків у точках зіткнення з грудкою матеріалу, що дробиться (рис. 2.31).

Для спрощення висновків приймаємо форму грудок матеріалу, що дробиться, сферичною або циліндричною.

На грудку від обох валків діють сили тиску  $P$  і сили тертя  $F$ , які затягують грудку у робочий простір дробарки. Грудка буде затягуватись у робочий простір між валками тільки у тому випадку, якщо буде дотримуватись умова:

$$2P \sin \frac{\alpha}{2} \leq 2F \cos \frac{\alpha}{2}.$$

У протилежному випадку грудка буде ковзати по поверхні валків і залишиться на них.

Записавши сили тертя через нормальний тиск і коефіцієнт тертя ковзання  $f$ , який є рівним тангенсу куту тертя  $\varphi$ , одержимо:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq f \quad \text{або} \quad \alpha \leq 2\varphi. \quad (2.80)$$

Даний висновок стосується тільки дробарок з гладкими валками.

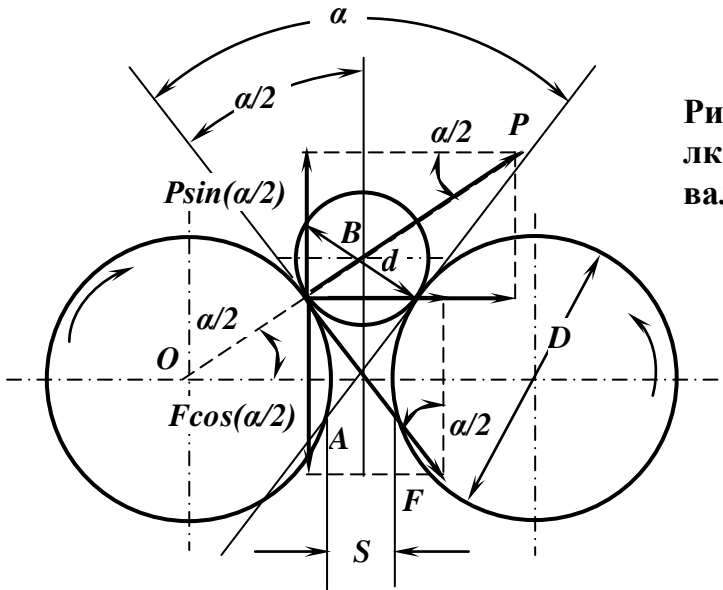


Рис. 2.31 – Кут захоплення валкових дробарок з гладкими валками.

При постійній ширині щілини  $s$  між валками кут захоплення залежить від співвідношення між діаметром валків  $D$  і розміром грудок матеріалу, що дробиться  $d$ . Співвідношення між діаметром валків і розміром грудок, при якому захоплення грудки ще можливе, визначаємо з трикутника  $OAB$ :

$$\frac{0,5D + 0,5s}{0,5D + 0,5d} = \frac{D + s}{D + d} = \cos \frac{\alpha}{2},$$

звідки визначається діаметр валка  $D$  необхідний для захоплення грудки діаметром  $d$ , при розмірі щілини  $s$ :

$$D = \frac{d \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{s}{d} \right)}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}. \quad (2.81)$$

Таким чином, кут захоплення змінюється у залежності від діаметра валка, ширини вихідної щілини і розміру грудки матеріалу, що дробиться.

Так як коефіцієнт тертя гірської породи по сталі дорівнює  $0,3$ , тобто  $\operatorname{tg} \varphi = 0,3$  і  $\varphi = 16^{\circ}42'$ , то кут захоплення  $\alpha = 33^{\circ}20'$  ( $\cos \alpha = 0,958$ ).

На збагачувальних фабриках дробарки з гладкими валками звичайно використовують при ступені дроблення  $3 - 4$ , тобто  $d : s = 4$ .

З використанням формули (2.81) і дотриманням вище зазначених умов, отримуємо  $D : d \approx 17$ .

При виборі валкових дробарок з гладкими валками вважають, що діаметр валка повинен бути у 20 разів більше діаметра максимальної грудки матеріалу, що дробиться, тому приймають:

$$D : d_{\max} = 15 \div 20. \quad (2.82)$$

Умови захоплення грудки у зубчатих дробарках інші в порівнянні з умовами захоплення у дробарках з гладкими валками, тому для них співвідношення між діаметром валків і розміром грудок приймається:

$$D : d_{\max} = 1,5 \div 3,5. \quad (2.83)$$

Для дробарок з рифленими валками співвідношення між діаметром валків і розміром грудок приймається:

$$D : d_{\max} \geq 10. \quad (2.84)$$

*Окружна швидкість гладких валків* впливає на умови захоплення грудки. При великих окружних швидкостях валків коефіцієнт тертя ковзання зменшується і умови захоплення погіршуються. Окружну швидкість приймають з урахуванням властивостей матеріалу, які впливають на значення коефіцієнта тертя (вологість, абразивність та ін.), діаметра валків, ступеня дроблення, крупності вихідного матеріалу і способу завантаження дробарки.

У валках великих діаметрів умови захоплення грудки кращі ніж у дробарках малого розміру, тому у дробарках великих розмірів допускаються більші швидкості. Залежно від діаметра валків для дробарок приймають такі окружні швидкості:

- при діаметрі валків  $D < 1000$  мм окружна швидкість  $V \leq 5$  м/с;
- при діаметрі валків  $D = 1500 \div 1800$  мм окружна швидкість  $V \leq 7,5$  м/с.

Машинобудівна промисловість випускає валкові дробарки усіх типорозмірів з малою (3 м/с), середньою (4,5 м/с) і великою (6 м/с) окружними швидкостями.

*Продуктивність* розраховують по об'єму дробленого продукту, що вивантажується з дробарки за один оберт валків:

$$V = sl\pi D, \text{ м}^3, \quad (2.85)$$

де  $s$  – ширина щілини між валками, м;  $D$  і  $l$  – діаметр і довжина валків, м.

Об'ємну продуктивність валкової дробарки отримують з використанням формули (2.85):

$$Q_o = 60\pi nslD, \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (2.86)$$

де  $n$  – частота обертання валків,  $\text{хв}^{-1}$ .

Масова продуктивність валкової дробарки:

$$Q = 60\pi nslDk\delta, \text{ т/год.}, \quad (2.87)$$

де  $k$  – коефіцієнт розпушення дробленого продукту при виході з дробарки ( $k = 0,1 - 0,3$ );  $\delta$  – густина вихідного матеріалу,  $\text{т/м}^3$ .

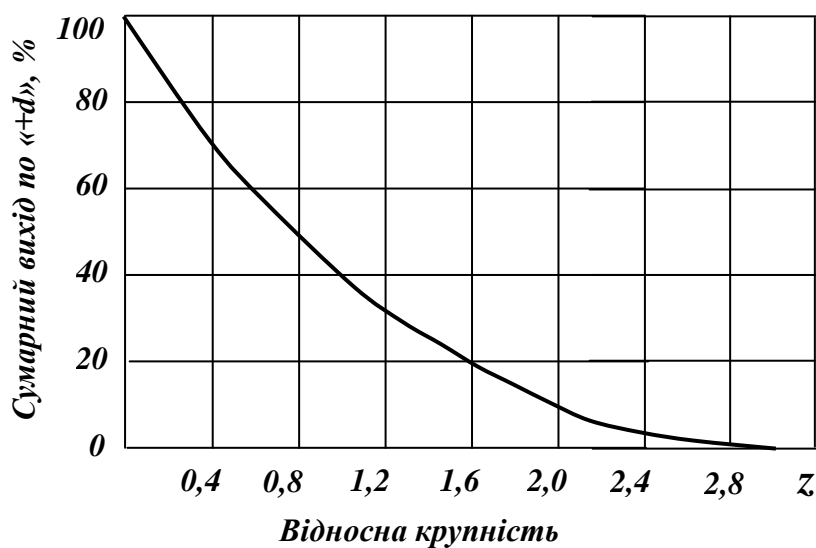
Потужність електродвигуна валкових дробарок визначається за емпіричною формулою:

$$N = 10nlD, \text{ кВт.}, \quad (2.88)$$

де  $D$  і  $l$  – діаметр і довжина валків, м;  $n$  – частота обертання валків,  $\text{хв}^{-1}$ .

Валкові дробарки з гладкими валками звичайно працюють при ступенях дроблення від 3 до 4, дробарки з зубчатими валками – при ступенях дроблення від 4 до 6.

Типова характеристика крупності продукту дроблення валкових дробарок для руд середньої міцності наведена на рис. 2.32. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен  $z$  (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по «+d».



**Рис. 2.32 – Типова характеристика крупності продуктів дроблення валкових дробарок (для руд середньої міцності).**

Формула для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту валкових дробарок наведена у табл. 2.10.

**Таблиця 2.10 – Формула для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту валкових дробарок**

| Тип руди           | Розрахункова формула  | Формула вірна  |
|--------------------|---|----------------|
| Середньої міцності | $b^{+z} = (1 - 0,55z - 0,10z^2 + 0,12z^3 - 0,02z^4) \cdot 10^2$<br>(2.89) | при $z \leq 3$ |

Валкові дробарки з гладкими валками використовують для дрібного дроблення порід середньої міцності. Валкові дробарки з зубчатими валками використовують для крупного дроблення порід малої міцності і крихких. При виборі дробарок необхідно урахувати, що тихохідні дробарки дають менше переподрібнення матеріалу ніж швидкохідні.

## 2.9 Дробарки ударної дії

У дробарках ударної дії матеріал руйнується за рахунок кінетичної енергії рухомих тіл. За будовою основного дробильного органу дробарки ударної дії підрозділяються на молоткові і роторні.

Дробарки ударної дії використовуються для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів не тільки низької і середньої, але й підвищеної міцності.

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

### 2.9.1 Конструкція і принцип дії молоткових дробарок

У молоткових дробарках матеріал дробиться в основному ударом молотків, які підвішені до ротора, що обертається у робочому просторі дробарки, обмеженому футерованим броньовими плитами корпусом. На рис. 2.33 наведені схеми основних типів молоткових дробарок.

Вихідний матеріал через завантажувальний отвір **8** надходить у робочий простір дробарки, де на горизонтальному валу **1** обертається ротор **2** з молотками **4**, закріпленими шарнірно. Молотки вдаряють по

грудках і з силою відкидають їх до стінок корпуса 5 на броньові плити 6, де грудки додроблюються. Таким чином, руйнування грудок матеріалу здійснюється ударом молотків і ударом об футеровочні плити, а також роздавлюванням і стиранням грудок молотками на колосниковій решітці 7. Дроблений продукт розвантажується униз під дробарку.

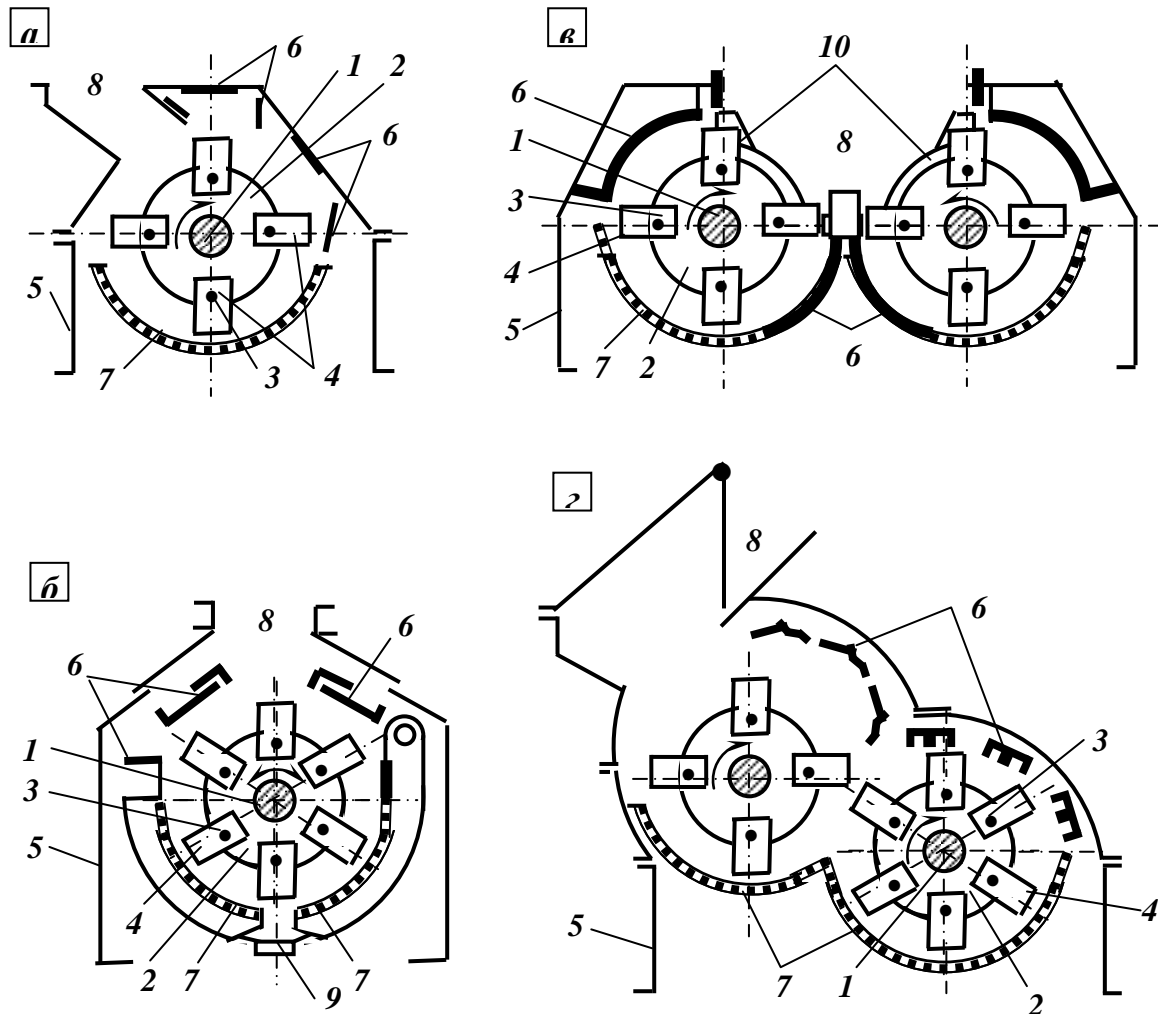


Рис. 2.33 – Схеми основних типів молоткових дробарок.

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

Двуроторні: *в* – паралельного дроблення; *г* – послідовного дроблення.

1 – горизонтальний вал; 2 – ротор; 3 – осі молотків; 4 – молотки;

5 – корпус дробарки; 6 – футеровочні плити; 7 – колосникова решітка;

8 – завантажувальна лійка; 9 – уловлююча камера; 10 – фігурні колосники.

Молоткові дробарки виготовляються з колосниковими решітками і без них. Дробарки з колосниковими решітками застосовуються в основному для дрібного дроблення, вони призначені для отримання дробленого продукту визначеної крупності. Молоткові дробарки без колосникових решіток видають дроблений продукт заданої крупності внаслідок

підвищеної швидкості обертання ротора. Дробарки для дроблення вологих глинистих матеріалів обладнані рухомою відбійною плитою, яка являє собою вбудований у дробарку пластинчатий конвеєр важкого типу. Таким чином, завдяки конвеєрній подачі в'язкого матеріалу до ротора виключається забивання дробарки.

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

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

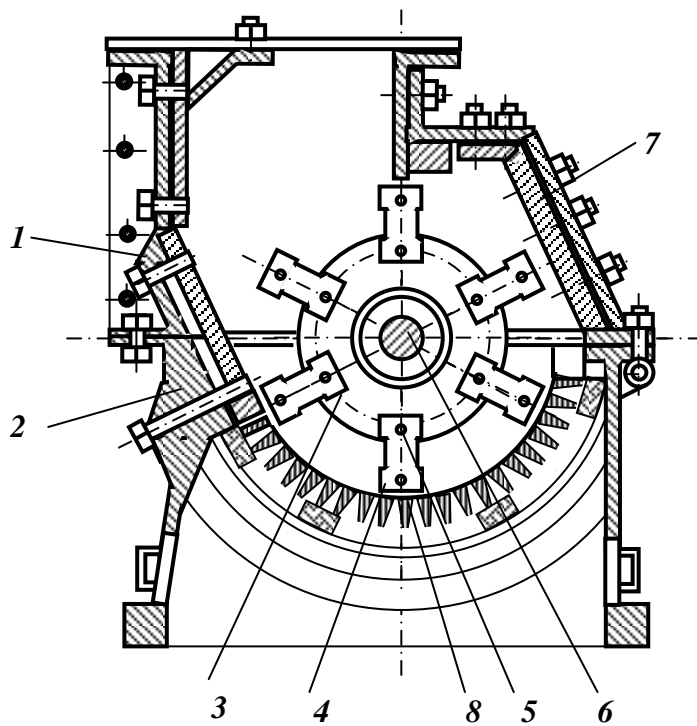
Молоткові дробарки призначені для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів низької і середньої твердості, але частіше їх застосовують для середнього і дрібного дроблення. В молоткових дробарках досягається ступінь дроблення до 30 – 40. Вони характеризуються високою продуктивністю і малою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

*Однороторна неревверсивна молоткова дробарка (рис. 2.34) типу М складається з таких основних вузлів: корпусу, ротора, відбійних плит і колосникової решітки.*

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

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

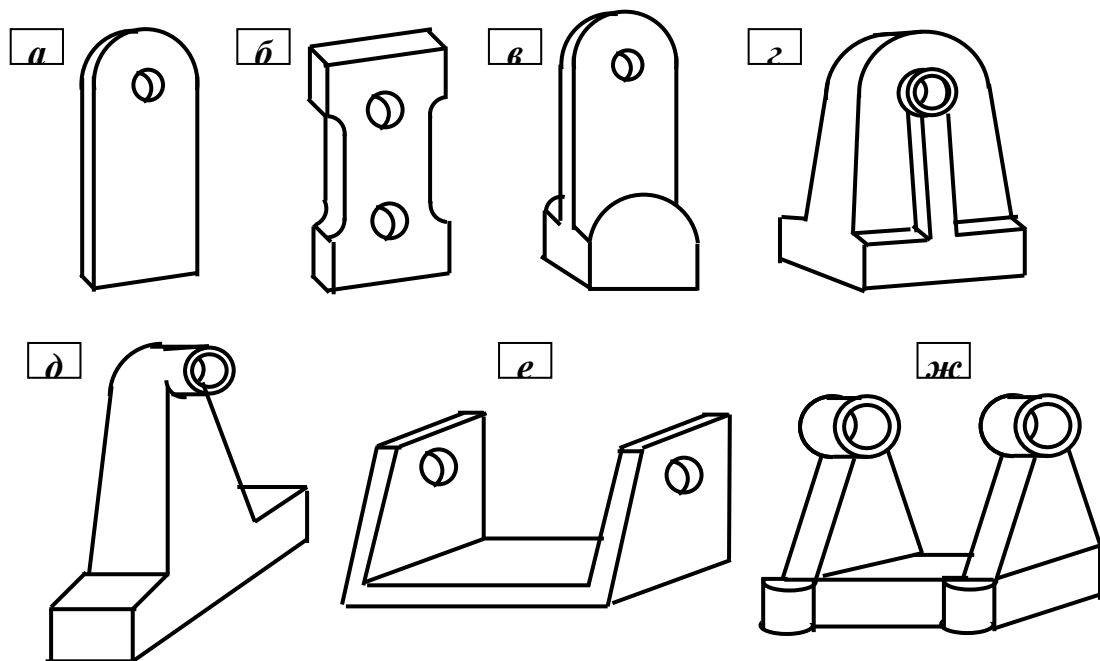
Дроблений продукт розвантажується під дробарку крізь колосникову решітку. Колосники решітки виготовляються з сталі марки 60С2 або 45Х і можуть мати різну форму, але частіше за все – трапецієвидну з розширенням щілини у бік розвантаження під кутом 10 – 20°. Вони нахилені до радіуса ротора під кутом 40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



**Рис. 2.34 – Однороторна нереверсивна молоткова дробарка.**

**1 – верхня частина корпусу; 2 – нижня частина корпусу; 3 – ротор; 4 – молотки; 5 – осьові стержні; 6 – вал; 7 – футеровочні плити; 8 – колосникова решітка.**

Залежно від властивостей матеріалу, що дробиться, і необхідної крупності дробленого продукту застосовують молотки (рис. 2.35) різної форми і маси (від 1 до 135 кг). Молотки виготовляються із зносостійких сталей.



**Рис. 2.35 – Форми молотків.**



Молотки колосникового типу (рис. 2.35 *а, б*) застосовують при дробленні малоабразивних та м'яких порід, напр., вугілля. Деякі молотки мають два отвори, щоб можна було при зносі обох кінців молотка з одного боку перевернути його другим боком. Молотки з потовщенням на робочому кінці (рис. 2.35 *в, г, д*) застосовують при дробленні міцних матеріалів середньої абразивності. Скобоподібні молотки (рис. 2.35 *е*) використовують при тих же умовах роботи, що й молотки колосникового типу. Посилена скобоподібна конструкція (рис. 2.35 *ж*) застосовується при дробленні міцних матеріалів. Молотки скобоподібної форми працюють більш ефективно ніж колосникові, але експлуатація дробарок у цьому випадку є складнішою, тому що при їхньому нерівномірному зносі порушується зрівноваженість дробарки.

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

*Однороторна реверсивна молоткова дробарка* (рис. 2.33 *б*) типу ДМРЕ складається зі зварного корпусу **5**, ротора **2** і колосникової решітки **7**. Передбачена можливість регулювання положення колосникової решітки за допомогою спеціального механізму.

Вал ротора **1** обпирається на підшипники закріплені на станині дробарки. Обертання вал ротора отримує від електродвигуна, з яким він з'єднується муфтою. На валу **1** нерухомо закріплені диски ротора **2**, крізь отвори **2** яких пропущені стержні із вільно надітими на них молотками **4**.

Вихідний матеріал через завантажувальний отвір **8** надходить у робочий простір дробарки, де у результаті багаторазових ударів молотків **4** і ударів об футеровочні броньовані плити **6** відбувається дроблення матеріалу. Остаточне дроблення матеріалу роздавлюванням і стиранням здійснюється у кільцевому зазорі між колосниковою решіткою **8** і кінцями молотків **4**.

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

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

Центральне розташування завантажувального отвору **8** дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання молотків без роз-

бирання дробарки для їхнього повороту. Тобто знос молотків у дробарках цього типу рівномірний з двох сторін.

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

*Молоткова двороторна дробарка з паралельним розташуванням роторів* (рис. 2.33 в) та обертанням роторів назустріч один одному. Вихідний матеріал подається у завантажувальну лійку 8, яка створена торцевими стінками корпусу 5 дробарки і фігурними колосниками 10. При обертанні роторів 2 вільно підвішені молотки 4 проходять у зазори між фігурними колосниками 10 і дроблять грудки матеріалу. Дроблений продукт падає на решітки під роторами, де він дробиться остаточно і розвантажується під дробарку. Вал 1 кожного ротора обертається через клинопасову передачу від окремого електродвигуна. Привідні шківни обважені і служать також, як маховики. Додатково на вільних кінцях валів роторів також насажені маховики для вирівнювання ходу дробарки.

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

*Молоткова двороторна дробарка з послідовним розташуванням роторів* (рис. 2.33 г) складається із зварного корпусу 5, роторів 2 і колосникових решіток 7, що розташовані під роторами. Верхній і нижній ротори з молотками 4 обертаються в одному напрямку. Над кожним ротором розміщені відбійні плити 6, які переміщують при регулюванні дробарки. Привод обох роторів здійснюється через клинопасову передачу від одного електродвигуна. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно із завантажувальної лійки 8, наносяться удари молотками верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов потрапляють під удари молотків верхнього або нижнього ротора. Нижній ротор ударяє по грудках, відкидає їх на свої відбійні плити і проштовхує матеріал на нижню колосникову решітку. Зона між двома роторами є місцем найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь щілини колосникових решіток. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між молотками і відбійними плитами, а також між молотками і колосниковими решітками.

Технічні характеристики молоткових дробарок типів М і ДМРЕ наведені у додатку Б.

*Однороторна нереверсивна молоткова дробарка* (рис. 2.36) типу СМД-135 складається з таких основних вузлів: корпусу 1 з кришкою,

ротора 2 з шарнірно підвішеними кільцевими молотками 3, приймальної камери, заслінки 4, пастки 5 для предметів, що не дробляться, і колосникової решітки 6.

Вихідний матеріал завантажується через люк приймальної камери і захоплюється ротором до колосникової решітки. Руйнування матеріалу здійснюється ударами молотків, а також при ударі об броньові плити або зрізуванням між елементами колосникової решітки і молотками. При потраплянні предметів, що не дробляться, вони викидаються у приймальну камеру, відбиваються від її верхньої частини, відхиляють заслінку і надходять у пастку.

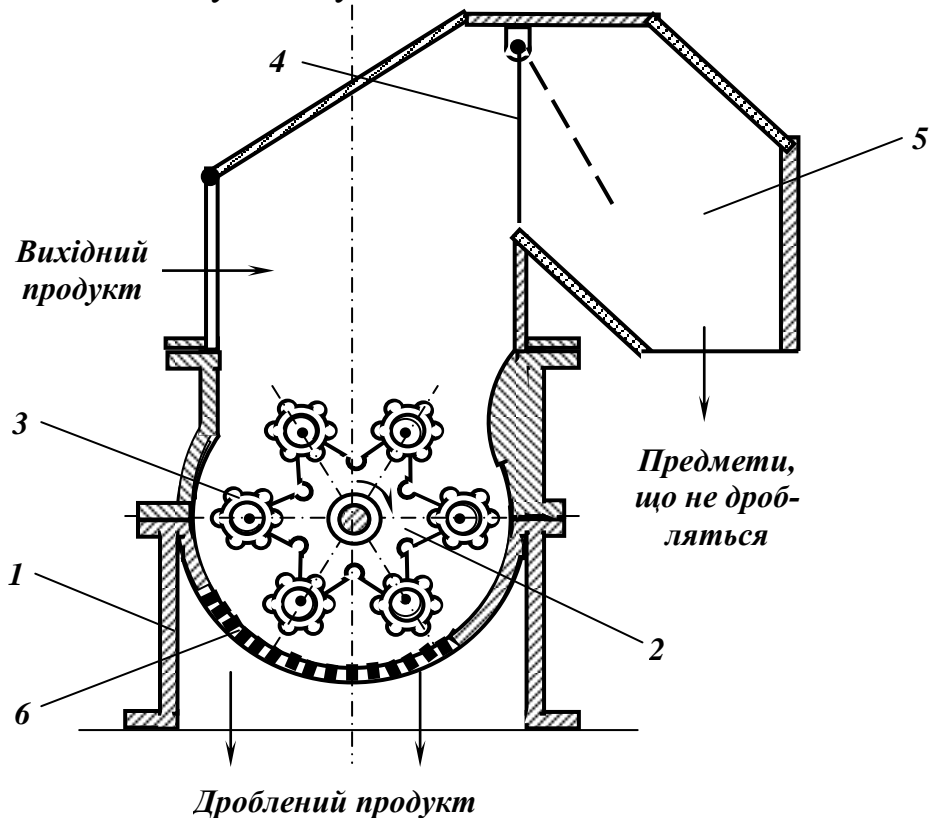


Рис. 2.36 – Схема молоткової дробарки СМД-135.

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

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

## 2.9.2 Конструкція і принцип дії роторних дробарок

У роторних дробарках матеріал дробиться ударом бил, які жорстко закріплені на роторі, що обертається у робочому просторі дробарки, об-

меженому футерованим броньовими плитами корпусом. На рис. 2.37 наведені схеми основних типів роторних дробарок.

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

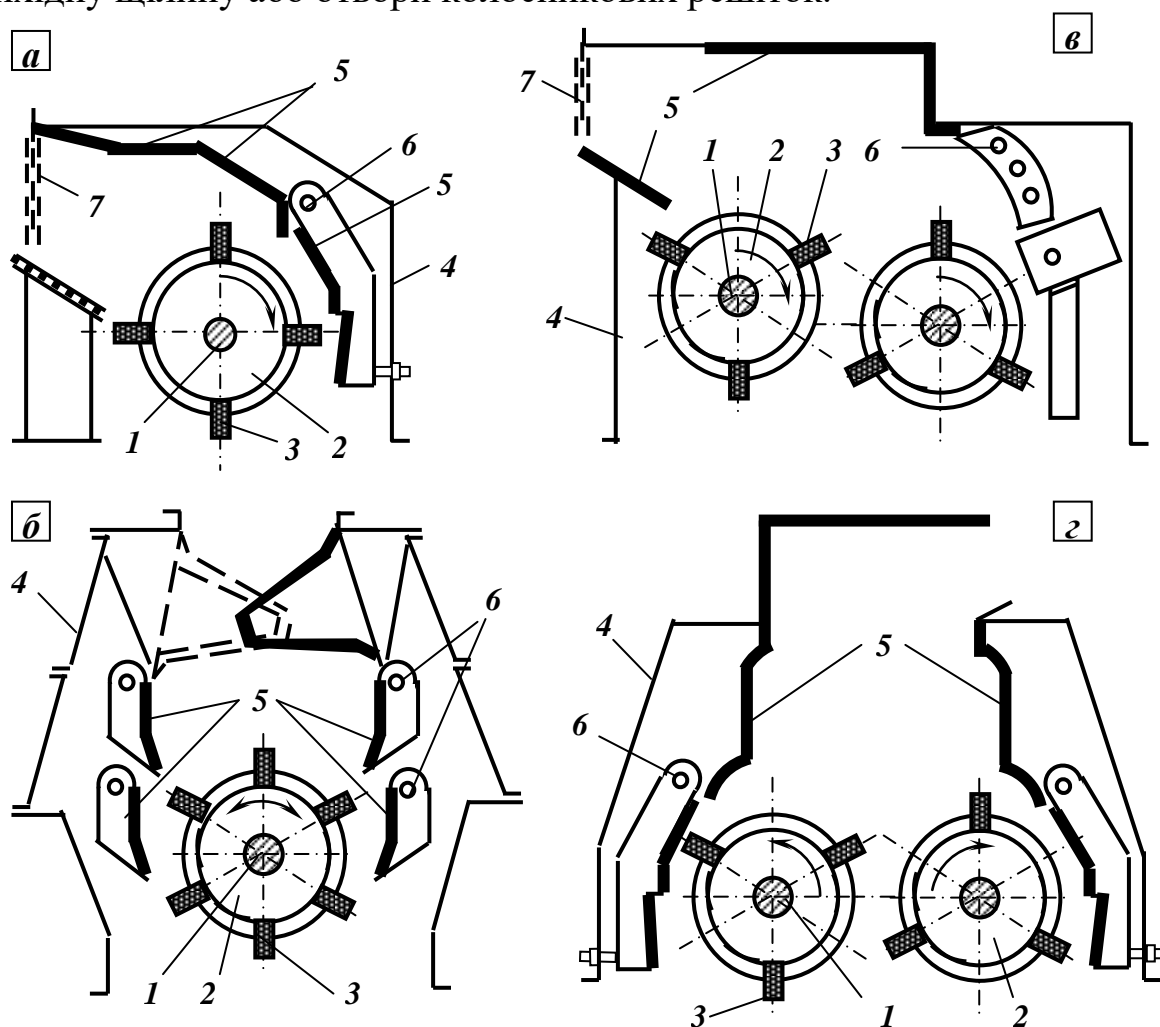


Рис. 2.37 – Схеми основних типів роторних дробарок.

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

Двороторні: *в* – послідовного дроблення; *г* – паралельного дроблення.

1 – горизонтальний вал; 2 – масивний ротор; 3 – била; 4 – корпус дробарки; 5 – відбійні плити 6 – осі підвісу відбійних плит; 7 – ланцюгові штори.

Роторні дробарки бувають одно- і двороторні з послідовним дробленням матеріалу кожним ротором або з одночасним дробленням двома

роторами, з колосниковою решіткою і без неї. Однороторні дробарки розрізняють на реверсивні і неревверсивні. Характерною особливістю роторних дробарок є те, що в ударі по грудках вихідного матеріалу бере участь масивний ротор, тому удари значно міцніші ніж у молоткових дробарках. Це дозволяє застосовувати роторні дробарки у першій стадії дроблення (дробарки типу ДРК) для руйнування порівняно твердих гірських порід. Роторні дробарки застосовують також для середнього та дрібного дроблення (дробарки типу ДРС). Конструкції дробарок ДРК і ДРС аналогічні.

У однороторну неревверсивну дробарку (рис. 2.37 а, 2.38) типу ДРК матеріал подається на обертовий масивний ротор 4 і дробиться ударами бил 5 і об відбійні плити 7. Відбійні плити 7 на верхній частині корпуса 2 закріплені нежорстко, тому при потраплянні предметів, що не дробляться, вони відхиляються на осях і пропускають їх.

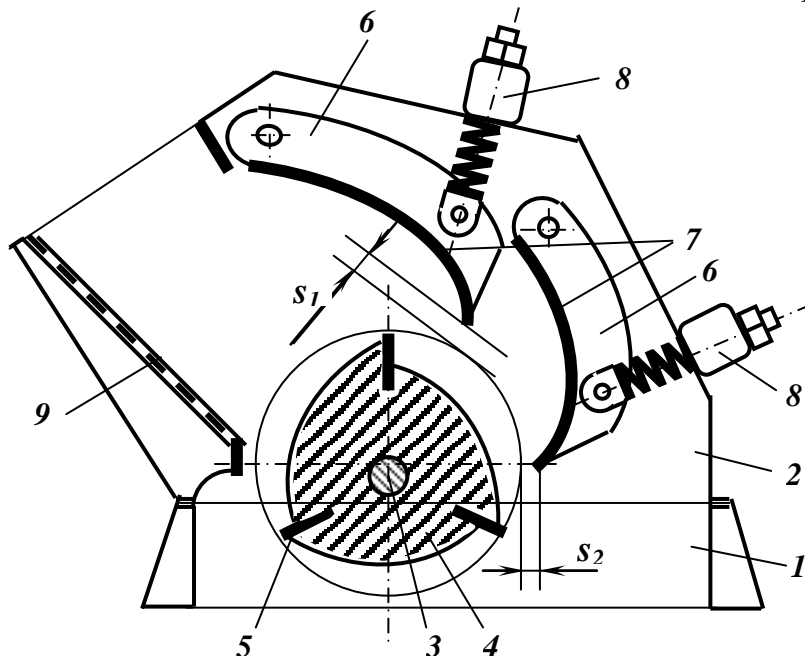


Рис. 2.38 – Однороторна дробарка крупного дроблення.

1 – основа корпуса; 2 – верхня частина корпуса; 3 – вал; 4 – ротор; 5 – била; 6 – відбійні плити; 7 – футеровочні плити; 8 – регулювальний пристрій; 9 – решітка.

У первісне положення відбійні плити повертаються під дією пружин регулювального пристрою 8. Дробарки типу ДРК мають дві відбійні плити, а дробарки типу ДРС – три відбійні плити, які ділять робочу зону дробарки відповідно на дві або три камери дроблення. Відбійні плити мають криволінійний профіль і повністю або тільки у нижній частині закриті футеровальними плити 7. Зазори між обертальним ротором і нижньою кромкою відбійних плит є розвантажувальним отво-

ром камери дроблення. Положення відбійних плит фіксується тягами і пружинами регулювального пристрою 8. Регулювання ширини розвантажувальної щілини камери дроблення здійснюється також за допомогою регулювального пристрою 8.

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

*Однороторна реверсивна дробарка* (рис. 2.37 б) завдяки центральному розташуванню завантажувального отвору дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання бил, що забезпечує їх рівномірний знос.

*Двоторна дробарка з послідовним розташуванням роторів* (рис. 2.37 в) складається із зварного корпусу 4, усередині якого розташовані два ротори 2, що обертаються в одному напрямку. Привод роторів здійснюється через клиноремінну передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно, наносяться удари билами верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил верхнього або нижнього ротора. Зазор між двома роторами є областю найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

*Двоторна дробарка з паралельним розташуванням роторів* (рис. 2.37 г) складається із зварного корпусу 4, усередині якого розташовані два ротора 2, що обертаються у протилежних напрямках. Над кожним ротором розміщені відбійні плити 5, які переміщують при регулюванні дробарки. Привод обох роторів здійснюється через клинопасову передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно наносяться удари билами роторів. Грудки частково розколюються, відкидаються кожним ротором на відбійні плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини

дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

Двуроторні дробарки в порівнянні з однороторними менш піддані забиванню і звичайно застосовуються для дроблення більш вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, вони також дозволяють завантажувати матеріал більшої крупності. Ширину щілини колосникових решіток і відстань між ними та кінцем бил (молотків) вибирають залежно від необхідної крупності дробленого продукту і вологості матеріалу, що дробиться. При дробленні глинистих вологих руд, щоб уникнути забивання колосникових решіток, відстань між колосниками збільшують. У важких випадках дробарки працюють без колосникових решіток.

Без колосникових решіток продуктивність дробарки підвищується, але при цьому в дробленому продукті з'являються зерна крупніші допустимих розмірів.

Технічні характеристики роторних дробарок типів ДРК і ДРС наведені у додатку Б.

### 2.9.3 Технологічні характеристики дробарок ударної дії

До основних технологічних характеристик молоткових і роторних дробарок належать: глибина проникнення грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора  $h$ , розміри ротора (довжина  $L$  і діаметр  $D$ ), продуктивність  $Q$  і потужність електродвигуна  $N$ .

*Глибина проникнення* грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора  $h$  впливає на гранулометричний склад дробленого продукту, продуктивність дробарки, витрату електроенергії при дробленні і знос молотків та бил.

Залежно від глибини проникнення грудка піддається ковзному або центральному удару (рис. 2.39).

При ковзних ударах відбувається обколювання і стирання грудок по місцю удару. У цьому випадку дроблений продукт містить велику кількість дріб'язку, ударні деталі (молотки або била) швидко зношуються, продуктивність дробарки знижується. Проникнення грудки у зону обертального ротора на глибину не менше 0,6 максимального розміру грудки при дробленні у молоткових дробарках або на глибину рівну висоті била при дробленні у роторних дробарках забезпечують руйнування грудки центральним ударом.

Дроблення здійснюється в усьому об'ємі грудки при мінімальному стиранні матеріалу, що дробиться, а також зносі ударних деталей. Вміст тонких класів у дробленому продукті менше, а продуктивність дробарки вища ніж при дробленні ковзними ударами.

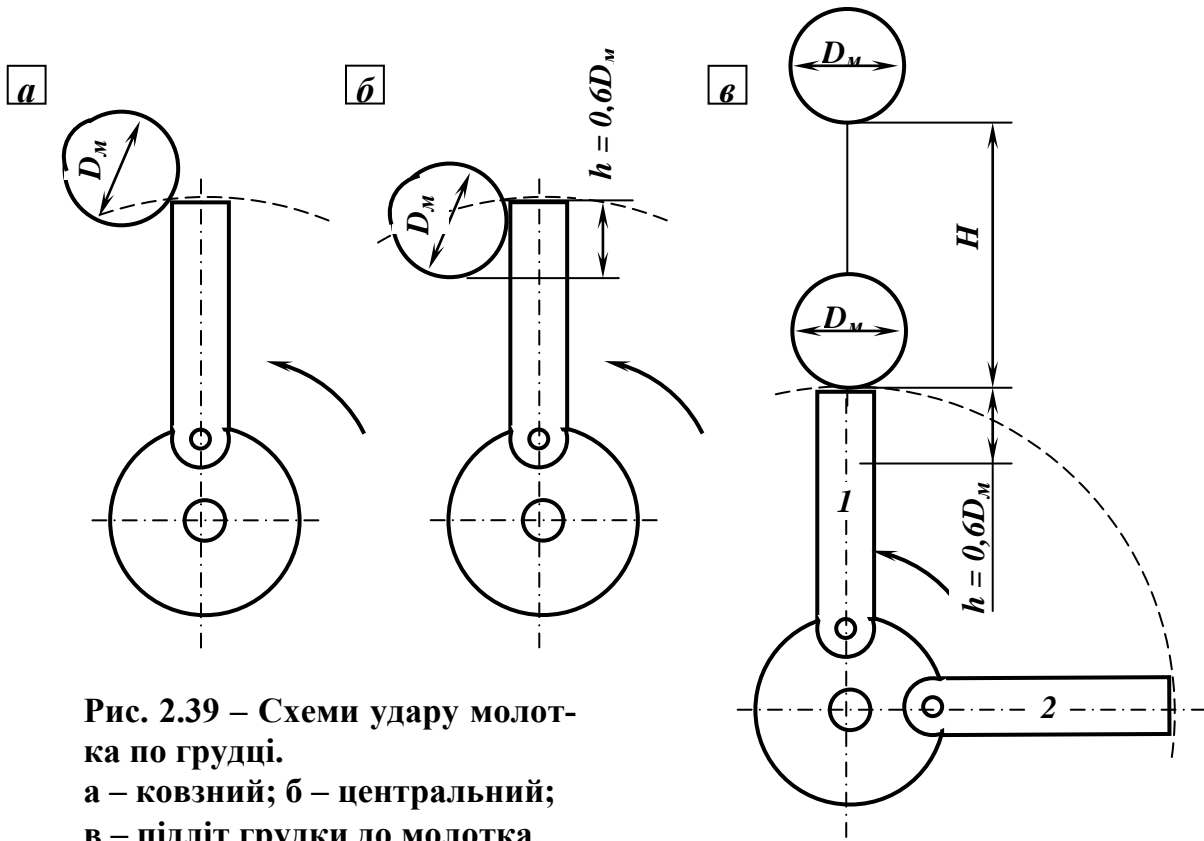


Рис. 2.39 – Схеми удару молотка по грудці.  
 а – ковзний; б – центральний;  
 в – підліт грудки до молотка.

Необхідна глибина проникнення грудки у зону обертання ротора забезпечується швидкістю падіння матеріалу при завантаженні його у дробарку. Для того щоб проникнути у зону обертання ротора (рис. 2.35 в) на глибину  $h = 0,6D_{\max}$ , грудка максимального розміру  $D_{\max}$ , яка підлетіла до молотка **1**, що обертається, повинна за час  $t$  (час приближення до грудки молотка **2**, що набігає) при падінні з висоти  $H$  набути швидкості  $V_{sp}$ :

$$V_{sp} = h/t = 0,6D_{\max}/t. \quad (2.90)$$

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

$$t = 60/(nz), \quad (2.91)$$

де  $n$  – частота обертання ротора,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $z$  – число подовжніх рядів молотків на роторі, тоді

$$V_{sp} = 0,6D_{\max}nz/60 = 0,01D_{\max}nz. \quad (2.92)$$

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



$$V_{zp} = \sqrt{2gH} . \quad (2.93)$$

З використанням формул (2.92) і (2.93) отримуємо рівняння для визначення висоти  $H$  необхідної для потрапляння грудки під центральний удар:

$$H = V_{zp}^2 / 2g = (Dnz)^2 \cdot 10^{-4} / 2g \approx 0,5 \cdot 10^{-5} (Dnz)^2 , \text{ м.} \quad (2.94)$$

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

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

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

- для молоткових дробарок:

$$D_p = (3,2 \div 4)D_{\max} . \quad (2.94)$$

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

- для роторних дробарок крупного дроблення:

$$D_p = (1,7 \div 2)D_{\max} . \quad (2.96)$$

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

$$D_p = 3,3D_{\max} . \quad (2.97)$$

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

- для молоткових дробарок:

$$L = (0,7 \div 1,5)D_p ; \quad (2.98)$$

- для роторних дробарок крупного дроблення:

$$L = 0,8D_p ; \quad (2.82)$$

– для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$L = D_p. \quad (2.99)$$

*Продуктивність* молоткових і роторних дробарок залежить від їхніх конструктивних і механічних параметрів (діаметра, довжини і частоти обертання ротора; кількості, маси і числа молотків; розташування і форми відбійних плит; способу завантаження і глибини проникнення грудок у зону ротора). Продуктивність також залежить від фізичних властивостей матеріалу, що дробиться (міцності, вмісту глинистих речовин, вологи, крупності вихідного і дробленого продуктів). Між продуктивністю дробарки, подрібнюваністю вихідного матеріалу, ступенем дроблення і потужністю електродвигуна існує взаємозв'язок. При постійних умовах дроблення з підвищенням продуктивності знижується ступінь дроблення і навпаки. Теоретична формула для розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок відсутня. Для орієнтованого розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок застосовують різні емпіричні формули.

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

– молоткових дробарок:

$$\text{при } D_p > L \quad Q_o = 0,1D_p^2Ln, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2.100)$$

$$\text{при } D_p < L \quad Q_o = 0,1D_pL^2n, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2.101)$$

– роторних дробарок:

$$Q_o^{\max} = 47k(D_pL)^{1,6}, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2.102)$$

$$Q_o^{\min} = 22k(D_pL)^{1,3}, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2.103)$$

де  $n$  – частота обертання ротора,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $Q_o^{\max}$  і  $Q_o^{\min}$  – граничні значення продуктивності,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $k$  – коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей дробарки ( $k = 0,6 \div 1,4$ );  $D_p$  і  $L$  – розміри ротора, м.

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

*Потужність електродвигуна* молоткових і роторних дробарок визначається за емпіричними формулами:

– молоткових дробарок:

$$N = 0,125D_p Ln, \text{ кВт}; \quad (2.104)$$

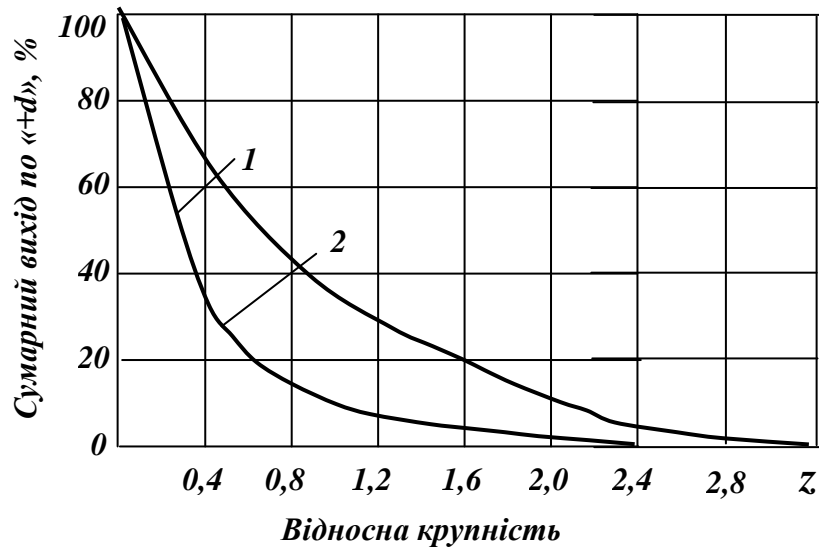
$$N = 0,15D_p^2 Ln, \text{ кВт}; \quad (2.105)$$

– роторних дробарок:

$$\text{крупного дроблення} \quad N = 80D_p L, \text{ кВт}; \quad (2.106)$$

$$\text{середнього і дрібного дроблення} \quad N = 120D_p L, \text{ кВт}. \quad (2.107)$$

Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок для руд середньої міцності наведені на рис. 2.40. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен  $z$  (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по «+ $d$ ».



**Рис. 2.40** – Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок (для руд середньої міцності).

**1** – дроблений продукт роторної дробарки;

**2** – дроблений продукт молоткової дробарки.

Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок наведені у табл. 2.11.

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

Ширину щілини між колосниками і відстань між решіткою і кінцями молотків вибирають у залежності від необхідної крупності дробленого продукту і вологості вихідного матеріалу. Ширина щілини між колосниками повинна бути у 5 – 6 разів більше розміру зерен дроблено-

го продукту при дробленні до 6 мм і у 1,5 – 2 рази при дробленні до 50 мм. При дробленні вологих матеріалів з глинистими домішками відстань між колосниками збільшують або працюють без них.

**Таблиця 2.11 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок**

| Тип руди                                     | Розрахункова формула   | Формула вірна    |
|--|--|------------------|
| <b>Дроблений продукт молоткових дробарок</b> |  |                  |
| Середньої міцності                           | $b^{+z} = (1 - 1,93z + 1,88z^2 - 0,88z^3 + 0,15z^4) \cdot 10^2$<br>(2.108) | при $z \leq 2,4$ |
| <b>Дроблений продукт роторних дробарок</b>   |  |                  |
| Середньої міцності                           | $b^{+z} = (1 - 1,02z + 0,44z^2 - 0,10z^3 + 0,01z^4) \cdot 10^2$<br>(2.109) | при $z \leq 3,0$ |

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

### 3. ПОДРІБНЕННЯ

#### 3.1 Процес подрібнення

##### 3.1.1 Властивості гірських порід, що впливають на процес подрібнення

Дроблення тільки у окремих рідких випадках буває достатнім для розділення корисної копалини на остаточні продукти. При тонкому вкрапленні корисних мінералів руду необхідно подрібнювати до розмірів зерен корисного компонента. Мінералогічний склад руди і її фізичні властивості вирішально впливають на продуктивність і ефективність процесу подрібнення. Найбільш суттєвими з фізичних властивостей гірських порід у процесі подрібнення є подрібнюваність і абразивність.

Найбільше поширений показник розкриття вкрапленої сировини – *крупність подрібнення*. Крупність подрібнення характеризується вмістом заданого класу крупності або питомою поверхнею подрібненого матеріалу. Ступінь розкриття за цими параметрами для кожного способу визначають за допомогою експериментальних графічних залежностей. Властивості мінеральної сировини при подрібненні враховуються питомою продуктивністю дробильно-подрібнювального обладнання.

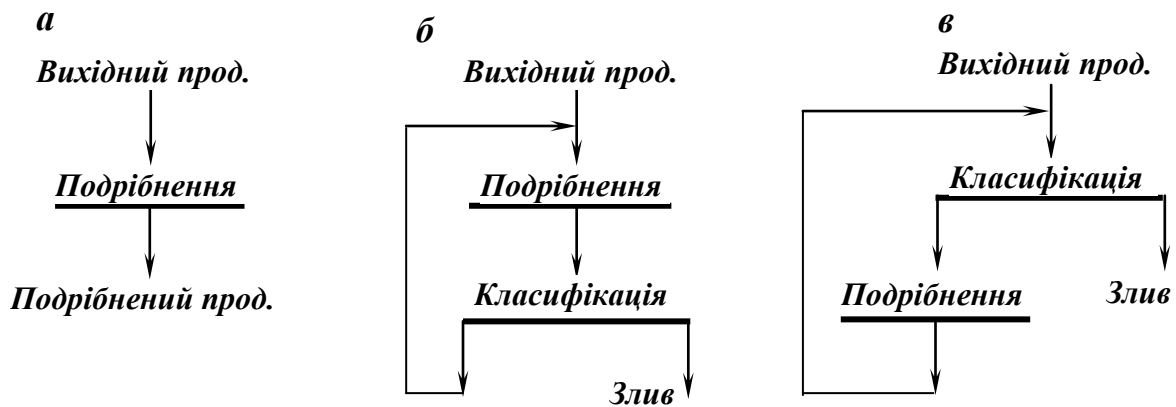
*Подрібнюваність* – параметр, що характеризує здатність мінеральної сировини до руйнування у стержневих, кульових, струминних млинах, млинах самоподрібнення, дезінтеграторах тощо. Цей параметр призначений для визначення продуктивності млинів промислових типів. Подрібнюваність визначають при технологічній оцінці сировини, а також при розробці і проектуванні технології для нових промислових об'єктів.

Сутність методу визначення подрібнюваності полягає у порівнянні питомої продуктивності лабораторного млина при подрібненні досліджуваної та еталонної сировини до заданої крупності з наступним переходом до показників роботи промислових млинів. Як аналогову застосовують однотипну з досліджуваною сировину, що перероблюється діючою фабрикою за схемою подрібнення близькою до прийнятої для дослідження.

Визначення подрібнюваності та розрахунок необхідних об'ємів подрібнювального обладнання проводять по трьох найбільш поширених у промисловості схемах подрібнення (рис. 3.1).

*Дослідження подрібнюваності* проводять на пробах крупністю – 3 (5) мм. Відібрані наважки досліджуваного та еталонного матеріалу под-

рібнюють у млині в умовах відкритого циклу протягом 5, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 хв. Після подрібнення кожної наважки протягом одного із вказаних проміжків часу млин зупиняють та розвантажують. Подрібнений матеріал після повного відстоювання та відсифонення проясненого зливу (у випадку мокрого подрібнення) сушать при температурі  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  до постійної маси.



**Рис. 3.1 – Схеми подрібнення.**  
*a* – відкрита; *б, в* – замкнені.

Від висушеного матеріалу методом квадратування або жолобчастими дільниками відбирають пробу для ситового аналізу. Маса наважки залежить від максимального розміру частинок (табл. 3.1).

**Таблиця 3.1 – Мінімальна маса наважки**

|                                  |     |     |       |
|----------------------------------|-----|-----|-------|
| Максимальний розмір частинок, мм | 3   | 0,5 | < 0,3 |
| Мінімальна маса наважки, кг      | 0,3 | 0,1 | 0,05  |

Для просіювання проб використовують ситовий аналізатор з набором контрольних сит з розмірами чарунок 3; 0,5; 0,074 (0,071); 0,044 (0,05) мм. Дослідження обмежують проміжком часу, при якому вміст класу – 0,044 (0,05) мм у подрібненому матеріалі досягає 95 % . Дані ситового аналізу досліджуваного та еталонного матеріалу використовують для побудови графічної залежності виходу класу крупності, що контролюється, від тривалості подрібнення. Результати подрібнення проб досліджуваного і еталонного матеріалу є основою для визначення питомої продуктивності млинів та подрібнюваності досліджуваного матеріалу.

Для характеристики подрібнюваності використовують загальну  $g$  та  $q$  дійсну питому продуктивність млинів, що одержана на досліджуваному і еталонному матеріалі і являє собою масу новоутвореного класу крупності в одиниці об'єму млина за одиницю часу при звичайному по-

дрібненні і при умові виводу готового класу з млина по мірі його утворення.

Загальна питома продуктивність визначається за формулою:

$$g = [Q(b - a)] / V, \text{ т/(год} \cdot \text{м}^3); \quad (3.1)$$

$$g = [M(b - a)] / Vt, \text{ т/(год} \cdot \text{м}^3), \quad (3.2)$$

де  $Q$  – продуктивність млина, т/год;  $b$  і  $a$  – масова частина розрахункового класу крупності відповідно у подрібненому і вихідному матеріалі, частки од.;  $V$  – об’єм млина, м<sup>3</sup>;  $M$  – маса подрібненого матеріалу, т;  $t$  – тривалість подрібнення, год.

Дійсна питома продуктивність є параметром рівняння кінетики подрібнення:

$$R = R_0 \exp[qVt / M], \quad (3.3)$$

де  $R$  – масова частка надрешітного класу крупності у продукті, що у даний момент знаходиться у млині ( $R = 1 - b$ ), частки од.;  $R_0$  – масова частка надрешітного класу крупності у вихідному матеріалі ( $R_0 = 1 - a$ ), частки од.;  $q$  – дійсна питома продуктивність, т/(год·м<sup>3</sup>).

Між загальною та дійсною питоною продуктивністю існує така залежність:

$$g = qR. \quad (3.4)$$

Значення  $R$  при проходженні матеріалу від завантаження до розвантаження змінюються від 1 до 0. Залежно від схеми подрібнення дійсна питома продуктивність визначається за формулами:

– відкритий цикл (рис. 3.1 а):

$$q = \frac{Q}{V} \cdot \ln \frac{R_0}{R}; \quad (3.5)$$

– замкнений цикл (рис. 3.1 б):

$$q = \frac{Q(1 + C)}{V} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\varepsilon(R_0 - R)}{\varepsilon(1 + C) - b} \right]; \quad (3.6)$$

– замкнений цикл (рис. 3.1 в):

$$q = \frac{CQ}{V} \cdot \ln \left[ \frac{\varepsilon C - b(1 - \varepsilon)}{\varepsilon C - b(1 - \varepsilon a)} \right], \quad (3.7)$$

де  $C$  – циркуляційне навантаження, частки од.;  $\varepsilon$  – вилучення готового класу у злив класифікатору, частки од.:

$$\varepsilon = \frac{[1 + E(1 + C)] \pm \sqrt{[1 + E(1 + C)]^2 - 4(1 + C)Eb}}{2(1 + C)}, \quad (3.8)$$

де  $E$  – ефективність класифікації, частки од.

На основі значень загальної та дійсної питомої продуктивності лабораторного млина визначають коефіцієнти подрібненості.

*Коефіцієнт відносної подрібненості* являє собою співвідношення загальної (або дійсної) питомої продуктивності лабораторного млина по новому утвореному класу крупності при подрібненні досліджуваного і еталонного матеріалу:

$$K_g^{\text{досл}} = g_{\text{лаб}}^{\text{досл}} / g_{\text{лаб}}^{\text{ет}} \quad \text{або} \quad K_q^{\text{досл}} = q_{\text{лаб}}^{\text{досл}} / q_{\text{лаб}}^{\text{ет}}, \quad (3.9)$$

де  $g_{\text{лаб}}^{\text{досл}}$ ,  $g_{\text{лаб}}^{\text{ет}}$  – загальна питома продуктивність лабораторного млина по новоутвореному класу крупності при подрібненні досліджуваного і еталонного матеріалу, відповідно;  $q_{\text{лаб}}^{\text{досл}}$ ,  $q_{\text{лаб}}^{\text{ет}}$  – дійсна питома продуктивність лабораторного млина по знов утвореному класу крупності при подрібненні досліджуваного і еталонного матеріалу, відповідно.

При цьому вміст розрахункового класу крупності у подрібненому матеріалі повинен бути однаковим для досліджуваного та еталонного матеріалу. Коефіцієнт подрібнюваності для однієї стадії подрібнення приймається постійним. Для визначення подрібненості необхідні такі дані про роботу млинів на еталонному матеріалі: продуктивність млинів; крупність вихідного та подрібненого матеріалу; об'єм млинів; величина циркуляційного навантаження; ефективність класифікації; тип схеми подрібнення.

При наявності експериментальної залежності загальної питомої продуктивності промислового млина на еталонному матеріалі, що характеризує крупність подрібненого продукту в усьому інтервалі вмісту (0 – 100 %) розрахункового класу, визначення питомої продуктивності



промислового млина на досліджуваному матеріалі зводиться до простого перерахунку лабораторних та промислових даних за формулою:

$$g_{пром}^{досл} = K_g^{досл} g_{пром}^{ет}, \quad (3.10)$$

де  $g_{пром}^{досл}$ ,  $g_{пром}^{ет}$  – загальна питома продуктивність промислового млина при подрібненні досліджуваного і еталонного матеріалу до однакової масової частки заданого класу крупності, т/(год·м<sup>3</sup>).

Дійсну питому продуктивність промислового млина при подрібненні досліджуваного матеріалу визначають відповідно з формулами (3.5) – (3.7) та з урахуванням:

$$q_{пром}^{досл} = K_q^{досл} q_{пром}^{ет}, \quad (3.11)$$

де  $q_{пром}^{досл}$ ,  $q_{пром}^{ет}$  – дійсна питома продуктивність промислового млина при подрібненні досліджуваного і еталонного матеріалу до однакової масової частки заданого класу крупності, т/(год·м<sup>3</sup>).

Необхідний об'єм промислових млинів для подрібнення за схемами, що наведені на рис 3.1, розраховують за формулами:

– відкритий цикл (рис. 3.1 а):

$$V = [Q_{пром}^{досл} (b - a)] / g_{пром}^{досл}, \text{ м}^3; \quad (3.12)$$

$$V = \left[ Q_{пром}^{досл} \cdot \ln \frac{(1-a)}{(1-b)} \right] / q_{пром}^{досл}, \text{ м}^3; \quad (3.13)$$

– замкнений цикл (рис. 3.1 б):

$$V = \frac{Q_{пром}^{досл} \cdot (1+C)}{q_{пром}^{досл}} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\varepsilon(b-a)}{\varepsilon(1+C) - b} \right], \text{ м}^3; \quad (3.14)$$

– замкнений цикл (рис. 3.1 в):

$$V = \frac{C Q_{пром}^{досл}}{q_{пром}^{досл}} \cdot \ln \left[ \frac{\varepsilon C - b(1-\varepsilon)}{\varepsilon C - (b - \varepsilon a)} \right], \text{ м}^3. \quad (3.15)$$

Таким чином, основою для визначення параметрів млинів є результати подрібнення досліджуваного та еталонного матеріалів, які оформлюють у вигляді таблиць і графіків. Графічну залежність нормують нанесенням кривих за допомогою лекал по експериментальних точках. Одержані результати вважаються достовірними, якщо абсолютні відхилення кривих від експериментальних точок складають по масовій частці готового класу у подрібненому матеріалі не більше 2 % в інтервалі 0 – 90 % та 1 % в інтервалі 90 – 100 %. При більших відхиленнях експериментальні дослідження повторюють.

Усі гірські породи абразивні і в процесі переробки зношують метал. Зношуються футеровки дробильних поверхонь дробарок, молотки і біла ударних дробарок, кулі, стержні і футеровка барабанних млинів, транспортних жолобів, робочі поверхні грохотів та ін. Зношування металу гірською породою визначається її фізико-механічною властивістю – абразивністю.

*Абразивність* – здатність гірських порід зношувати тверді тіла, які контактують з ними (деталі машин, інструменти і т.п.). Абразивність в основному визначається міцністю, розмірами і формою мінеральних зерен, що складають гірську породу.

Абразивність оцінюють за ступенем зносу штифтів, стержнів, металевих кілець, які труться об поверхню порід при свердленні або різанні, а також за ступенем стирання порід абразивними матеріалами. Абразивність звичайно оцінюють за зносом матеріалів, що контактують з мінеральною сировиною при відносному русі.

Знос характеризує зміну геометричної форми при стиранні робочих поверхонь. Особливо суттєво на знос впливає швидкість відносного руху контактуючої поверхні та сипкого матеріалу. Знос у значній мірі залежить від напрямку вектора швидкості руху сипкого матеріалу відносно поверхні. Абразивність гірських порід обумовлюється в основному двома їх властивостями – границею міцності на стиснення окремих мінеральних зерен ( $\sigma_{cm}$ ) та коефіцієнтом крихкості ( $k_{кр}$ ). Тому коефіцієнт абразивності визначають за формулою:

$$k_a = \sigma_{cm} \cdot k_{кр}. \quad (3.16)$$

Крім того, застосовують емпіричні методи оцінки абразивності. За методикою Л.І.Барона і А.В.Кузнецова, показник абразивності гірських порід визначають як сумарну втрату маси (в мг) стандартного стержня, що обертається (з частотою 400 хв<sup>-1</sup>), притиснутого до породи, при осьовому навантаженні 150 Н за час випробування 10 хв. Абразивність гірських порід поділяють на вісім класів. Показник абразивності складає

для мармуру 400-500 мг, для вапняку – 800-900 мг, для граніту – 1000-2000 мг, для кварциту – 2100-2500 мг.

Для малоабразивних порід, напр., вугілля (абразивність до 5 мг) показник абразивності визначають шляхом стирання стандартного еталона (при постійному тиску на контакт) об роздроблену пробу матеріалу. Відповідно до методу визначення розрізняють абразивність тертя і ударну абразивність гірських порід. Найбільш абразивними є породи, що містять корунд, порфірит, діорит, граніт.

Для експериментального визначення відносної оцінки абразивності мінеральної сировини застосовують машину зносу (рис. 3.2). Цей метод у найкраще моделює знос металу і дозволяє зробити конкретні розрахунки по масі сировини, що пройшла через одиницю поверхні за одиницю часу та, як результат, визначити знос одиниці площі поверхні металу.

Проби для визначення абразивності відбирають і приготують з урахуванням того, що крупність максимальної грудки повинна бути не більше 5 мм. Підготовлена до випробовувань проба 2 завантажується у кільцевий жолоб 1 машини зносу. Зразок досліджуваного на знос матеріалу 3 (напр., футеровки) у вигляді тригранної піраміди закріплюють на ободі тихохідного шківів 4 машини.

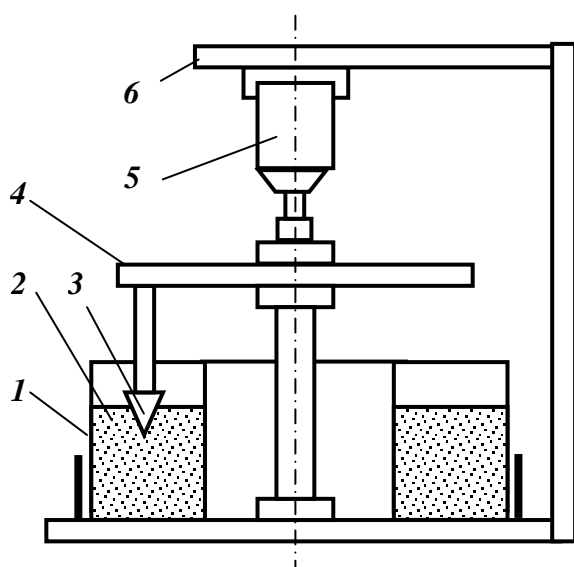


Рис. 3.2 – Схема лоткової машини для оцінки зносу.

- 1 – кільцевий жолоб;
- 2 – подрібнена проба;
- 3 – зразок досліджуваного матеріалу;
- 4 – шків;
- 5 – електропривід з редуктором;
- 6 – станина.

При роботі машини зразок досліджуваного матеріалу переміщається по колу з швидкістю 0,48 м/с. Тривалість випробовувань складає 8 годин. Після закінчення цього терміну зразок досліджуваного матеріалу знімають і визначають площу поверхні піраміди за її геометричними розмірами. Розраховують знос  $1 \text{ м}^2$  площі поверхні матеріалу зразка за 8 годин роботи машини. Одержаний результат служить оцінкою абразивності мінеральної сировини.

Визначення абразивності виконують на двох зразках та розраховують середнє арифметичне, якщо розходження результатів двох іспитів не перевищує 1 %. При більшому розходженні роблять третє визначення і за остаточний результат приймають середнє арифметичне двох найбільш близьких результатів.

Зносостійкість зразків визначають за втратою маси і зовнішнім виглядом зразків після випробувань, зважування зразків проводять на аналітичних вагах. Показник зносостійкості визначають за формулою:

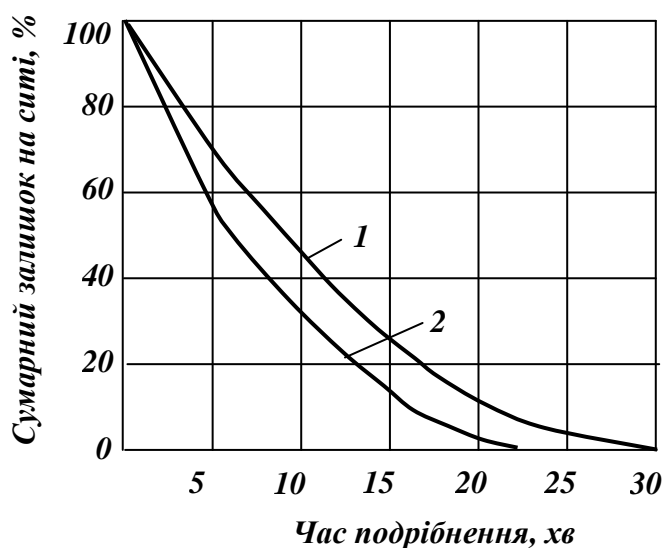
$$K_m = \Delta m / \tau S \quad (3.17)$$

де  $\Delta m$  – втрата маси, в кг;  $S$  – площа зразка,  $m^2$ ;  $\tau$  – тривалість випробувань, с.

### 3.1.2 Кінетика процесу подрібнення

Для управління процесом подрібнення матеріалу у млині і вибору умов його оптимальної роботи необхідно знати як протікає процес з часом, тобто знати його кінетику.

Під кінетикою процесу подрібнення розуміють закономірний характер зменшення залишку на контрольному ситі від часу подрібнення. Контрольне сито вибирають з розмірами, що відповідають граничній крупності подрібнення. Підрешітний продукт цього сита є готовим, а надрешітний – залишком, тобто матеріалом, який ще недостатньо подрібнений. Для дослідження кінетики подрібнення з млина періодичної дії через визначені проміжки часу відбирають проби і аналізують їх на контрольному ситі. Результати досліджень зображають у вигляді графіка (рис. 3.3). Вигляд кривих залежить від подрібнюваності матеріалу і режиму подрібнення. Можна підібрати велике число формул, які задовільно описують криві подрібнюваності.



**Рис. 3.3 – Залежність виходу залишку на контрольному ситі від часу подрібнення.**  
**1 – клас + 0,5 мм;**  
**2 – клас 0,074 мм.**

Виходячи з того, що швидкість зменшення залишку на контрольному ситі  $dR/dt$  пропорційна масі  $R$  цього залишку, рядом авторів запропоновано рівняння:

$$dR/dt = -kR, \quad (3.18)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності (параметр подрібнення);  $t$  – тривалість подрібнення.

Після інтегрування рівняння (3.18) отримуємо:

$$\ln R = -kt + C. \quad (3.19)$$

У початковий момент при  $t = 0$  маса залишку на ситі  $R = R_0$  і  $C = \ln R_0$ , тоді  $\ln R = -kt + \ln R_0$ , а отже

$$R = R_0 e^{-kt}, \quad (3.20)$$

де  $R_0$  – маса залишку у матеріалі, що надходить на подрібнення.

Дослідження показують, що при подрібненні вузьких класів крупності абсолютна швидкість зменшення залишків пропорційна їхній масі у млині у кожен даний момент часу, а відносна швидкість – постійна за часом. Тому при описі процесу подрібнення рівняння (3.20), яке є простим і зручним, часто приймається за основу.

Інші автори висунули положення про те, що відносна швидкість зменшення маси залишку на контрольному ситі змінюється за часом. Так, К.А. Разумовим запропоновано рівняння:

$$dR/dt = -k_0[p + (1-p)R/R_0]R.$$

Після інтегрування і рішення відносно  $R$  отримуємо:

$$R = pR_0 / (e^{pk_0t} - 1 + p), \quad (3.21)$$

де  $k_0$  – відносна швидкість подрібнення у початковий момент часу при залишку на ситі  $R_0$ ;  $pk_0$  – відносна швидкість подрібнення у момент, коли  $R = 0$ ;  $t$  – тривалість подрібнення.

Рівняння (3.21) задовільно описує дослідні дані; параметри  $p$  і  $k_0$  знаходять експериментально.

Для підвищення точності опису кінетики подрібнення матеріалу з широким спектром класів крупності В.В.Товаров запропонував експоненціально-степеневе рівняння:

$$R = R_0 \exp(-k t^m), \quad (3.22)$$

де  $R_0$  і  $R$  – маса крупного класу у вихідному матеріалі і подрібненому продукті у будь-який момент часу;  $t$  – тривалість подрібнення  $m$  і  $k$  – експериментальні коефіцієнти.

Кутовий коефіцієнт  $m$ , як правило, не залишається постійним протягом  $R = f(t)$ , тому що у більшості випадків криві подрібнюваності складаються з двох, а іноді з трьох прямолінійних ділянок. Таким чином, для точного опису кінетики подрібнення необхідно кожний раз визначати межі, де можна вважати  $m = const$ .

Після подвійного логарифмування рівняння (3.22) одержимо:

$$\ln \ln(R_0 / R) = m \ln t + \ln k. \quad (3.23)$$

В системі координат  $\ln t$  і  $\ln \ln(R_0 / R)$  це рівняння є прямою лінією.

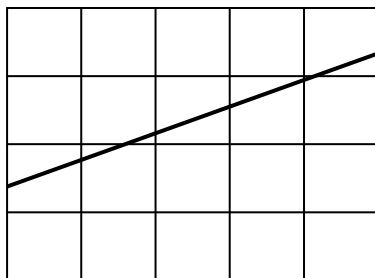
Для визначення параметрів  $m$  і  $k$ , на експериментальній прямій, виділяють дві точки і визначають їх координати. Значення  $m$  і  $k$  розраховують за формулами:

$$m = [\ln \ln(R_0 / R_2) - \ln \ln(R_0 / R_1)] / (\ln t_2 - \ln t_1); \quad (3.24)$$

$$k = \ln(R_0 / R) / t^m. \quad (3.25)$$

Рівняння (3.22) застосовне тільки у тих випадках, якщо залишок на контрольному ситі складає від 5 до 100 %; при малому  $R_t$  (великому  $t$ ) воно не забезпечує достатньої точності.

$\ln \ln R_0 / R$



$\ln t$

**Рис. 3.4 – Залежність маси крупного класу у зливі млина від тривалості подрібнення у системі координат  $\ln \ln R_0 / R, \ln t$ .**

Для опису кінетики подрібнення Л.П.Шупов запропонував рівняння виду:

$$R_t = (1 - R_0^*) \exp \left\{ - \left[ k_1^{1/n_1} t + \ln \frac{1 - R_0^*}{R_0 - R_0^*} \right]^{n_1} + R_0^* \right\}, \quad (3.26)$$

де  $R_0^*$  – вміст плюсового класу у неподрібненому залишку;  $k_1$  і  $n_1$  – коефіцієнти кінетики подрібнення.

Це рівняння враховує вплив залишку  $R_0^*$ , який не подрібнюється, і вміст крупного класу у вихідному матеріалі  $R_0$ . При визначених умовах рівняння лінеаризують відносно коефіцієнтів.

Знання кінетики подрібнення дозволяє теоретично визначити подрібнюваність корисної копалини, розрахувати масу циркуляційного продукту, визначити продуктивність млина та ін.

## 3.2 Млини

### 3.2.1 Класифікація млинів

Подрібнення корисних копалин та інших матеріалів здійснюється у млинах різних конструкцій.

Розрізняють такі млини:

- барабанні або гравітаційні (кульові, стержневі, роликові, самоподрібнення),
- відцентрові, вібраційні (інерційні, гираційні);
- маятникові (вихрові, аеробильні, молоткові, пальцеві);
- струменеві, колоїдні та ін.

Окрему групу млинів становлять стирачі лабораторні (напр., бігунни), у яких подрібнення здійснюється між двома стираючими поверхнями (дисками, циліндрами), в той час як в інших млинах процес протікає в об'ємі подрібнюваного матеріалу.

За іншою класифікацією млини поділяють на барабанні (кульові, стержневі), трубні, конусні, самоподрібнення, роликові (роликотильцеві, кульово-кільцеві, котково-чашкові, котково-дискові), ударно-відцентрові (молоткові, дезінтегратори, дисмембратори), жорнові, вібраційні, струменеві тощо.

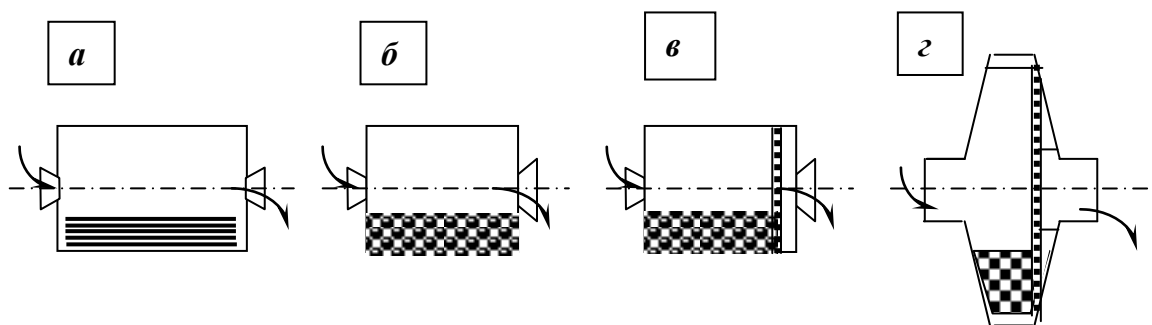
Як бачимо, молоткові дробарки іноді зараховують до млинів, що цілком зрозуміло виходячи з міркувань крупності одержуваного продукту.

кту, яка визначається розміром отворів решета апарата, що може бути 13,0; 6,0; 1,0 мм та ін.

Подрібнення мінеральної сировини на вугле- і рудозбагачувальних фабриках і в рудопідготовчих відділеннях металургійних підприємств найчастіше здійснюється в барабанних млинах (стержневих, кульових, рудногалькових, самоподрібнення), схеми яких наведені на рис. 3.5. Млини іншої конструкції застосовують у спеціальних випадках (наприклад, дезінтегратори – для тонкого помелу вугілля при приготуванні висококонцентрованих водовугільних суспензій, струминні млини – для надтонкого помелу рідкіснометалічних руд тощо).

### 3.2.2 Конструктивні типи і принцип дії барабанних млинів

Конструктивні типи барабанних млинів розрізняються за родом подрібнювальних (молотьних) тіл, формою барабана, способом подрібнення і способом розвантаження подрібненого продукту (рис. 3.5).



**Рис. 3.5. – Схеми барабанних млинів:**  
**а** – стержневий млин МСЦ; **б** – кульовий млин МШЦ;  
**в** – кульовий МШР або рудногальковий МРГ млини;  
**г** – млин мокрого самоподрібнення.

Якщо подрібнення *мокре*, то матеріал захоплюється зливним потоком води, а якщо *сухе* – повітряним потоком, що виникає при відсмоктуванні повітря з барабана.

У залежності від форми барабана розрізняють млини циліндро-конічні і циліндричні. Останні, в свою чергу, бувають трьох типів: короткі –  $l < D$ ; довгі –  $l = (2 \div 3) D$ ; трубні –  $l > 3D$ .

У залежності від виду подрібнювального середовища розрізняють млини кульові, стержневі, галькові, рудногалькові і самоподрібнення. У кульових млинів подрібнювальне середовище – сталеві або чавунні кулі діаметром  $d = 15 - 125$  мм, у стержневих – сталеві стержні ( $d = 50 - 120$



мм); у галькових – обкатана кремнієва галька або руда; у млинів самоподрібнення – крупні грудки руди, яка подрібнюється.

У залежності від способу розвантаження подрібненого продукту розрізняють млини з центральним розвантаженням і розвантаженням через периферійні решітки.

У перших млинів подрібнений продукт видаляється вільним зливом через порожнисту розвантажувальну цапфу, у інших – через периферійні решітки в розвантажувальному кінці млина.

На збагачувальних фабриках застосовуються стержневі млини з центральним розвантаженням – МСЦ (рис. 3.5 а), кульові млини з центральним розвантаженням – МШЦ (рис. 3.5 б), кульові і рудногалькові млини з розвантаженням через решітки – МШР і МРГ (рис. 3.5 в), рудні млини мокрого самоподрібнення – ММС (рис. 3.5 г).

Барабанний млин (рис. 3.6) являє собою циліндричний барабан 1 з торцевими кришками 2 і пустотілими цапфами 3, які опираються на підшипники 4. Вихідний матеріал завантажується через одну цапфу, а подрібнений продукт розвантажується через протилежну.

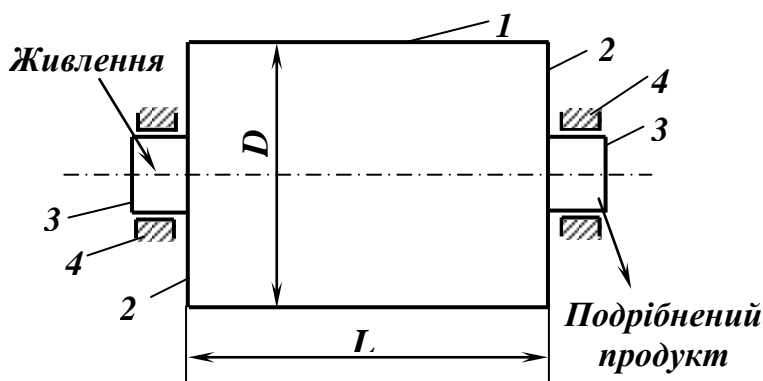


Рис. 3.6. – Схема барабанного млина.

1 – циліндричний барабан; 2 – торцеві кришки; 3 – цапфи; 4 – підшипники.

При обертанні барабана подрібнювальне середовище (стержні, кулі, грудки руди або рудна галька) і матеріал, що подрібнюється, завдяки тертю піднімаються на певну висоту, а потім сповзають, скочуються або падають униз. Подрібнення у млині відбувається за рахунок удару падаючого подрібнювального середовища, роздавлювання і тертя між шарами.

### 3.2.3 Конструкції кульових і стержневих барабанних млинів

Стержневі млини з центральним розвантаженням (МСЦ) встановлюють у першій стадії подрібнення. Вони застосовуються для дрібного дроблення перед кульовими млинами, а також для підготовки дрібновокраплених руд перед гравітаційним або магнітним збагаченням (для подрібнення матеріалу до 0,5 – 3 мм).

Стержневий млин з центральним розвантаженням (рис. 3.7) складається з циліндричного барабана *1* із торцевими кришками *2* і *14*. Барабан і кришки футерують з середини стальними плитами *8* і *10*. Торцеві кришки мають пустотілі цапфи *3* і *13*, за допомогою яких барабан опирається на корінні підшипники *6* і *11*. Обертання барабану передається від електродвигуна через вінцеву шестерню *9*, закріплену на барабані.

Живильник *5* равликового або комбінованого типу закріплений на завантажувальній цапфі. Пустотілі цапфи обладнані змінними завантажувальною і розвантажувальною лійками *4* і *12*.

Розвантажувальна цапфа має більший діаметр ніж завантажувальна, що створює нахил пульпи у бік розвантаження у млині і прискорює рух пульпи через млин.

У барабан завантажуються стержні з високовуглецевої сталі діаметром від 45 до 100 мм. Об'єм стержнів складає 35 – 45 % об'єму млина. При обертанні барабана стержні сповзають або скочуються і подрібнюють зерна корисної копалини. Руйнування матеріалу здійснюється роздавлюванням і стиранням.

Для завантаження млинів застосовуються равликові, барабанні і комбіновані живильники.

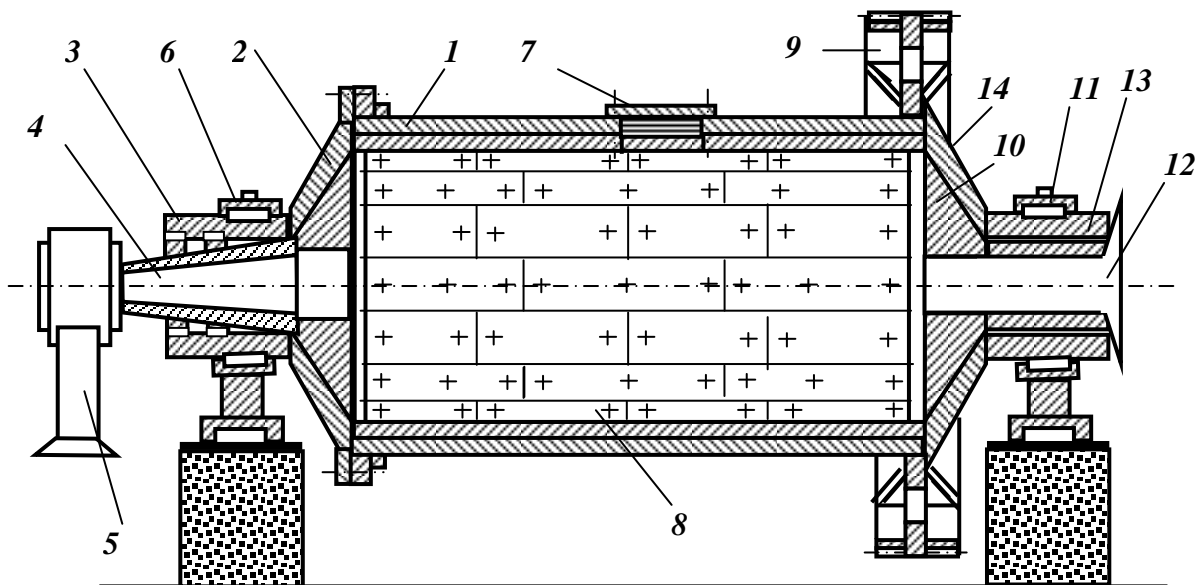


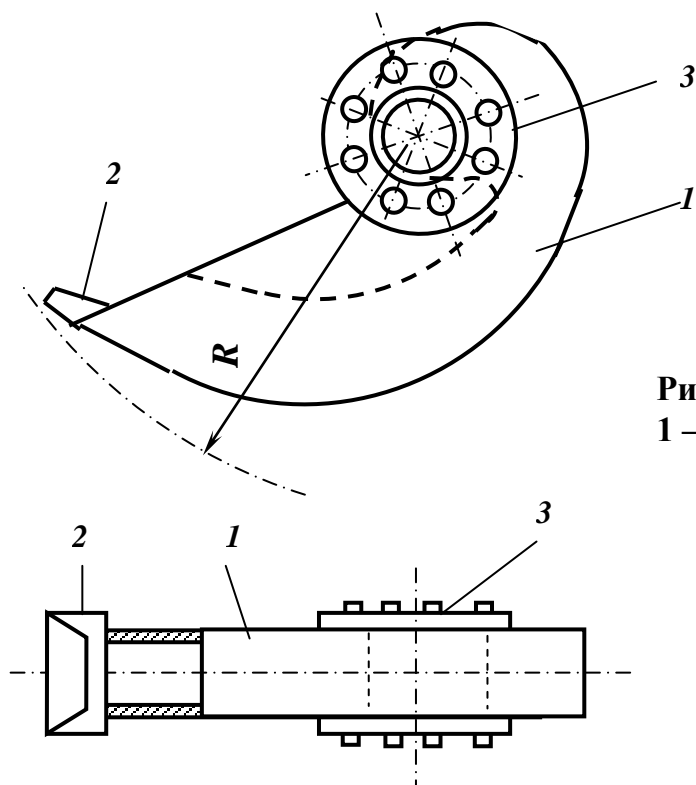
Рис. 3.7 – Стержневий млин з центральним розвантаженням.

*1* – циліндричний барабан; *2, 14* – торцеві кришки; *3, 13* – пустотілі цапфи; *4* – завантажувальна лійка; *5* – живильник; *6, 11* – підшипники; *7* – люк; *8, 10* – футеровочні плити; *9* – вінцева шестерня; *12* – розвантажувальна лійка.

*Равликовий живильник* (рис. 3.8) являє собою черпак спіральної форми з круглим отвором у боковій стінці для завантаження зачерпнутого матеріалу у млин. Фланець *3* живильника болтами кріпиться до ца-

пфи барабана млина таким чином, щоб отвори цапфи і живильника збігалися.

Корпус *1* живильника виготовляється з листової сталі або відливається з легованого чавуну. На кінці черпака живильника кріпиться змінний козирок *2* з марганцевистої сталі або з легованого чавуну.

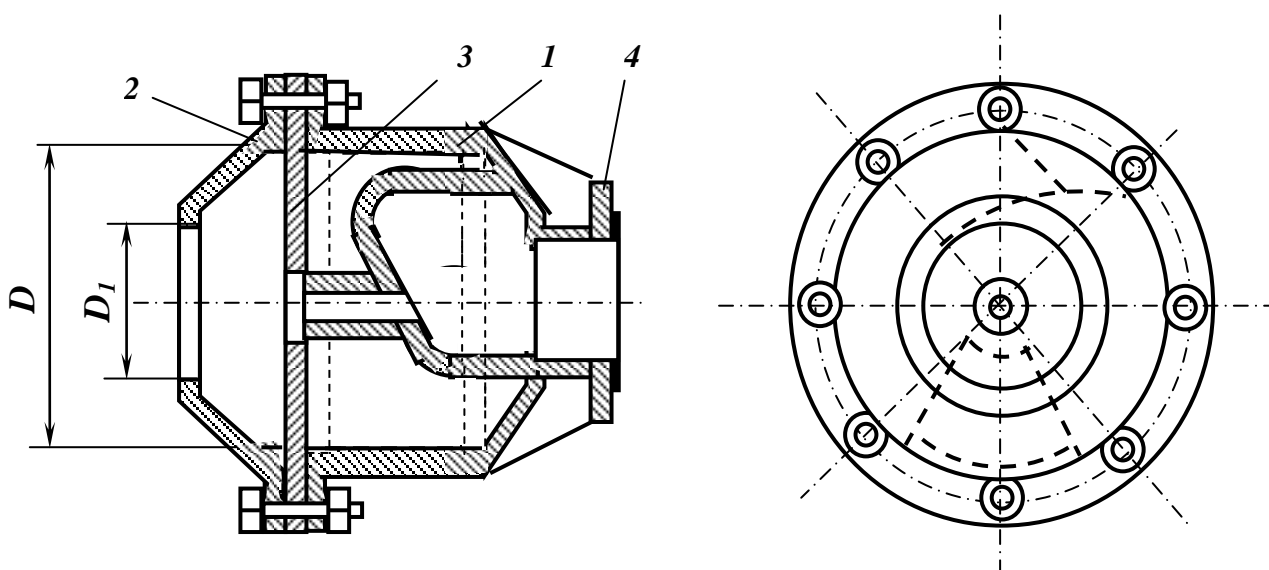


**Рис. 3.8 – Равликовий живильник.**  
**1 – корпус; 2 – козирок; 3 – фланець.**

Внутрішня поверхня живильника футерується стальними листами. Равликові живильники виготовлюються одно-, дво- і тричерпаковими. Поперечний перетин між спіралями живильника – прямокутний і має достатній розмір для проходження куль максимального діаметра.

Равликові живильники дозволяють завантажувати матеріал, що надходить на подрібнення, з більш низького рівня, що дає можливість встановлювати млини у замкненому циклі з класифікаторами.

*Барабанний живильник* (рис. 3.9) являє собою циліндроконічну камеру відкриту з обох сторін і обладнану внутрішньою перегородкою для подачі подрібнюваного матеріалу у млин.



**Рис. 3.9 – Барабанний живильник.**

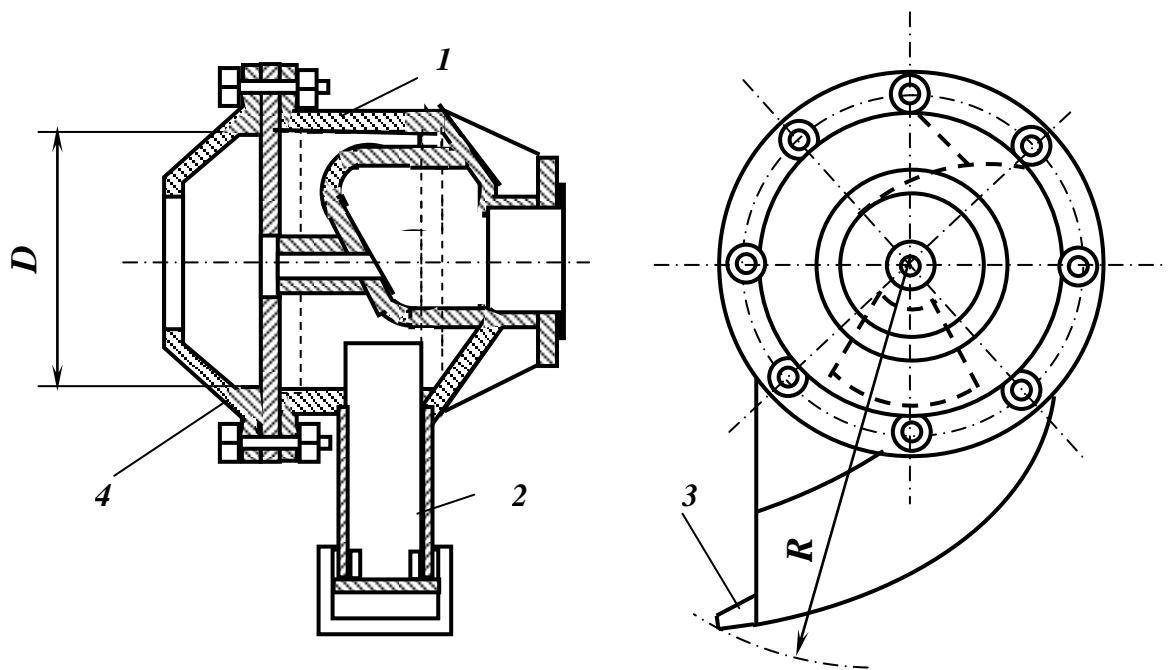
**1 – корпус; 2 – кришка; 3 – діафрагма; 4 – фланець.**

Корпус *1* живильника відливається з чавуну або зварюється із сталевих листів. Збоку завантаження матеріалу до корпусу болтами кріпиться кришка *2* у формі усіченого конуса з круглим отвором при меншій основі для прийому матеріалу.

Між корпусом і кришкою встановлюється діафрагма *3* з листової сталі з секторним отвором для пропуску матеріалу на спіраль корпусу. Живильник кріпиться фланцем *4* до завантажувальної цапфи барабана млина. Барабанні живильники застосовуються для завантаження матеріалу крупністю до 70 мм на рівні осі млина.

*Комбінований живильник* (рис. 3.10) застосовується для завантаження млина одночасно грудковим матеріалом і пісками класифікатора.

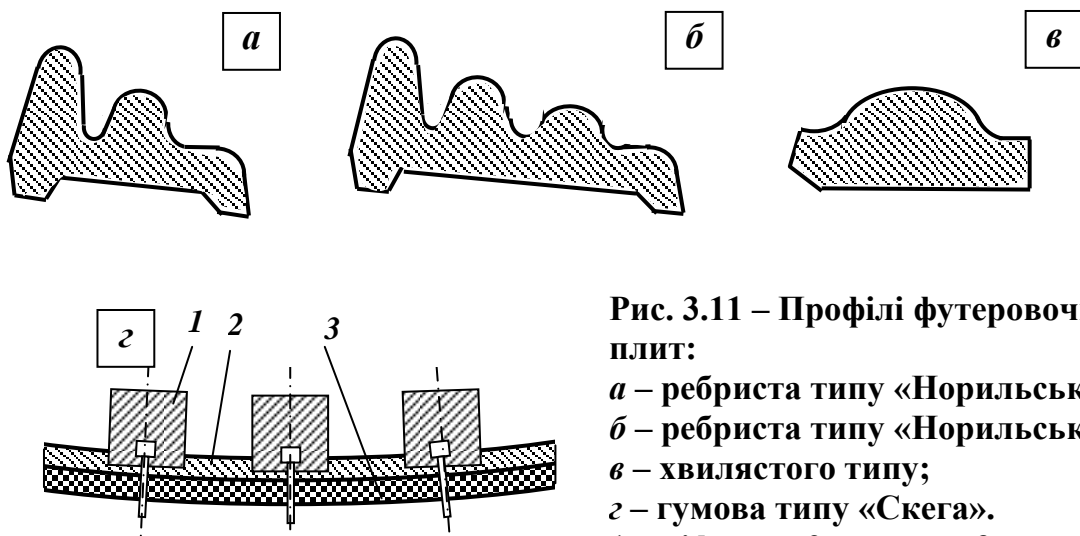
Вихідний матеріал завантажується через отвір кришки *4*, а піски захоплюються черпаком із завантажувальної коробки, яка розташована нижче рівня осі млина. Перевагою комбінованого живильника є те, що крупний матеріал потрапляє у млин минаючи завантажувальну коробку для черпака равлика. Таким чином запобігається заклинювання крупних грудок між черпаком і днищем коробки.



**Рис. 3.10 – Комбінований живильник.**

1 – корпус; 2 – черпак; 3 – козирок черпака; 4 – кришка.

Конструкція футерувальних плит барабана (рис. 3.11) повинна допускати легку їхню установку і заміну. Змінні броньові плити виготовляються із зносостійких матеріалів (легованого чавуну, марганцевистої і хромистої сталі). Товщина футерувальних плит приймається від 50 мм (для млинів малих розмірів) до 150 мм (для млинів великих розмірів). Від товщини і профілю футерувальних плит залежить характер руху подрібнювальних тіл, (висота підйому і коефіцієнт ковзання по футеровці), робочий об'єм барабана млина, знос футеровки, продуктивність млина, витрата електроенергії і подрібнювальних тіл.



**Рис. 3.11 – Профілі футеровочних плит:**

*a* – ребриста типу «Норильськ-III»;  
*б* – ребриста типу «Норильськ-IV»;  
*в* – хвилястого типу;

*z* – гумова типу «Скега».

1 – ліфтери; 2 – плити; 3 – сектори решітки.

Для кульових млинів першої стадії подрібнення, у які завантажують кулі діаметром 100 – 125 мм, кращим є профіль ребристої футеровки типу «Норильськ-III» (рис. 3.11 *а*). Ця футеровка забезпечує надійне зчеплення з кулями і підйом їх на велику висоту, відсутність ковзання куль, рівномірний і більш повільний знос плит, зниження питомої витрати металу і електроенергії, підвищення продуктивності млина.

Для кульових млинів другої стадії подрібнення кращим є профіль ребристої футеровки типу «Норильськ-IV» (рис. 3.11 *б*).

Для стержневих млинів частіше застосовують футеровку хвилястого типу (рис. 3.11 *в*), але вона не рекомендується для кульових млинів внаслідок значного ковзання куль.

Для кульових млинів другої стадії подрібнення також використовуються гумові футеровки (рис. 3.11 *г*). Основним елементами гумової футеровки є ліфтери 1, плити 2 і сектори решітки 3. На торцеві кришки барабана млина радіально укладають плити товщиною 60 мм і затискують ліфтерами. Товщина гумової футеровки барабана складає від 50 до 80 мм, гумові сектори решітки мають товщину 54 мм. Футеровочні гумові плити укладають поздовж барабана і також затискують ліфтерами.

Оскільки гумова футеровка тонше сталевій, робочий об'єм млина збільшується на 5 – 6 %. Термін служби гумової футеровки на 15 – 20 % більше ніж сталевій. Питома витрата куль у млині з гумовою футеровкою менша, а продуктивність вища, ніж у млинів із сталлюю футеровкою. Інші переваги млинів з гумовою футеровкою: менша трудомісткість монтажу, більша герметичність, менший рівень шуму.

Футеровка цапф гладенька або спіральна. Напрямою спіралі завантажувальної цапфи повинен сприяти просуванню вихідного матеріалу у млин, а розвантажувальної цапфи – поверненню у млин куль і крупного матеріалу.

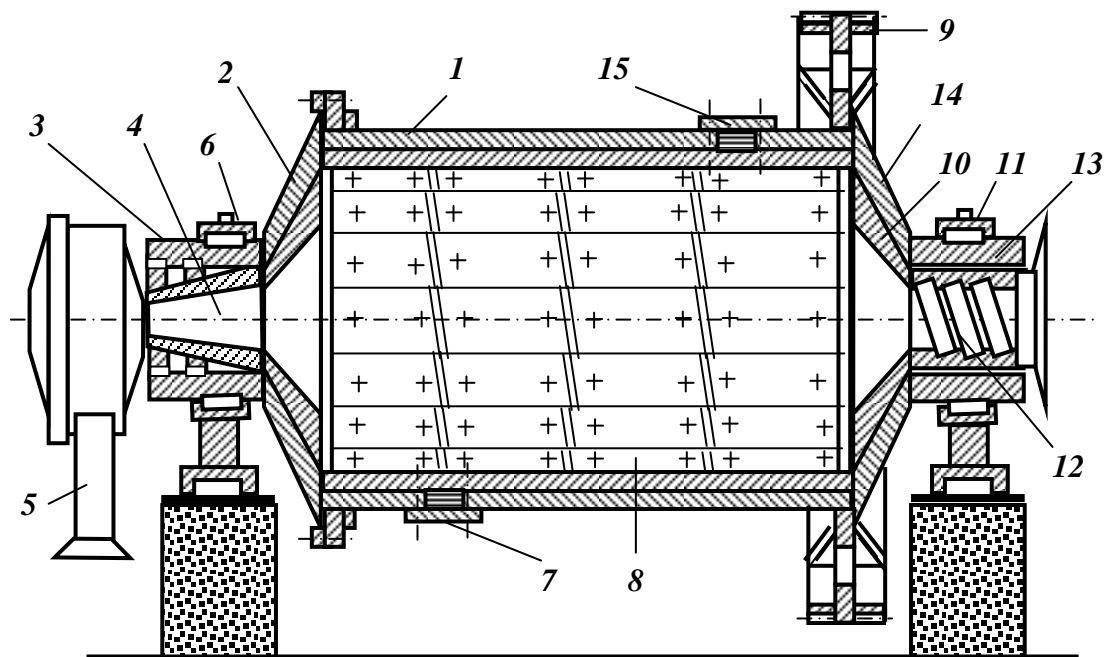
Технічні характеристики стержневих млинів з центральним розвантаженням наведені у додатку В.

*Кульові млини з центральним розвантаженням (МШЦ) встановлюють на другій і третій стадіях подрібнення (рідше на першій стадії). Вони застосовуються для додаткового подрібнення промпродуктів, а також для подрібнення тонковкраплених руд, коли переподрібнення негативно впливає на показники збагачення.*

За конструкцією кульовий млин з центральним розвантаженням аналогічний стержневому млину з центральним розвантаженням.

Кульовий млин з центральним розвантаженням (рис. 3.12) складається з циліндричного барабана *1* із торцевими кришками *2* і *14*. Барабан і кришки футерують з середини сталевими плитами *8* і *10*. Торцеві кришки мають пустотілі цапфи *3* і *13*, за допомогою яких барабан опи-

рається на корінні підшипники **6** і **11**. Обертання барабану передається від електродвигуна через вінцеву шестерню **9**, закріплену на барабані.



**Рис. 3.12** – Кульовий млин з центральним розвантаженням.

**1** – циліндричний барабан; **2, 14** – торцеві кришки; **3, 13** – пустотілі цапфи; **4** – завантажувальна лійка; **5** – живильник; **6, 11** – підшипники; **7, 15** – люки; **8, 10** – футеровочні плити; **9** – вінцева шестерня; **12** – розвантажувальна лійка.

Живильник **5** барабанного або комбінованого типу закріплений на завантажувальній цапфі. Пустотілі цапфи обладнані змінними завантажувальною і розвантажувальною лійками **4** і **12**.

Млини невеликих розмірів мають люки **7** і **15** для введення футеровки в середину барабанів. У млинах великих розмірів ця операція виконується через розвантажувальну цапфу. Розвантажувальна цапфа має дещо більший діаметр ніж завантажувальна, що обумовлює нахил дзеркала пульпи у бік розвантаження у млині.

У барабан завантажуються сталеві або чавунні кулі різного діаметра (від 40 до 150 мм). Об'єм куль складає приблизно половину об'єму млина. При обертанні барабана кулі сповзають, скочуються або падають і подрібнюють зерна корисної копалини. Подрібнення руди відбувається головним чином у результаті ударів подрібнювальних тіл і частково стиранням і роздавлюванням.

Вихідний матеріал завантажується у млин через завантажувальну цапфу, а подрібнений продукт вивантажується з млина через розвантажувальну цапфу.

Технічні характеристики кульових млинів з центральним розвантаженням наведені у додатку В.

*Кульові млини з розвантаженням через решітку (МШР)* звичайно встановлюють на першій стадії подрібнення. Вони видають подрібнений продукт з меншим вмістом шламів і мають більшу питому продуктивність в порівнянні з кульовими млинами з центральним розвантаженням, але більш складні за конструкцією.

Кульовий млин з розвантаженням через решітку (рис. 3.13) складається з циліндричного барабана **1** із торцевими кришками **2** і **6**. Барабан і кришки футерують з середини стальними плитами **8**, які закріплені болтами **9**. Торцеві кришки мають пустотілі цапфи: завантажувальну **4** і розвантажувальну **14**, за допомогою яких барабан опирається на корінні підшипники **3** і **15**.

У середині пустотілих цапф встановлені змінні лійки. Біля розвантажувального кінця млина встановлена решітка **10**. Решітка складається з секторів, які можуть бути литими з довгастими отворами або збірними з колосників трапецієподібної форми.

Секторні решітки кріпляться до торцевої кришки смугами з марганцевистої сталі на болтах. Простір між решіткою і торцевою кришкою розділено перегородками – ліфтерами **12** на секторні камери, які відкриті у цапфу **14**.

Наявність решітки і секторних камер дозволяє здійснити примусове розвантаження подрібненого продукту з млина і підтримувати низький рівень пульпи, що у свою чергу спричиняє зменшення об'єму матеріалу у млині і скорочення часу подрібнення. При обертанні млина ліфтери **12** діють, як елеваторне колесо: піднімають пульпу до рівня розвантажувальної цапфи **14**, через яку вона видаляється з млина.

У барабан завантажуються сталеві або чавунні кулі різного діаметра (від 40 до 150 мм). Об'єм куль складає приблизно половину об'єму млина. При обертанні барабана кулі сповзають, скочуються або падають і подрібнюють зерна корисної копалини. Подрібнення руди відбувається головним чином у результаті ударів подрібнювальних тіл і частково стиранням і роздавлюванням.

Вихідний матеріал завантажується у млин живильником **5** барабанного або комбінованого типу закріпленим на завантажувальній цапфі **4**. Млини мають люки **7** для вивантаження зношених куль, введення футеровки в середину барабанів і огляду млина. Розвантажувальна цапфа має дещо більший діаметр ніж завантажувальна, що обумовлює нахил дзеркала пульпи у бік розвантаження у млині.

Обертання барабану передається від електродвигуна через вінцеву шестерню **11**, закріплену на барабані. У млинах великих розмірів ти-



ходінний електродвигун приєднується до приводного вала за допомогою еластичної муфти (рис. 3.14 *a*), а у млинах малих розмірів через редуктор (рис. 3.14 *б*). У млинах самоподрібнення вінцева шестерня закріплена на розвантажувальній цапфі.

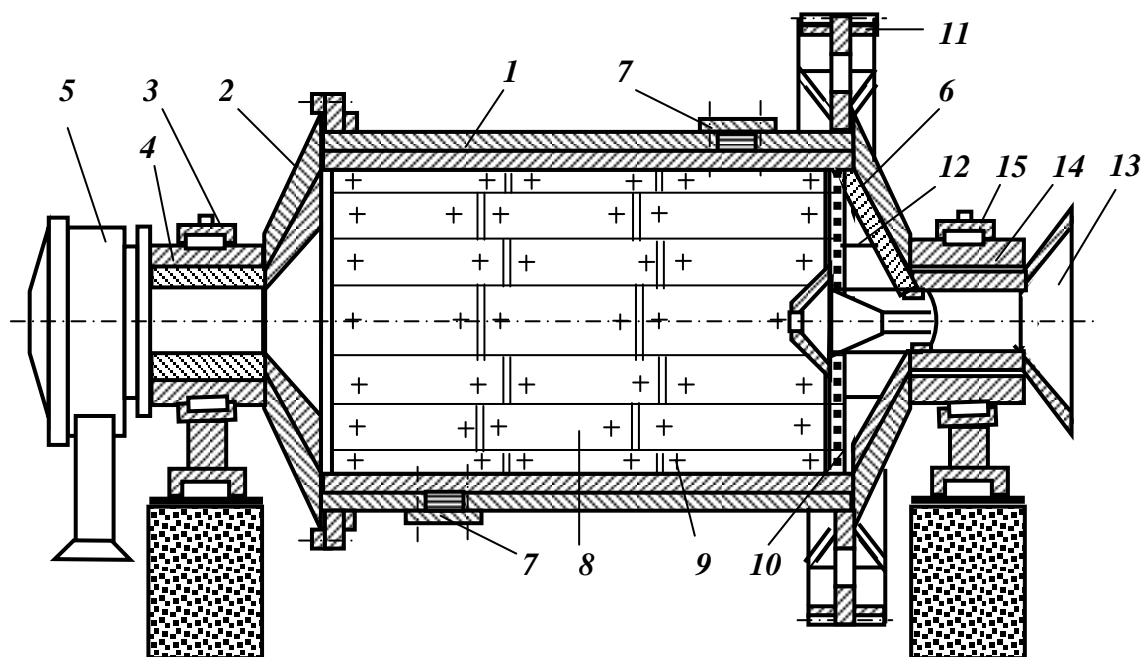


Рис. 3.13 – Кульовий млин з розвантаженням через решітку.

1 – барабан; 2, 6 – торцеві кришки; 3, 15 – підшипники; 4 – завантажувальна цапфа; 5 – живильник; 7 – люки; 8 – броньові плити; 9 – болти; 10 – решітка; 11 – вінцева шестерня; 12 – ліфтери; 13 – горловина; 14 – розвантажувальна цапфа.

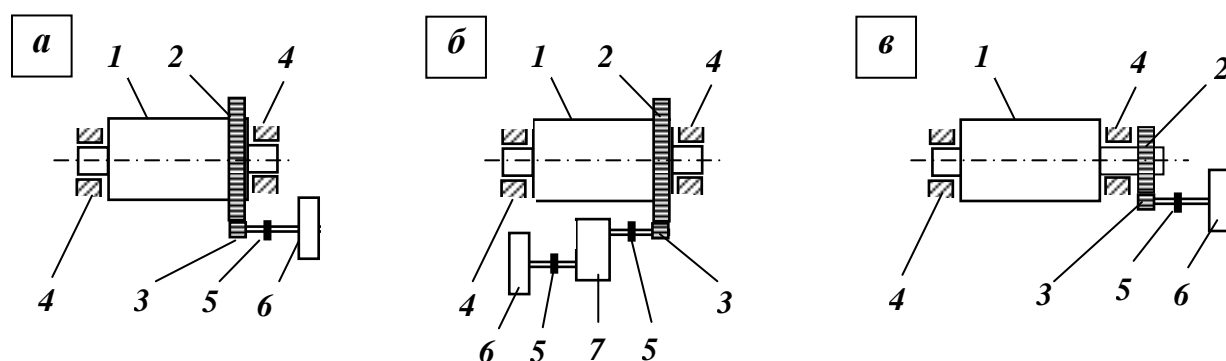


Рис. 3.14 – Схеми привода барабанних млинів:

*a* – привод від тихохідного електродвигуна через вінцеву шестерню, закріплену на барабані; *б* – привод від швидкохідного електродвигуна через редуктор і вінцеву шестерню, закріплену на барабані; *в* – привод від тихохідного електродвигуна через вінцеву шестерню, закріплену на розвантажувальній цапфі.

1 – млин; 2 – вінцева шестерня; 3 – приводна шестерня; 4 – опірні підшипники; 5 – муфта; 6 – електродвигун; 7 – редуктор.

Технічні характеристики кульових млинів з розвантаженням через решітку наведені у додатку В.

### 3.2.4 Конструкції барабанних млинів самоподрібнення

Сутність процесу самоподрібнення полягає у тому, що великі грудки руди у млині, подрібнюючись самі, у той же час подрібнюють більш дрібні грудки. Крупні грудки при цьому виконують роль подрібнювального середовища (куль або стержнів), а дрібні грудки – матеріалу, що подрібнюється.

Розрізняють такі процеси самоподрібнення:

– *рудне самоподрібнення*, при якому дроблена руда крупністю до 300 – 500 мм після однієї стадії дроблення (або безпосередньо з рудника) надходить у млини самоподрібнення. Млини самоподрібнення характеризуються великим діаметром ( $D \leq 12$  м) і невеликою довжиною ( $D : L = 3 : 1$ );

– *рудне напівсамоподрібнення*, яке відрізняється від рудного самоподрібнення тим, що у млин додають 5 – 10 % куль великого діаметра (100 – 125 мм). Кулі додають при недостатчі великих у дробимій руді, а також для підвищення продуктивності млина;

– *рудногалькове подрібнення*, при якому руда крупністю 6 – 0 мм або дрібніше, яка отримана у результаті рудного самоподрібнення, напівсамоподрібнення або подрібнення у стержневому млині подрібнюється у рудногалькових млинах. Рудна галька (крупністю 100 – 40 мм; 75 – 30 мм) відбирається після другої стадії дроблення або виділяється при рудному самоподрібненні і використовується як подрібнювальне середовище.

У порівнянні з подрібненням у стержневих і кульових млинах самоподрібнення характеризується такими перевагами:

– виключаються стадії середнього і дрібного дроблення;

– економія подрібнювальних тіл (не застосовуються кулі і стержні);

– відсутнє забруднення подрібненого матеріалу металом;

– поліпшення технологічних показників подальшого збагачення внаслідок кращого розкриття і меншого шламоутворення;

– при переробці золотовмісних руд з наступним ціануванням виключаються втрати золота з залізним скрапом і крихтою, знижується витрата ціаніду і поліпшуються умови праці на кварцових і силікоzone-безпечних рудах;

– при флотації молібденових руд використання млинів самоподрібнення покращує показники збагачення, що пов'язано з меншим «наза-

лізненням» лусочок молібденіту. З цієї причини рудногалькові млини можуть виявитися вигіднішими в циклі розділення колективних поліметалічних концентратів.

До недоліків самоподрібнення слід віднести: меншу питому продуктивність, вищі витрати енергії (у 1,3-1,4 рази), великі витрати на футеровку.

Млини мокрого самоподрібнення типу «Каскад» (ММС) застосовуються у схемах переробки залізних, золотовмісних, мідномолібденових, алмазовмісних та інших руд замість конусних дробарок середнього і дрібного дроблення, стержневих і кульових млинів.

Млин мокрого самоподрібнення (рис. 3.15) складається з барабана 1 із торцевими кришками 3 і 8. Торцеві кришки мають пустотілі цапфи: завантажувальну 4 і розвантажувальну 12, за допомогою яких барабан опирається на корінні підшипники 5 і 11. Обертання барабану передається від електродвигуна через вінцеву шестерню 10, закріплену на розвантажувальній цапфі.

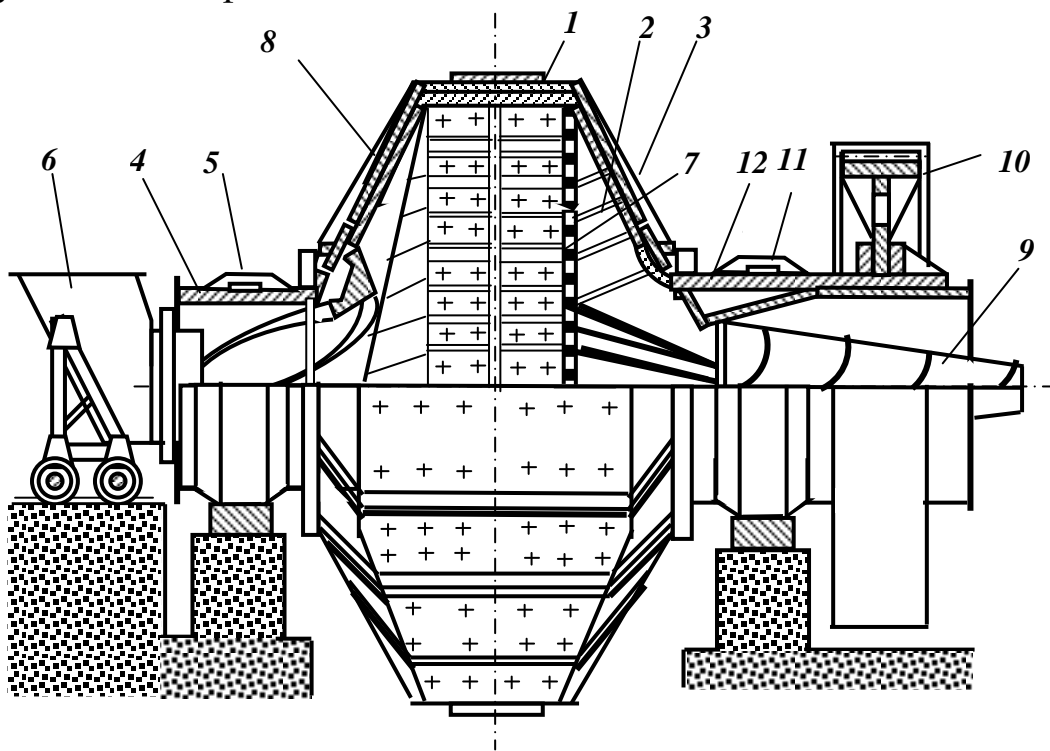


Рис. 3.15 – Млин мокрого самоподрібнення типу «Каскад».

1 – барабан; 2 – ліфтери; 3, 8 – торцеві кришки; 4 – завантажувальна цапфа; 5, 11 – підшипники; 6 – завантажувальний пристрій; 7 – решітка; 9 – бутара; 10 – вінцева шестерня; 12 – розвантажувальна цапфа.

Корпус барабана складається з двох половин з'єднаних фланцями. До корпусу приєднані порожні цапфи 4 і 12. У цапфах знаходяться завантажувальна і розвантажувальна втулки. Завантажувальна втулка має

спіралі, призначені для прискорення подачі руди у млин, і спіральний пристрій для повернення у млин пульпи, що протікає скрізь ущільнення.

Вихідна руда завантажується у млин за допомогою завантажувального пристрою 6, який являє собою патрубок, що переміщується механічним приводом по рейках.

Футеровка барабана складається з броньових плит і ліфтерів 2, футеровка торцевих стінок складається з двох рядів плит. Кріплення плит здійснюється ліфтерами і болтами з потайними головками. Біля розвантажувального кінця млина установлена решітка 7. Щілини решітки мають ширину 20 мм і виконані з розширенням у бік розвантаження. Кріплення решіток здійснюється боковими ліфтерами і болтами. Як і у кульових млинів з решітками, в млинах типу ММС простір між решіткою 7 і торцевою кришкою 3 розділено радіальними перегородками – розвантажувальними ліфтерами на секторні камери відкриті у цапфу 12. Ці ліфтери відливаються разом з футерувальними плитами.

Наявність решітки і розвантажувальних ліфтерів дозволяє здійснити примусове розвантаження подрібненого продукту з млина і підтримувати у млині низький рівень пульпи. При обертанні млина ліфтери 12 діють, як елеваторне колесо: піднімають пульпу до рівня розвантажувальної цапфи 14, через яку вона видаляється з млина. Класифікація подрібненого матеріалу здійснюється на бутарі 9, яка закріплена на розвантажувальній цапфі. Рудна галька виділяється з млина через вікна у розвантажувальній решітці.

Млини мокрого самоподрібнення у залежності від типорозміру приводяться в рух одним або двома електродвигунами. Вінцева шестерня 10 змонтована на розвантажувальній цапфі (див. рис. 3.14 в).

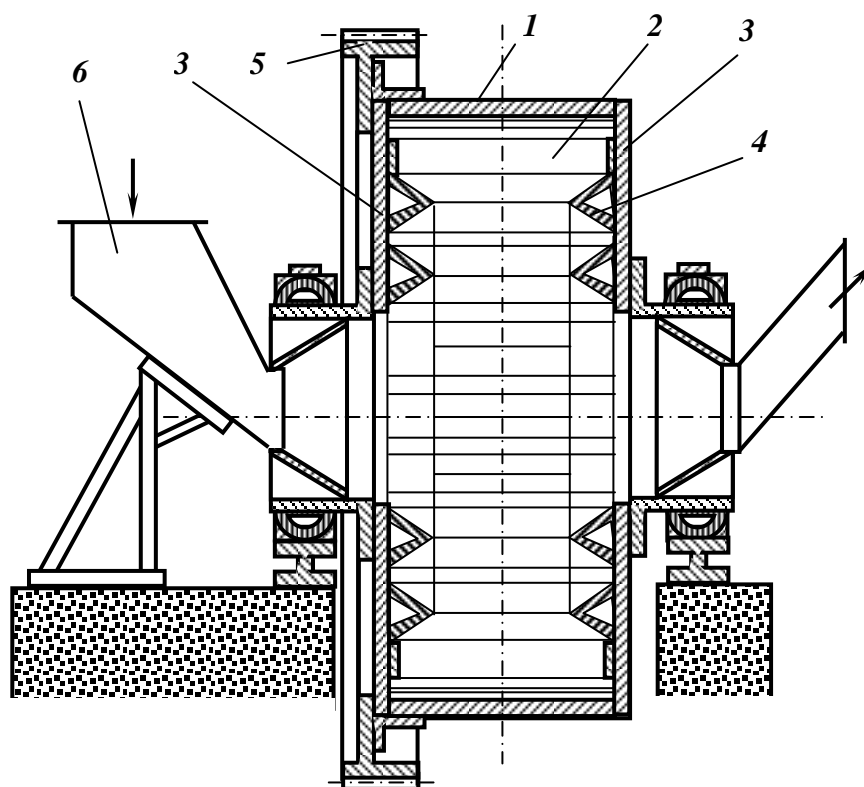
Млини самоподрібнення добре працюють тільки при низькому рівні розвантаження. При високому рівні пульпи у млині помельні тіла-грудки при падінні втрачають силу удару у більшому ступені ніж кулі, які мають більшу густину. Продуктивність млина по розвантаженню залежить не тільки від площі живого перетину решітки, але й від ємності камер, створених радіальними перегородками (ліфтерами) за решіткою. Якщо камери малі, пульпа буде повертатись у млин і його пропускна здатність буде низькою.

Технічні характеристики млинів мокрого самоподрібнення наведені у додатку В.

*Млини сухого самоподрібнення типу «Аерофол» (МСС) застосовуються у схемах переробки залізних, золотовмісних, уранових, поліметалічних та інших руд, а також для виробництва цементу.*

За конструкцією млин сухого самоподрібнення (рис. 3.16) аналогічний млину типу ММС.

Млин сухого самоподрібнення являє собою короткий барабан *1* великого діаметру (5,5 – 11 м). На внутрішній поверхні вздовж твірної барабана на деякій відстані один від одного закріплені балки-ребра *2*, які при обертанні барабана піднімають грудки матеріалу. Після підйому на деяку висоту грудки матеріалу падають і розбиваються при ударі об ребра, одночасно вони подрібнюють матеріал, що знаходиться унизу. На торцевих кришках *3* барабана закріплені кільця *4* трикутного перетину. Призначення кілець – направляти грудки матеріалу у середину барабана для запобігання сегрегації матеріалу у робочому просторі млина. Кільця також сприяють подрібненню матеріалу у результаті тертя і підвищенню продуктивності млина.



**Рис. 3.16 – Млин сухого самоподрібнення типу «Аерофол».**  
**1 – циліндричний барабан; 2 – ребра; 3 – торцеві кришки; 4 – кільця;**  
**5 – вінцева шестерня; 6 – завантажувальний пристрій.**

Млин сухого самоподрібнення типу «Аерофол» працює у замкненому циклі з класифікаційними апаратами. Повітряний потік, що створюється вентилятором, проходить через млин і класифікаційні апарати (сепаратор і циклони). Подрібнений матеріал виноситься повітряним потоком з барабана через розвантажувальну цапфу. Крупність продукту подрібнення регулюється зміною швидкості повітряного потоку, що проходить через млин. Дрібні частинки матеріалу визначеної крупності виносяться повітряним потоком з робочого простору млина у класифі-

катор, де більш крупні зерна потрапляють у збірник. Більш дрібні частинки повітряний потік транспортує у циклони, де й відбувається їхнє осадження. Потім повітряний потік, що містить найтонші зерна матеріалу засмоктується вентилятором і одна частина його нагнітається у млини, а друга після очищення у фільтрах викидається у атмосферу.

Осаджені у класифікаторі і циклонах продукти класифікуються у відцентровому сепараторі. Дрібний (готовий) продукт надходить з сепаратора на збагачення, а крупний (циркулюючий) повертається у млин на додаткове подрібнення.

*Рудногалькові млини* (МРГ) застосовуються на збагачувальних фабриках, які переробляють уранові, золотовмісні, поліметалічні, залізні та інші корисні копалини. Для рудногалькового подрібнення застосовують млини будь якого розміру і профілю, але перевагу віддають млинам із співвідношенням довжини барабана до його діаметра  $D : L = 1,5 : 1$ .

Рудногалькові млини за конструкцією аналогічні кульовим млинам з розвантаженням через решітку.

Розрізняють первинне і вторинне рудногалькове самоподрібнення.

При *первинному рудногальковому самоподрібненні* (перша стадія) подрібнювальним середовищем (галькою) служать грудки руди крупністю біля 150 мм, а матеріалом, що подрібнюється – дрібна руда крупністю 20 – 0 мм.

При *вторинному рудногальковому самоподрібненні* (друга стадія) подрібнювальним середовищем (галькою) служать грудки руди крупністю від 100 до 25 мм, а матеріалом, що подрібнюється – продукт першої стадії подрібнення крупністю 3 – 0 мм. Гальку необхідної крупності отримують або грохоченням руди в процесі її дроблення, або з рудних млинів. Подрібнений продукт млинів типу МРГ має крупність 0,5 – 0,1 мм і тоншу.

Первинне рудногалькове самоподрібнення може здійснюватись у відкритому і у замкненому циклах. При тонкому подрібненні рудногалькові млини, як правило, працюють у замкненому циклі з гідроциклонами і спіральними класифікаторами.

Первинне рудногалькове самоподрібнення не одержало такого широкого застосування, як вторинне (тонке). Основною перевагою вторинного рудногалькового самоподрібнення є те, що перехід з кульового на рудногалькове подрібнення простіше і дешевше, ніж у циклі первинного (грубого) подрібнення.

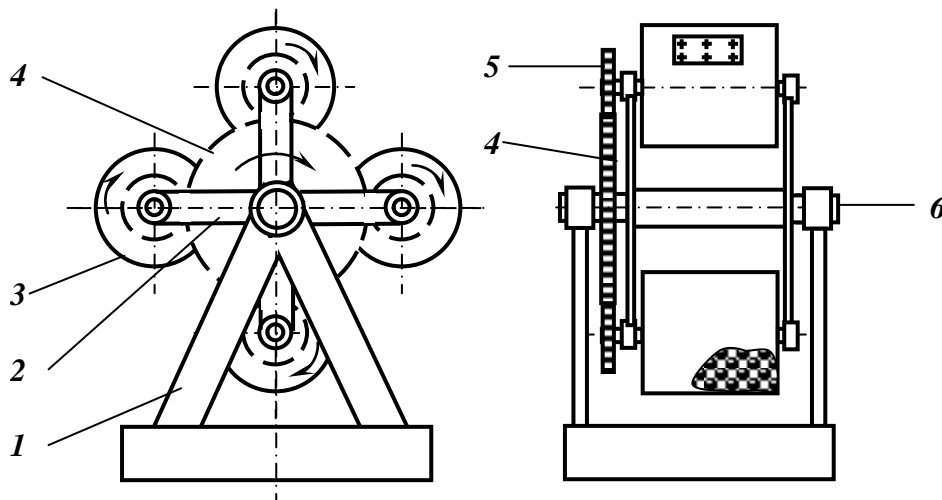
Основні переваги рудногалькового самоподрібнення: висока селективність, що підвищує кількісно-якісні показники збагачення; повне або значне скорочення витрати сталевих куль; простота і надійність експлуатації млинів; зниження собівартості подрібнення.

Технічні характеристики млинів мокрого самоподрібнення і рудногалькових наведені у додатку В.

### 3.2.5 Конструкції планетарних і гіроскопічних млинів

*Планетарні млини* (рис. 3.17) являють собою агрегат з декількох барабанних млинів 3, змонтованих на вертикальному водилі 2.

На осі кожного млина насаджені шестерні 5, які знаходяться у зачепленні з нерухомим зубчатим колесом 4. При обертанні водила барабанні млини обертаються відносно осі водила, а також навколо власних осей. Подрібнювальні тіла у барабанах знаходяться під дією додаткових відцентрових сил, які виникають при обертанні барабана навколо осі водила.



**Рис. 3.17** – Схема планетарного млина.

1 – рама; 2 – водило; 3 – барабан; 4 – зубчате колесо вала; 5 – зубчата шестерня барабана; 6 – вал.

Крупність вихідного матеріалу для планетарних млинів складає до 25 мм. У планетарних млинах подрібнення матеріалу здійснюється як металевими подрібнювальними тілами, так і у режимі самоподрібнення. Режим самоподрібнення матеріалів у планетарних млинах характеризується селективністю руйнування матеріалів різної міцності. Подрібнення матеріалу здійснюється головним чином стиранням.

Існують планетарні млини періодичної і безперервної дії. На збагачувальних фабриках планетарні млини можуть знайти застосування для особливих випадків помелу, наприклад, для подрібнення алмазовмісних руд.

*Гіроскопічний млин* (рис. 3.18) складається з барабана 1, на валу якого знаходяться приводний 2 і опорний 3 ролики.

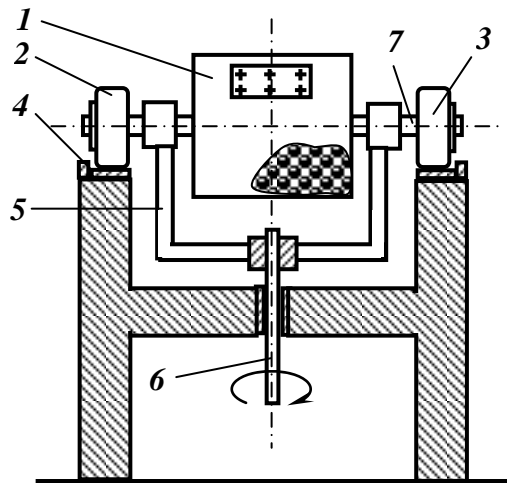


Рис. 3.18 – Схема гіроскопічного млина.

1 – барабан; 2 – приводний ролик; 3 – опорний ролик; 4 – кільцева доріжка; 5 – водило; 6 – приводний вал; 7 – вал барабана.

При обертанні навколо вертикальної осі ролики 2 і 3 переміщуються по кільцевій опорній доріжці 4. Вал барабана 7 нерухомо зв'язаний з водилом 5, яке обертається у вертикальній площині приводним валом 6. У результаті руху барабана навколо власної осі і у вертикальній площині помельні тіла усередині барабана рухаються за складними траєкторіями. Основні руйнуючі зусилля – роздавлювання і стирання.

Оптимальне співвідношення частот обертання барабана навколо вертикальної і горизонтальної осей знаходиться у межах від (1:1) до (1:5).

### 3.2.6 Конструкції відцентрових барабанних млинів

До типу відцентрових барабанних млинів відноситься велика кількість подрібнювальних машин різних конструкцій. Розглянемо деякі з них.

*Багатокамерний відцентровий млин* (рис. 3.19 а) складається з нерухомого вертикального барабана 1 з ротором-валом 2, що обертається в середині його. На водилах 3 ротора-вала 2 шарнірно закріплені ролики 4 або вільно розміщені кулі.

При обертанні вала відбувається роздавлювання частинок подрібнювальними тілами за рахунок дії на них відцентрових сил. Подрібнення матеріалу у таких млинах відбувається сухим або мокрим способом послідовно по мірі просування матеріалу поздовж поверхні барабана.

Млини цього типу використовуються у хімічній, фармацевтичній, керамічній та інших галузях промисловості. Спроби розробки млинів цього типу для гірничорудної промисловості виявили низьку зносостійкість роликів, підшипників та інших вузлів, необхідність періодичного калібрування поверхні барабану і роликів, складність їх ремонту.



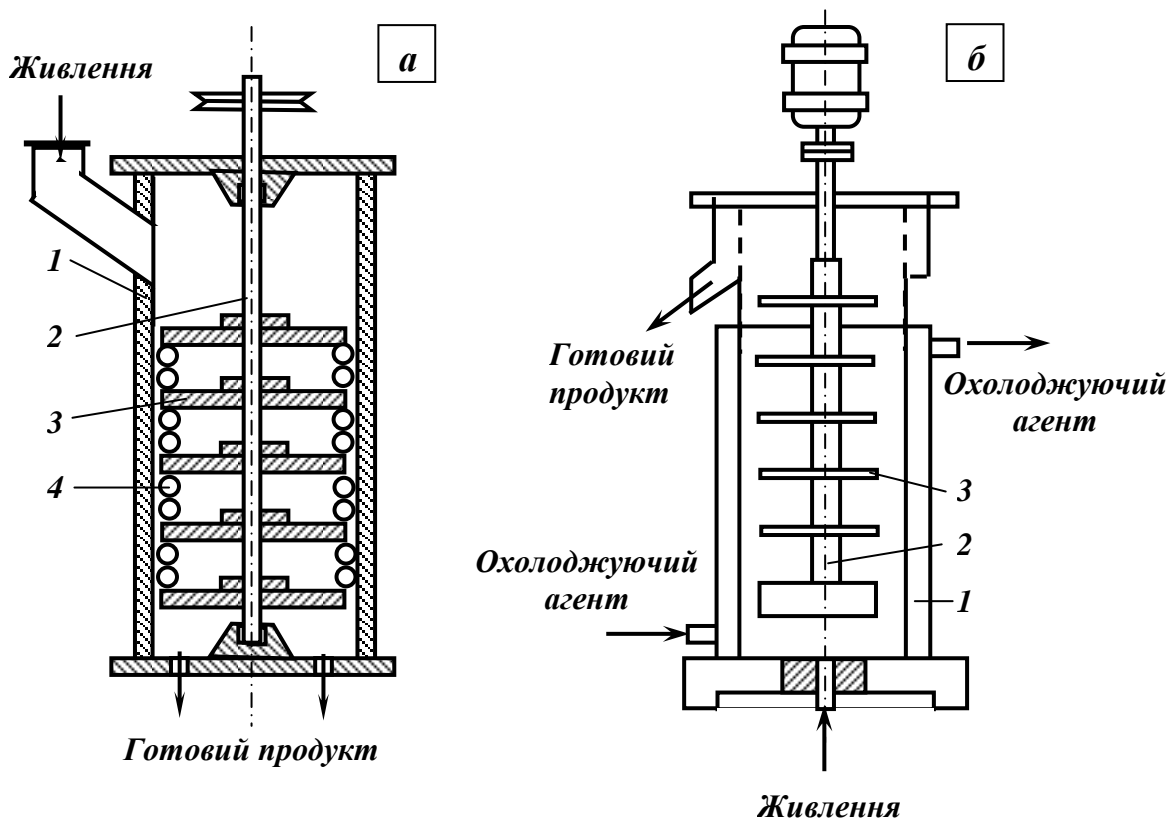


Рис. 3.19 – Схеми відцентрових млинів:

*а* – багатоканерний; *б* – бісерний.

1 – барабан; 2 – ротор-вал; 3 – водило; 4 – ролики.

Для дуже тонкого подрібнення застосовується *бісерний млин* (рис. 3.19 *б*) аналогічної конструкції, де як подрібнювальне середовище використовується металічний дріб, керамічні і мінеральні зносостійкі частинки розміром від 1 до 6 мм.

### 3.2.7 Конструкції вібраційних млинів

*Інерційний вібраційний млин* (рис. 3.20) складається з барабана *1*, який опирається на пружини *3*. Барабан завантажується кулями на 80 – 90 % об'єму. У барабані на підшипниках *б* встановлений дебалансний вал *2*, який приводиться у рух від електродвигуна *4*. Для виключення передачі вібрацій від барабана до електродвигуна застосовується гнучка муфта *5*.

При обертанні дебалансного вала з частотою від 1000 до 3000  $\text{хв}^{-1}$  барабану з кулями і матеріалом, що подрібнюється, надається коливальний рух по еліптичній траєкторії, близькій до колової. При цьому виникає обертальний рух подрібнювального середовища у напрямку, протилежному напрямку обертання вібратора (дебалансного вала). Розпушення, коливання й інтенсивне взаємне переміщення подрібнювальних тіл

зумовлює подрібнення матеріалу у млині. Подрібнення здійснюється ударом і стиранням.

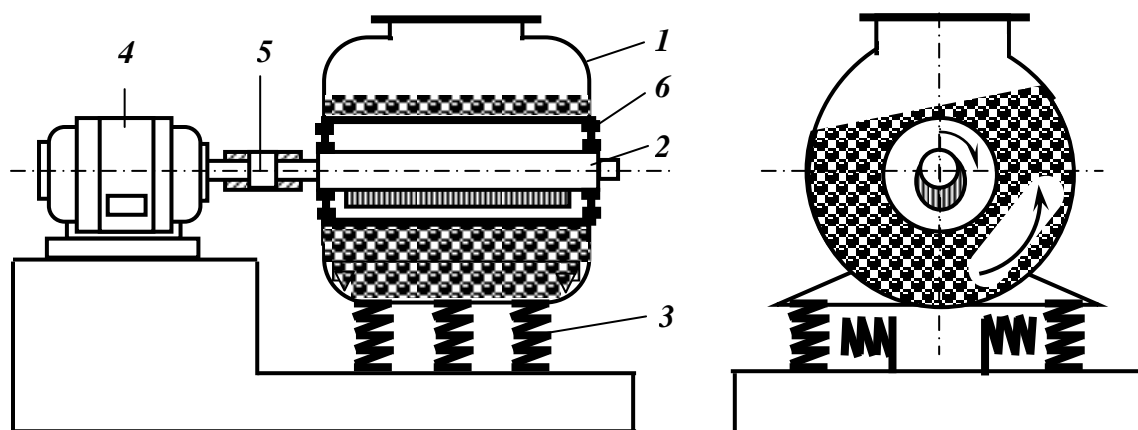


Рис. 3.20 – Схема інерційного вібраційного млина.

1 – барабан; 2 – дебалансний вал; 3 – пружини; 4 – електродвигун;  
5 – гнучка муфта; 6 – підшипники.

У безперервно діючий вертикальний вібраційний млин (рис. 3.21) вихідний матеріал надходить через центральну трубу 1, звідки потрапляє у завантажувальну камеру 2 і після розподільного пристрою 3 направляється у радіальні камери 4. Подрібнений продукт видаляється з розвантажувальної камери 5, розташованої у нижній частині млина.

Секція привода 6 установлена на гумових амортизаторах 7.

Млин приводиться у коливальний рух вздовж вертикальної осі інерційним віброзбуджувачем, що складається з двох валів-дебалансів 8, з'єднаних з синхронізаторами пружними муфтами 9. Електродвигун 10 за допомогою клиноремінної передачі з'єднаний з валом синхронізатора обертання.

Матеріал, що подрібнюється, постійно переміщується в камері подрібнення. Інтенсивний вібраційний вплив на шар матеріалу сприяє постійній і інтенсивній переорієнтації частинок одна відносно одної в робочій зоні, що підвищує імовірність руйнування усіх слабких зон в об'ємі кожної частинки.

За кожний цикл переміщення частинка мінералу змінює орієнтацію по відношенню до сусідніх частинок, тим самим створюються умови для примусового самоподрібнення: частинка з малими дефектами структури (більш міцна) руйнує сусідню з більшими дефектами структури. При цьому також прискорюється видалення дріб'язку, який накопичується між частинками, що, в свою чергу, обумовлює зменшення витрат енергії і зниження переподрібнення матеріалу.

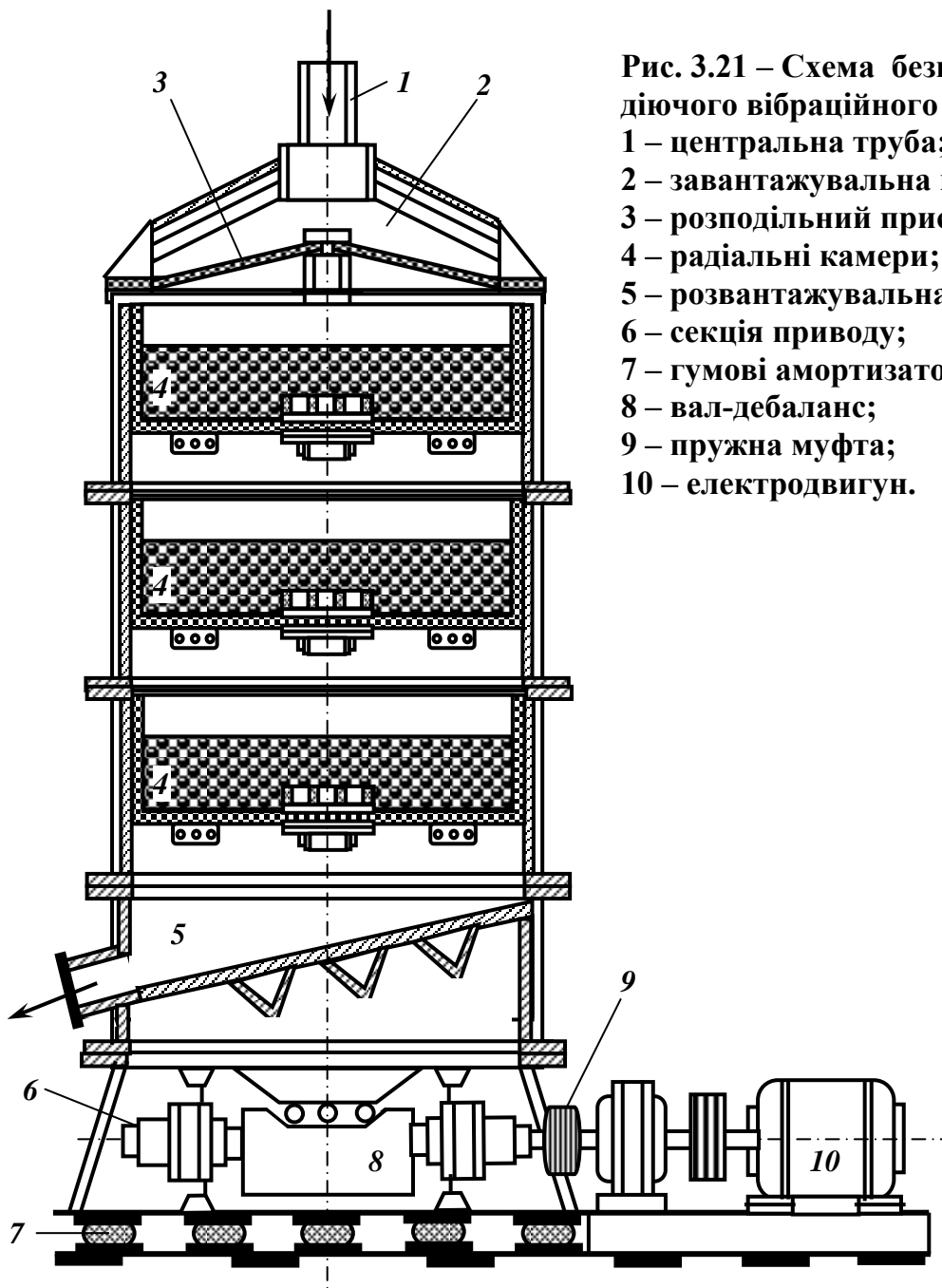


Рис. 3.21 – Схема безперервно діючого вібраційного млина.

- 1 – центральна труба;
- 2 – завантажувальна камера;
- 3 – розподільний пристрій;
- 4 – радіальні камери;
- 5 – розвантажувальна камера;
- 6 – секція приводу;
- 7 – гумові амортизатори;
- 8 – вал-дебаланс;
- 9 – пружна муфта;
- 10 – електродвигун.

Вібраційні млини можуть працювати у періодичному і безперервному режимі. Вони можуть застосовуватись для сухого і мокрого подрібнення. Подрібнений продукт вібраційних млинів більш однорідний за крупністю ніж барабанних млинів. Вібраційні млини можна використовувати для подрібнення таких матеріалів, які не подрібнюються у барабанних млинах (напр., слюди).

Вібраційні млини застосовуються для тонкого і надтонкого подрібнення різних матеріалів крупністю до 0,25 мм в хімічній промисловості, при виробництві будівельних матеріалів, силікатних та інших виробів. Крупність подрібненого продукту складає до 1 мкм. Однак у гірничорудній промисловості вони не використовуються з таких причин:

- залежність крупності живлення від розмірів куль і амплітуди коливань млина (розмір зерна матеріалу не повинен перевищувати 0,1 діаметра кулі);
- при зміні крупності живлення змінюється крупність подрібненого продукту;
- непридатність для подрібнення в'язких матеріалів;
- мала продуктивність вібраційних млинів – до 5 т/год (при збільшенні розмірів млина його питома продуктивність різко зменшується).

### 3.2.8 Конструкції млинів ударної дії

У млинах ударної дії подрібнення відбувається внаслідок зіткнення частинок з робочими елементами ротора, які швидко обертаються у нерухомому корпусі. До цього типу млинів відносяться дезінтегратори і дисмембратори.

Дезінтегратор (рис. 3.22 *а*) складається з двох роторів, які насажені на окремі вали і обертаються у протилежні сторони.

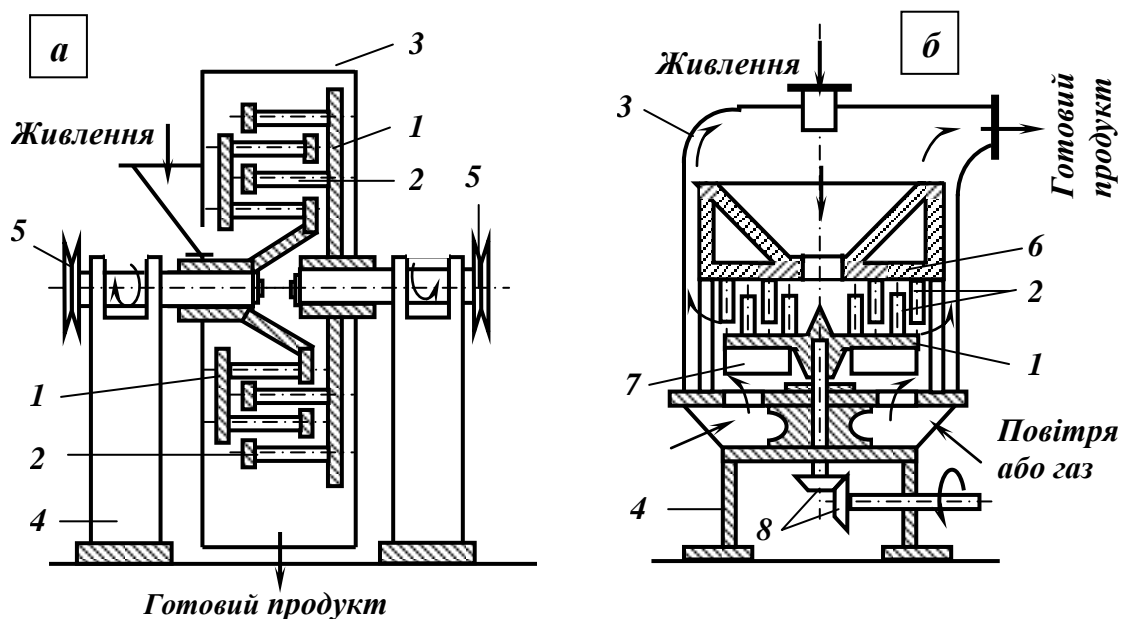


Рис. 3.22 – Схеми млинів ударної дії:

*а* – дезінтегратор; *б* – дисмембратор.

1 – диск ротора; 2 – пальці (бичі); 3 – корпус; 4 – станина; 5 – шків;

6 – нерухомий диск; 7 – лопатки вентилятора; 8 – конічні шестерні.

На дисках *1* роторів концентрично розташовані пальці (бичі) *2*. Кожен ротор має по два ряди концентрично розташованих пальців. Ротори входять один в один таким чином, що концентричні кола з пальцями одного ротора розташовуються усередині концентричних кіл з пальцями іншого ротора. Вільні кінці бичів для жорсткості зв'язані кі-

льцями. На вільних кінцях роторних валів насаджені приводні шківни 5. Обертальний рух від електродвигунів передається валам роторів через шківни і клинопасову передачу.

Вихідний матеріал через завантажувальну лійку, закріплену на корпусі 3, подається у центральну частину ротора дезінтегратора. При просуванні униз матеріал потрапляє під удар внутрішнього ряду бичів, подрібнюється і відкидається на наступний ряд бичів, які обертаються у протилежний бік. Під ударами другого ряду бичів відбувається подальше подрібнення і відкидання зерен на третій ряд і т.д. Подрібнений продукт розвантажується униз – під дезінтегратор. У дезінтеграторах одночасно з подрібненням відбувається й перемішування компонентів вихідного матеріалу.

Ступінь подрібнення у дезінтеграторах досягає 40, але вони рідко працюють при ступенях подрібнення більших 10, тому що при великих ступенях подрібнення різко знижується продуктивність. Ступінь подрібнення дезінтеграторів регулюється зміною швидкості обертання роторів.

Дисмембратор (рис. 3.22 б) за конструкцією аналогічний дезінтегратору, але на відміну від дезінтегратора у дисмембраторі обертається тільки один диск 1, другий диск 6 – нерухомий. Завдяки вентилятору 7 подрібнений продукт виносяться потоком повітря або газу у розвантажувальну камеру, яка розташована зверху.

Дисмембратори випускають з горизонтальним і вертикальним розташуванням ротора.

### 3.2.9 Конструкції аеродинамічних млинів

Аеродинамічні млини класифікуються на млини струминного, вибухово-струминного і вибухового типів.

Дія *струминних млинів* оснований на використанні енергії газу або пари. Газ або пара під певним тиском подається у камеру ежектора, захоплює твердий матеріал, розганяє його до певної швидкості. Зерна матеріалу з дуже великою швидкістю рухаються у газовому струмені і руйнуються при ударі об відбійну плиту або у результаті взаємного зіткнення частинок при тангенціальній подачі потоку газу у камеру подрібнення, або при ударах зерен протилежно направлених струменів. Інколи вхідний струмінь газу підігривають до температури при якій міцність подрібнюваного матеріалу мінімальна. Схема установки газоструминного подрібнення наведена на рис. 3.23.

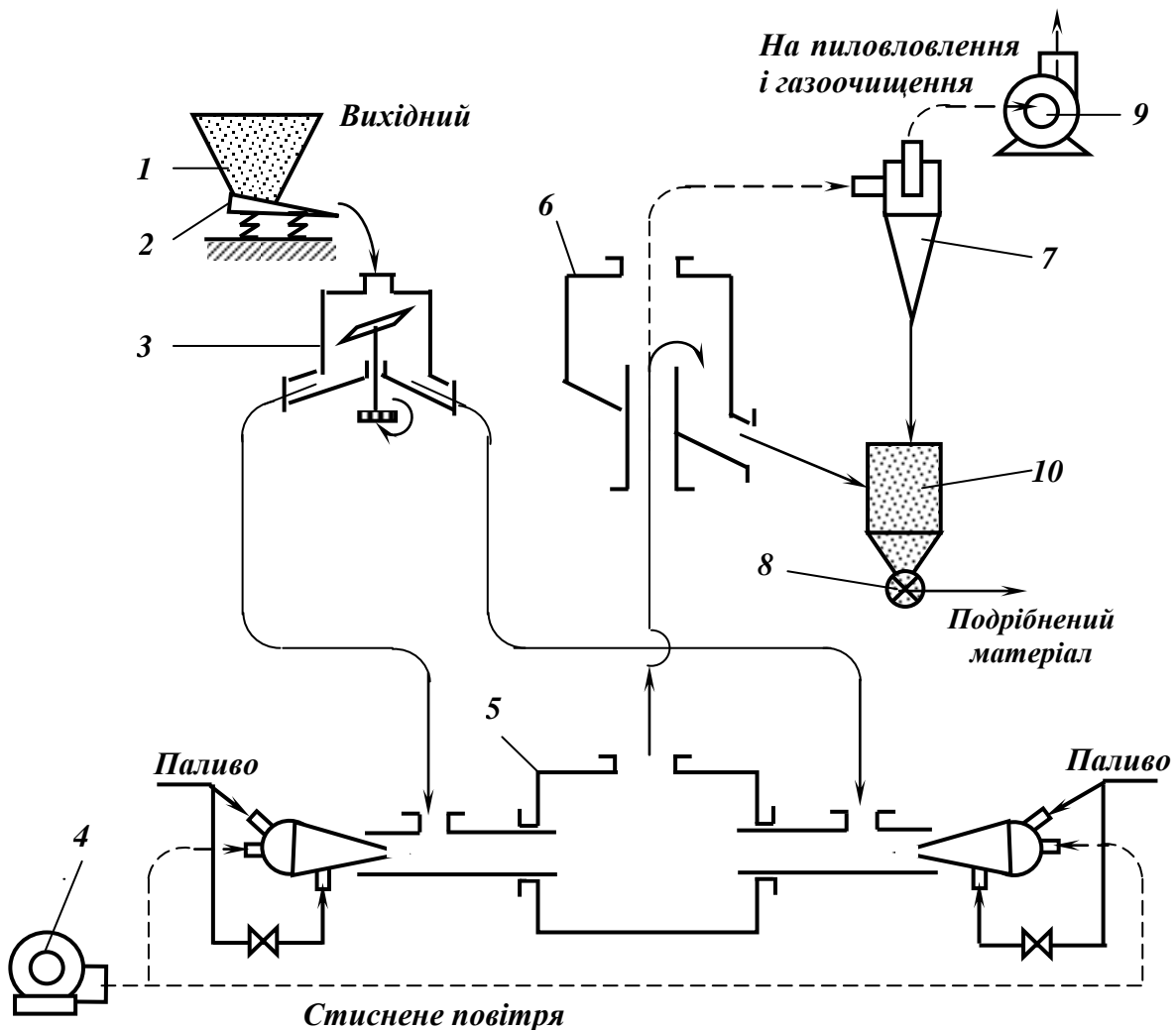


Рис. 3.23 – Схема установки газоструминного подрібнення.

1 – бункер вихідного матеріалу; 2 – живильник; 3 – розподільник потоку; 4 – турбовітроудувка; 5 – газоструминний млин; 6 – осаджувач; 7 – циклон; 8 – шлюзовий затвор; 9 – вентилятор; 10 – бункер готового продукту.

Потоком відпрацьованого газу подрібнений матеріал виноситься з помельної камери у осаджувач 7, а потім у циклон 8. Розрідження у помельній камері, осаджувачі і циклоні створюється вентилятором 9. Після циклона газ вентилятором подається на фільтри тонкого очищення.

Ступінь подрібнення матеріалу у газоструминних млинах складає 3 – 3,5. Подрібнення здійснюється переважно у результаті зіткнення частинок (удар) і частково тертям.

Струминні млини можуть бути застосовані для тонкого подрібнення руд, цементу, кварцового піску, вугілля, вапняку, цирконію та інших корисних копалин.

Головні переваги струминного подрібнення у порівнянні з подрібненням у барабанних млинах такі: низька металоємність, відсутність рухомих деталей, більша однорідність матеріалу по крупності, селектив-

вність подрібнення і більш високе розкриття зростків, мінімальна ступінь забруднення продукту, можливість поєднування подрібнення з сушкою і випалом.

Головні недоліки полягають у складності виділення готового продукту з газу і очищення газу, мала продуктивність. Тому при збагаченні корисних копалин струминні млини мають обмежене застосування.

*Вибухово-струминний процес подрібнення* оснований на використанні ефекту руйнування під дією внутрішніх сил розтягання матеріалів при миттєвому знятті з них зовнішнього тиску.

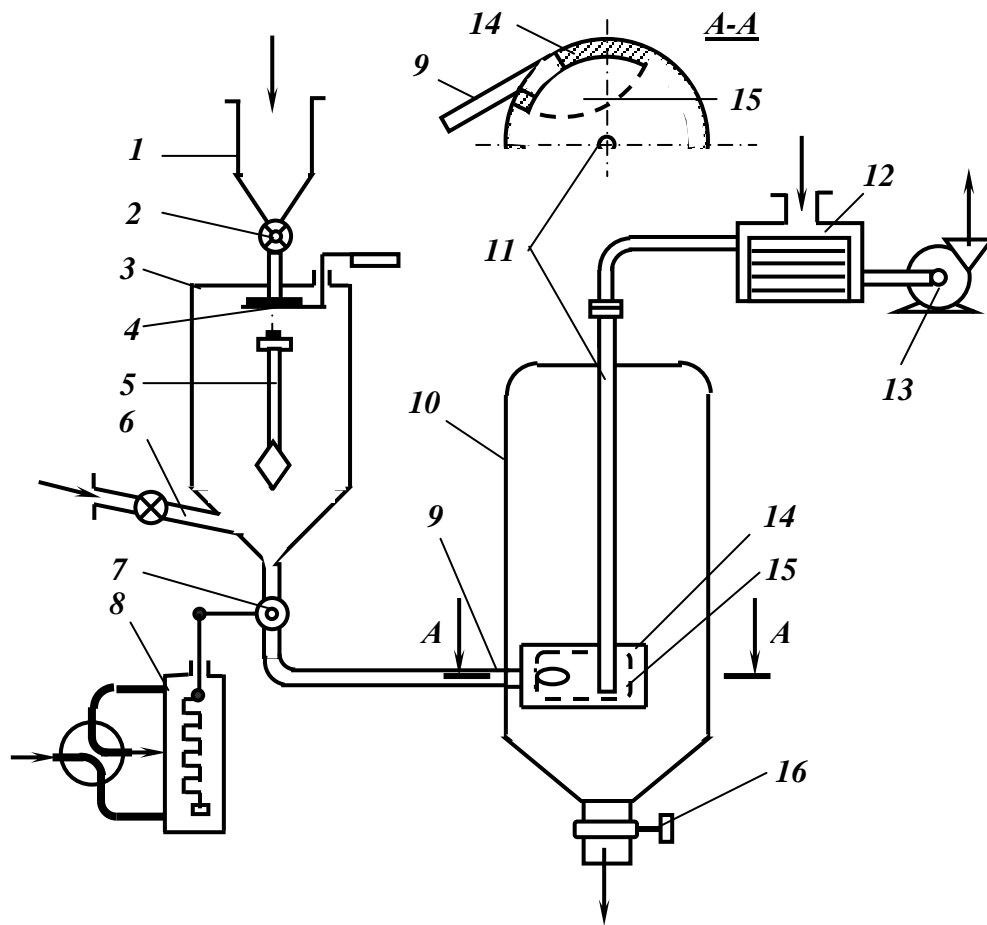
Схема установки для вибухово-струминного процесу подрібнення наведена на рис. 3.24.

Вихідний матеріал крупністю 1 – 2 мм завантажується у лійку **1** і за допомогою клапана **2** подається у камеру стиску **3**. У середині камери **3** є затвор **4** завантажувального пристрою і механізм **5** для запобігання забивання камери матеріалом.

Після заповнення камери **3** матеріалом до визначеного рівня затвор **4** щільно закривається і по трубі **6** у камеру подається пара або газ протягом 5с – часу необхідного для створення потрібного тиску (16 МПа). Потім за допомогою автоматичного пристрою **8** відкривається швидкодіючий клапан **7** (час відкриття 0,01 – 0,02 с) і вміст камери **3** викидається по трубопроводу **9** з швидкістю, близькою до швидкості звуку, у камеру низького тиску **10**, об'єм якої приблизно у 50 разів більше, ніж у камері **3**. При виході з сопла суміш частинок і пари потрапляє у зону зниженого тиску **15**, де й відбувається вибуховий ефект. Розрідження у камері **10** підтримується експаустером **13**. Руйнуванню частинок також сприяють ударні хвилі, що виникають при зіткненні з відбивною плитою **14**. З камери **10** пара по вихлопній трубі **11** надходить у конденсатор **12** і відсмоктується експаустером. Подрібнений продукт розвантажується з камери **10** за допомогою затвору **16**.

Руйнування частинок при вибухово-струминному подрібненні відбувається в основному при русі матеріалу по трубопроводу-соплу. Завдяки різкому спрацьовуванню швидкодіючого клапана, а також великому перепаду тиску (між камерами високого і низького тиску) швидкість руху робочого газоподібного середовища миттєво досягає швидкості звуку. Це служить причиною утворення звукових ударних хвиль, що поглинаються і відбиваються міжзерновими поверхнями, які є границями розділу середовищ з різними проникностями. У результаті виникають напруження на міжзернових границях, що є однією з причин руйнування частинок. Найбільш інтенсивний етап руйнування має місце на зрізі трубопровода-сопла при вході в камеру низького тиску. Різниця внутрішнього (в об'ємі частинки) і зовнішнього (в камері) тиску приво-

дить до розвитку тріщин. Остаточо процес руйнування завершується при ударі частинок з ослабленою міцністю об відбійну плиту або при зіткненні зустрічних потоків.



**Рис. 3.24 – Схема установки вибухово-струминного подрібнення.**  
 1 – завантажувальна лійка; 2 – клапан; 3 – камера стиску; 4 – затвор;  
 5 – спеціальний механізм; 6 – труба; 7 – швидкодіючий клапан;  
 8 – автоматичний пристрій; 9 – трубопровід-сопло; 10 – камера низького тиску; 11 – вихлопна труба; 12 – конденсатор; 13 – ексгаустер; 14 – відбивна плита; 15 – зона зниженого тиску; 16 – затвор.

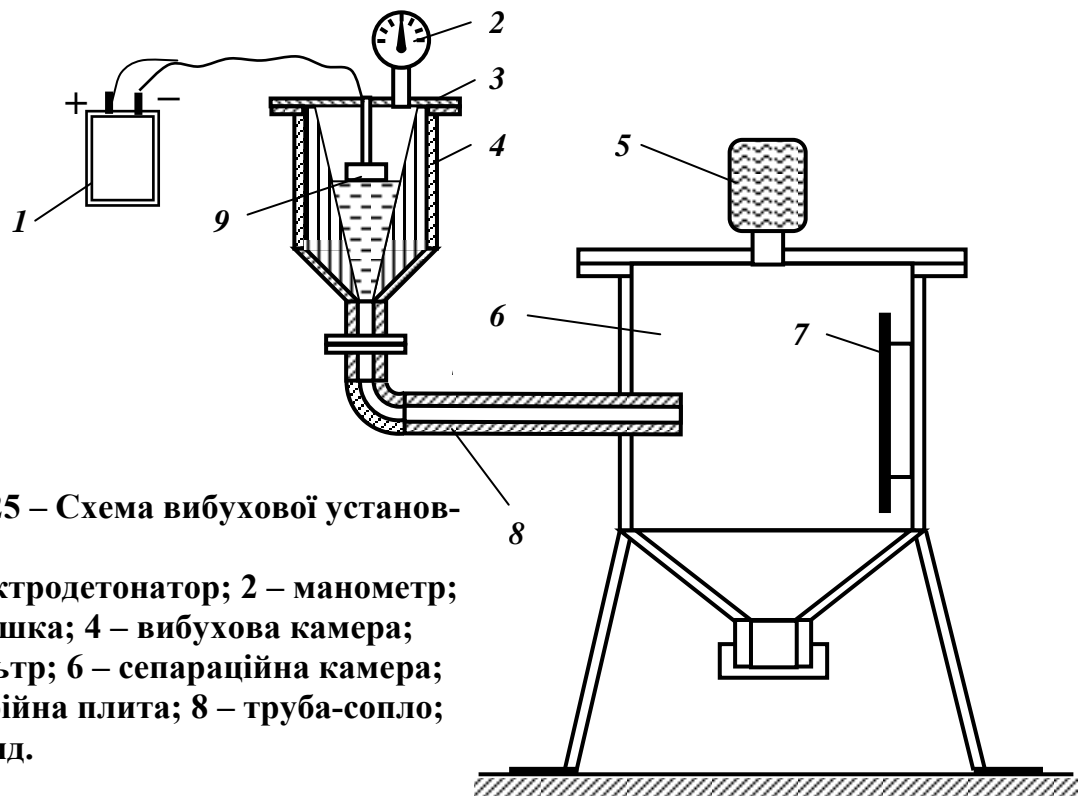
Руйнування *вибухом* у порівнянні з традиційним механічним дробленням і подрібненням характеризується значно більшою частиною енергії, що витрачається корисно. Руйнування вибухом здійснюється в основному за рахунок розвитку тріщин під дією зусиль розтягнення, які утворюються в масиві гірської породи, і розклинювання газами. Тріщини, як правило, беруть початок від макродефектів в структурі масиву, чим обумовлюється селективність вибухового руйнування.

Для руйнування вибухом має значення не тільки кількість енергії в заряді, але й спосіб її передачі оточуючому масиву. Зайва швидкість її передачі веде до великих втрат на невідновлювальній деформації. Таким



чином, необхідно збільшити час виділення енергії від вибуху й забезпечити багатократне навантаження масиву.

*Конструкція вибухової установки* (рис. 3.25) для подрібнення руд розроблена на основі принципу створення надлишкового тиску в негерметичній посудині у результаті утворення газоподібних продуктів при вибуху.



**Рис. 3.25 – Схема вибухової установки.**

- 1 – електродетонатор; 2 – манометр;**
- 3 – кришка; 4 – вибухова камера;**
- 5 – фільтр; 6 – сепараційна камера;**
- 7 – відбійна плита; 8 – труба-сопло;**
- 9 – заряд.**

Основний елемент установки – товстостінна стальна камера **4** зі знімною кришкою **3**, на якій встановлений манометр **2**. У камері **4** над матеріалом або усередині нього поміщається заряд **9** вибухової речовини, який ініціюється електродетонатором **1**. До нижньої конічної частини камери приєднана труба-сопло **8**.

У результаті вибуху відбувається подрібнення матеріалу. Поток газів подрібнений продукт виноситься у камеру **6**, де він гальмується відбійною плитою **7**. Відділення газової фази від твердого продукту здійснюється за допомогою фільтра **5**.

Подрібнення на вибуховій установці здійснюється за один цикл. Величина заряду підбирається експериментально такою, щоб у вибуховій камері утворився тиск газу біля 2 МПа при коефіцієнті викиду продуктів подрібнення не менше 80 %.

В порівнянні з кульовим подрібненням процес вибухового подрібнення характеризується більш високими продуктивністю і селективніс-

ттю розкриття зерен корисних копалин та дещо меншими витратами енергії.

### 3.3 Подрібнення у барабанних млинах

#### 3.3.1 Швидкісні режими роботи млинів

Механічний режим роботи барабанного млина характеризують два основних показника:

– відносна частота обертання барабана  $\psi$ , яка дорівнює відношенню фактичної частоти обертання  $n$  до умовної критичної частоти обертання  $n_{кр}$ :

$$\psi = n/n_{кр}; \quad (3.27)$$

– відносне заповнення млина подрібнювальними тілами  $\varphi$ , яке дорівнює відношенню об'єму подрібнювальних тіл  $V_n$  до внутрішнього об'єму барабана млина  $V$ :

$$\varphi = V_n/V, \quad (3.28)$$

де  $\psi$  і  $\varphi$  – вимірюються у частках одиниці;  $n$  і  $n_{кр}$  – у  $\text{хв}^{-1}$ ;  $V_n$  і  $V$  – у  $\text{м}^3$ .

Умовна критична частота обертання барабана млина відповідає такій частоті обертання, при якій сила інерції обертального руху подрібнювального тіла з центром ваги на внутрішній поверхні барабана дорівнює силі ваги цього тіла. У цьому випадку подрібнювальне тіло нескінченно малих розмірів, підняте у верхню точку барабана, знаходиться у динамічній рівновазі, тобто не відривається від поверхні барабана (футеровки) і обертається разом з нею як одне ціле (центрифугує). Умовна критична швидкість визначається за формулою:

$$n_{кр} = 30\sqrt{2g}/\pi\sqrt{D} \cong 42,3\sqrt{D}, \text{ хв}^{-1}, \quad (3.29)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $D$  – внутрішній діаметр барабана млина,  $\text{м}$ .

Відношення об'єму подрібнювальних тіл до внутрішнього об'єму барабана млина (параметр  $\varphi$ ) визначається за формулою:

$$\varphi = V_n/V = 4G_n/\delta_n\pi D^2 L, \quad (3.30)$$

де  $G_n$  – маса подрібнювальних тіл, т;  $\delta_n$  – насипна густина подрібнювальних тіл, т/м<sup>3</sup>;  $L$  – довжина барабана, м.

Насипна густина подрібнювальних тіл залежить від їхнього фракційного складу і густини матеріалу. При приблизних розрахунках приймають насипну густину куль  $\delta_k = 4,6$  т/м<sup>3</sup>, насипну густину стержнів  $\delta_c = 6,6$  т/м<sup>3</sup>.

Подрібнювана маса при обертанні барабаних млинів залучається у рух силами тертя, які виникають між внутрішньою поверхнею барабана (футеровкою) і прилеглим до неї шаром подрібнювального середовища, а також внаслідок тертя між іншими шарами подрібнювальних тіл.

У будь-якій точці колової траєкторії (рис. 3.26) на тіло діють відцентрова сила  $Q$ :

$$Q = mv^2/R, \quad (3.31)$$

і сила ваги  $G$ , радіальна  $N$  і тангенціальна  $T$  складові якої є:

$$N = G \cos \alpha = mg \cos \alpha; \quad (3.32)$$

$$T = G \sin \alpha = mg \sin \alpha, \quad (3.33)$$

де  $m$  – маса тіла;  $v$  – лінійна швидкість тіла на коловій траєкторії;  $R$  – радіус колової траєкторії тіла;  $\alpha$  – кут між радіусом  $R$ , на якому знаходиться тіло і вертикальним діаметром барабана.

При незмінній частоті обертання барабана і при відсутності ковзання відцентрова сила  $Q$  зберігає своє значення і радіальний напрям по відношенню до колової траєкторії. Величина і напрям радіальної складової  $N$  сили ваги  $G$  змінюються залежно від положення тіла на коловій траєкторії. При деякій швидкості руху подрібнювального тіла будь-якого шару розташованого на коловій траєкторії, радіальна сила  $N$  у деякій точці  $A$  верхнього квадранта може стати рівною відцентровій силі  $Q$ . При швидкості  $v$ , що дорівнює коловій швидкості руху центра подрібнювального тіла по коловій траєкторії радіуса  $R$ , це тіло від точки  $A$  буде рухатися під дією сили ваги, як тіло кинуте зі швидкістю  $v$  під деяким кутом  $\alpha$  до горизонту, тобто по параболічній траєкторії.

В точці  $A$  мають місце такі співвідношення:  $Q = N$ , тобто  $mv^2/R = G \cos \alpha = mg \cos \alpha$  або  $v^2 = Rg \cos \alpha$ . Оскільки  $v = \pi Rn / 30$ , фактична частота обертання барабана  $n$  буде:

$$n = 30 \sqrt{g \cos \alpha} / \pi \sqrt{R} = n_{кр} \sqrt{\cos \alpha}, \text{ хв}^{-1}. \quad (3.34)$$

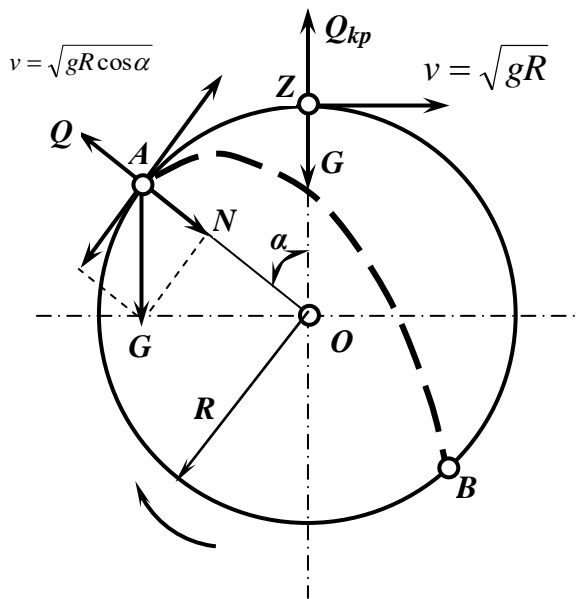


Рис. 3.26 – Сили, які діють на кулю у верхньому квадранті при її русі по круговій траєкторії.

Формула (3.34) визначає частоту обертання барабана млина, необхідну для того, щоб подрібнювальне тіло перейшло з колової траєкторії радіуса  $R$  на параболічну при куті відриву  $\alpha$ . При куті відриву  $\alpha = 1 \cos \alpha = 1$  і  $n = n_{кр}$ , тобто у цьому випадку тіло піднімається по коловій траєкторії до найвищої точки  $Z$  і залишається на коловій траєкторії. З формул (3.27) і (3.34) випливає, що

$$\psi = n/n_{кр} = \sqrt{\cos \alpha}, \quad (3.35)$$

тобто відносна частота обертання барабана характеризується кутом відриву зовнішнього шару подрібнювальних тіл при переході їх з колової на параболічну траєкторію.

Сили тертя залежать від коефіцієнта тертя і нормального тиску на внутрішню поверхню барабана, що здійснюється радіальними складовими  $N$  сили ваги і відцентровими силами  $Q$ .

Тангенціальні складові  $T$  сили ваги намагаються повернути подрібнювальне середовище проти напрямку обертання барабана. У нижніх квадрантах, де радіальні  $N$  і відцентрові  $Q$  сили спрямовані в один бік, на поверхню барабана чиниться найбільший тиск. Тут й виникає найбільше тертя, що створює «підпір», який забезпечує обертання подрібнювального середовища. При переході у верхній квадрант радіальна і відцентрова сили направлені у протилежні сторони, тому тиск на поверхню барабана і тертя зменшуються.

Коефіцієнт тертя залежить від властивостей матеріалу, що подрібнюється, профілю внутрішньої поверхні барабана (футеровки), густини

і в'язкості пульпи. При низькому коефіцієнті тертя, невеликих об'ємах завантаження (20 – 30 %) подрібнювального середовища (особливо куль) тиск може бути недостатнім і зовнішній шар подрібнювального середовища ковзатиме по поверхні барабана або один шар подрібнювальних тіл по іншому. При цьому відбувається обертання подрібнювальних тіл. При заповненні подрібнювальним середовищем на 40 – 50 % і негладкій футеровці ковзання зовнішніх шарів подрібнювальних тіл практично відсутнє, але ковзання внутрішніх шарів одного по іншому при різних режимах роботи млина спостерігається. При одношаровому заповненні барабана млина подрібнювальними тілами, особливо кулями або стержнями, вони обертаються навколо власної осі, яка паралельна осі обертання барабана, і при гладкій футеровці не втягуються у круговий рух навіть при високих швидкостях обертання барабана.

При багатшаровому заповненні барабана млина подрібнювальними тілами у залежності від частоти обертання можливий один з таких швидкісних режимів руху подрібнювальних тіл: каскадний, змішаний, водоспадний, субкритичний і надкритичний (рис. 3.27).

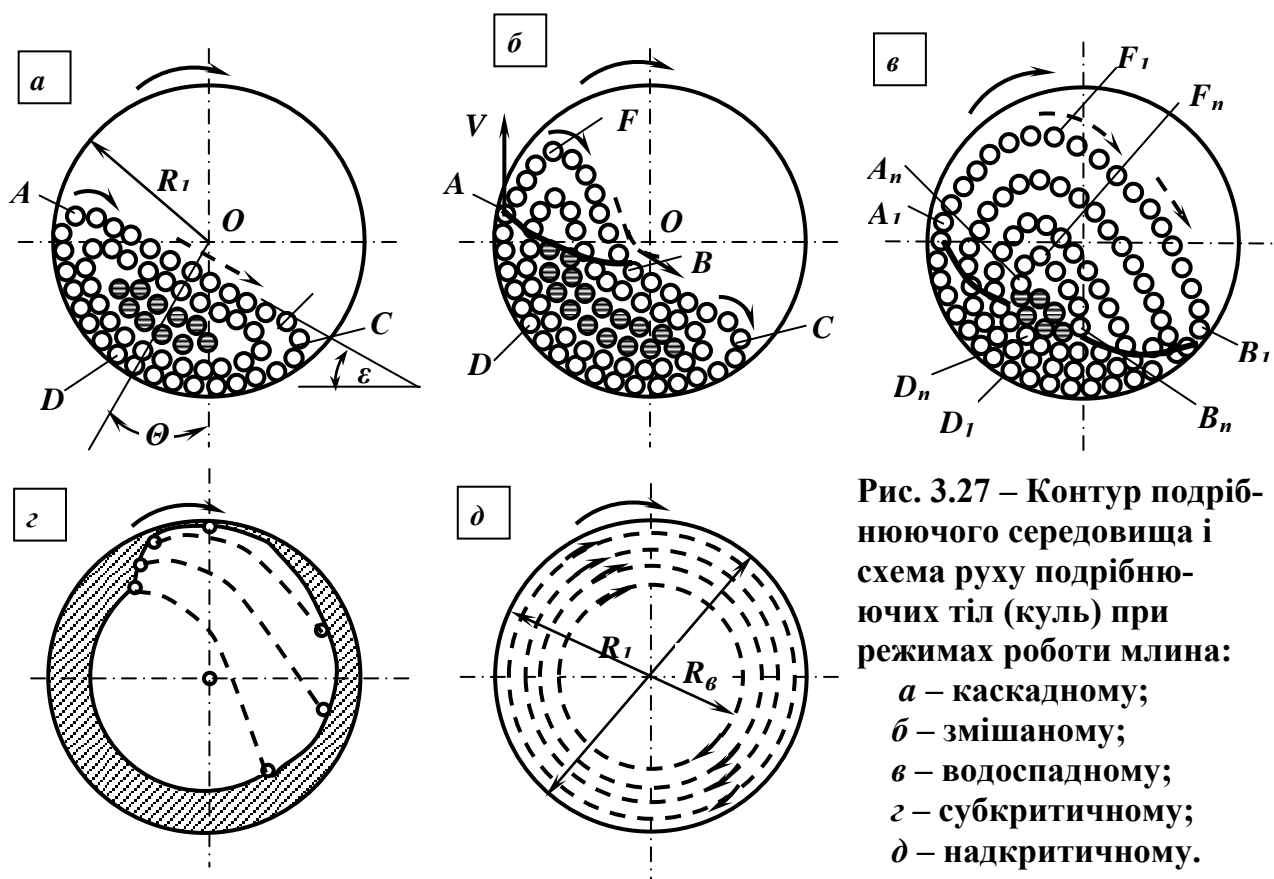


Рис. 3.27 – Контур подрібнюючого середовища і схема руху подрібнюючих тіл (куль) при режимах роботи млина:   
 а – каскадному;   
 б – змішаному;   
 в – водоспадному;   
 г – субкритичному;   
 д – надкритичному.

*Каскадний режим* руху подрібнювальних тіл (рис. 3.27 а) реалізується при малій частоті обертання барабана (0,5 – 0,6 критичної), він характеризується перекочуванням подрібнювальних тіл без їх

польоту. При сталому каскадному режимі подрібнювальне середовище повертається на певний кут  $\Theta$  у бік обертання і залишається в такому положенні. Подрібнювальні тіла безупинно циркулюють усередині барабана по замкненим траєкторіям. Криволінійна поверхня природного укосу куль близька до площини  $AC$ , яка нахилена під деяким кутом  $\varepsilon$  до горизонту, при цьому цей кут дорівнює граничному куту повороту:  $\varepsilon = \Theta$ . Подрібнювальні тіла піднімаються по колових траєкторіях  $CDA$  на певну висоту і потім скочуються «каскадом» рівнобіжними шарами вниз від точки  $A$  до точки  $C$ . У центральній частині подрібнювального середовища є малорухома зона – «ядро» (кулі заштриховані). Подрібнення матеріалу відбувається роздавлюванням і стиранням. Каскадний режим є найбільш сприятливим для стержневих млинів, тому що при водоспадному і змішаному режимі вільний політ стержнів може привести до їх перекосів і аварійної зупинки млина. Для кульових млинів каскадний режим застосовується при мокрому і сухому подрібненні неміцних матеріалів (при виробництві цементу, підготовці пиловугільного палива та ТЕС і т.п.).

*Змішаний режим* руху подрібнювальних тіл (рис. 3.27 б) характеризується поступовим переходом від суто каскадного до суто водоспадного режиму. При цьому зовнішня частина подрібнювальних тіл бере участь у вільному польоті по траєкторії  $AFB$ , внутрішня – перекочується усередині барабана по замкнених траєкторіях  $BCDA$ . При змішаному режимі у каскадному русі беруть участь також кулі, що розташовані між зовнішніми шарами і малорухомих «ядром». Подрібнення здійснюється ударом, роздавлюванням і стиранням. Такий режим спостерігається при проміжних значеннях частоти обертання барабана (0,6 – 0,76 критичної). Змішаний режим має місце при подрібненні руд у кульових млинах.

При *водоспадному режимі* (рис. 3.27 в) частота обертання барабана складає не менше 0,76 – 0,88 критичної. У цьому випадку основна маса подрібнювальних тіл піднімається по колових траєкторіях  $B_i D_i A_i$  на велику висоту, у точках  $A_i$  відхиляється від колової траєкторії і падає «водоспадом» по параболічних траєкторіях  $A_i F_i B_i$ . У точках  $B_i$  подрібнювальні тіла знов переходять на колові траєкторії відповідного шару. Подрібнення руди відбувається головним чином у результаті ударів подрібнювальних тіл і частково стиранням і роздавлюванням. Водоспадний режим застосовується у більшості промислових млинів при подрібненні великогрудкових і важкоподрібнюваних матеріалів.

*Субкритичний режим* (рис. 3.27 г) – частковий випадок водоспадного режиму, який здійснюється при частоті обертання барабана близькій до критичної або рівної їй. При цьому більшу частину циклу подріб-

нювальні тіла рухаються по коловій траєкторії і висота падіння їх незначна.

*Надкритичний режим* (рис. 3.27 *д*) здійснюється при частоті обертання барабана вище критичної, коли у центрифугування поступово вступають усі шари подрібнювального середовища. У момент, коли усі шари подрібнювального середовища починають центрифугувати, млин уподібнюється маховому колесу, витрата корисної енергії і робота подрібнення при цьому дорівнюють нулю.

Режим центрифугування усього подрібнювального середовища має місце при критичній частоті обертання внутрішнього шару подрібнювальних тіл і характеризується концентричним розташуванням їх у млині. Об'єм подрібнювальних тіл при цьому:

$$\varphi \pi R_n^2 L = \pi (R_3^2 - R_e^2) L, \quad (3.36)$$

звідки маємо

$$R_e = R_3 \sqrt{1 - \varphi}, \quad (3.37)$$

де  $R_e, R_3$  – радіус внутрішнього і зовнішнього шарів подрібнювального середовища при його центрифугуванні.

Критична частота обертання внутрішнього шару подрібнювального середовища, необхідна для центрифугування усіх куль у млині визначається за формулою:

$$n_0 = 30 \sqrt{g} / \pi \sqrt{R_e} = n_{кр} / \sqrt[4]{1 - \varphi}. \quad (3.38)$$

Залежність (3.38) правильна при відсутності ковзання подрібнювального середовища по поверхні барабана і між шарами, при наявності ковзання – частота обертання барабана повинна бути вищою.

Млин може працювати при надкритичній частоті обертання барабана за умови, що кулі ковзають по поверхні футеровки і не набувають достатньої для центрифугування швидкості. Субкритичний режим нестійкий, тому що при зміні коефіцієнта тертя (за рахунок зміни міцності, крупності і вологості руди) млин може перейти у режим махового колеса. При виборі частоти обертання барабана млина, коли центрифугує тільки зовнішній шар подрібнювального середовища, може спостерігатись явище самофутерування барабана.

Усі режими роботи млина пов'язані між собою і можуть переходити один в інший у залежності від зміни умов подрібнення (ступені заповнення подрібнювальними тілами  $\varphi$ , відносної частоти обертання  $\psi$ ,

зносу футеровки, фізико-механічних властивостей матеріалу, густини пульпи і т.д.).

### 3.3.2 Рівняння параболічної і колової траєкторій руху кулі у млині

При каскадному режимі роботи млина (рис. 3.28) подрібнювальні тіла, що розташовані у зовнішньому і прилеглих до нього шарах, рухаються за круговими траєкторіями.

Тіла, що розташовані у верхній частині відповідного шару у похилому сегменті (заштрихованому), скочуються або ковзають по похилій (прямолінійній чи криволінійній) траєкторії від точки *A* до точки *B*, які знаходяться на відповідній коловій траєкторії цього ж шару подрібнювального середовища. Потім подрібнювальні тіла рухаються по власним круговим траєкторіям від точки *B* до точки *A* і т.д.

Для виведення рівняння колової траєкторії руху кулі, запишемо рівняння кола у системі координат *XOY*:

$$X^2 + Y^2 = R^2. \quad (3.39)$$

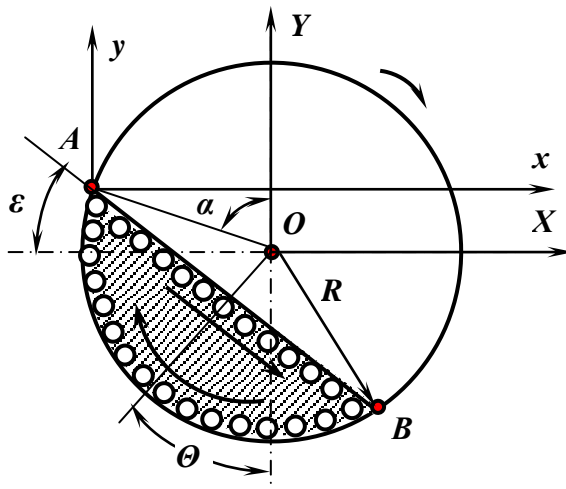


Рис. 3.28 – Кругова траєкторія руху кулі у млині.

При переносі початку координат з точки *O* в точку *A* координати точок кола будуть:

$$X = x - R \sin \alpha, \quad (3.40)$$

$$Y = y + R \cos \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут відриву подрібнювального середовища від внутрішньої поверхні барабана.



Рівняння колової траєкторії руху кулі отримуємо після підстановки залежностей (3.40) у формулу (3.39):

$$x^2 + y^2 - 2Rx \sin \alpha + 2Ry \cos \alpha = 0. \quad (3.41)$$

Граничне значення кута нахилу  $\varepsilon$  сегмента з однорозмірним стержневим навантаженням складає  $30^\circ$ , а з однорозмірним кульовим навантаженням – від  $20$  до  $35^\circ$  (залежно від взаємного розташування куль). Реальна величина кута повороту  $\Theta$  сектора подрібнювального середовища залежить від частоти обертання барабана, коефіцієнту тертя, гранулометричного складу подрібнювальних тіл, об'єму пульпи у млині і її реологічних властивостей.

*Водоспадний режим* роботи барабаних млинів найчастіше використовується на збагачувальних фабриках. При водоспадному режимі подрібнювальне тіло рухається по траєкторії, яка складається з двох ділянок – колової і параболічної (рис. 3.29). При переході кулі з колової траєкторії на параболічну в момент її відриву від внутрішньої поверхні барабана млина у точці  $A$ , куля має швидкість  $v$ . Ця швидкість  $v$  дорівнює коловій швидкості руху і спрямована під кутом відриву  $\alpha$  до горизонту.

Складові швидкості кулі в системі координат з началом у точці  $A$  :

$$v_x = v \cos \alpha,$$

$$v_y = v \sin \alpha.$$

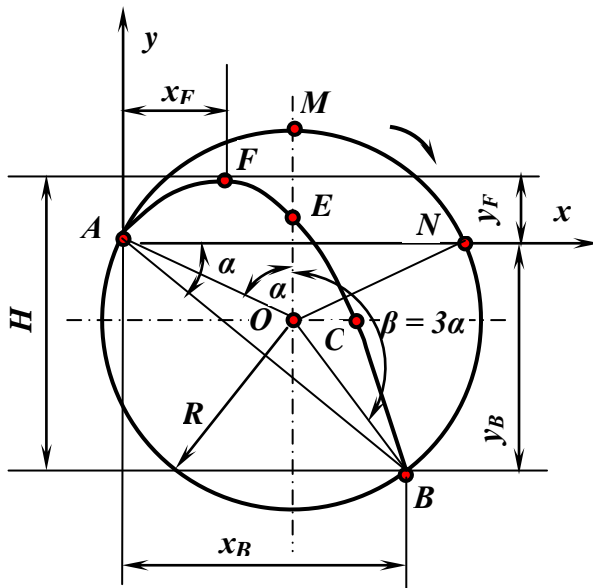


Рис. 3.29 – Характерні точки траєкторії руху кулі у млині.

Якщо у момент часу  $t$  від початку польоту куля знаходиться поблизу точки  $M$  на параболічній траєкторії, то її координати:

$$x = AN = (v \cos \alpha)t, \quad (3.42)$$

$$y = MN = (v \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}. \quad (3.43)$$

Після виключення  $t$  і заміни  $v$  за рівнянням:

$$v^2 = Rg \cos \alpha, \quad (3.44)$$

отримуємо:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{x^2}{2R \cos^3 \alpha}. \quad (3.45)$$

Формула (3.45) являє собою рівняння параболи. Характерними точками параболічної траєкторії руху кулі у млині є: точка падіння кулі на його колову траєкторію **B**, точка вершини параболи **F**, а також точки перетину траєкторії з вертикальним **E** і горизонтальним **C** діаметрами млина.

Точка **B** одночасно знаходиться на коловій і параболічній траєкторіях, тому її координати  $x_B$  і  $y_B$  визначаються рішенням системи рівнянь (3.41) і (3.45). В результаті цього отримуємо вираз:

$$\frac{x^3}{R \cos^4 \alpha} \cdot \left( \frac{x}{4R \cos^2 \alpha} - \sin \alpha \right) = 0$$

Рішення цього рівняння дозволяє одержати значення абсциси точки **A** ( $x_A = 0$ ), а також формулу для визначення абсциси точки **B**:

$$x_B = 4R \sin \alpha \cos^2 \alpha. \quad (3.46)$$

Після підстановки значення  $x_A$  і  $x_B$  у вираз (3.45) отримуємо відповідно значення ординати точки **A** ( $y_A = 0$ ) і формулу для визначення ординати точки **B**:

$$y_B = -4R \sin^2 \alpha \cos \alpha. \quad (3.47)$$

Для точки **F** ордината  $y_F = y_{\max}$ , тому для визначення  $x_F$  і  $y_F$  з рівняння (3.45) знаходимо максимум функції і першу похідну, що дорівнює нулю:

$$y' = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2x}{2R \cos^3 \alpha} = 0,$$

звідси координати точки **F** :

$$x_F = R \sin \alpha \cos^2 \alpha; \quad (3.48)$$

$$y_F = 0,5R \sin^2 \alpha \cos \alpha. \quad (3.49)$$

З використанням рівнянь траєкторії руху кулі можна визначити її координати точок перетину параболи з діаметрами барабана:

– координати *точки E* перетину з вертикальним діаметром:

$$x_E = R \sin \alpha; \quad (3.50)$$

$$y_E = 0,5Rtg^2 \alpha (2 \cos^2 \alpha - 1) / \cos \alpha; \quad (3.51)$$

– координати *точки C* перетину з вертикальним діаметром:

$$x_C = R \cos^2 \alpha (\sin \alpha + \sqrt{3 - \cos^2 \alpha}); \quad (3.52)$$

$$y_C = -R \cos \alpha. \quad (3.53)$$

Порівняння координат точок **F** і **B** показує, що:  $x_F = 0,25x_B$ ;  
 $y_F = 0,125y_B$ .

За рис. 3.29 визначаємо:

$$tg \angle NAB = y_B / x_B = -tg \alpha,$$

тобто вписаний кут, що опирається на дугу **NB**, за абсолютним значенням дорівнює  $\alpha$ , а дуга **NB** дорівнює  $2\alpha$ . Дуга **MN** також дорівнює  $\alpha$ , тому дуга **ANB** буде рівною  $4\alpha$ .

Дуга кола від точки відриву кулі до точки її падіння і відповідний їй центральний кут дорівнюють  $4\alpha$ .

Кут падіння кулі **BOM** складає  $\beta = 3\alpha$ .

Коловій траєкторії кулі відповідають дуга і кут:

$$2\pi - 4\alpha = 2(\pi - 2\alpha). \quad (3.54)$$

Геометричне місце точок переходу куль з колових траєкторій на параболічні (рис. 3.30) створюється точками перетину радіусів, що проведені під кутами відриву від відповідних колових траєкторій до вертикального діаметра млина.

Радіус колової траєкторії з кутом відриву  $\alpha$  визначається з формул:

$$v^2 = Rg \cos \alpha \text{ і } v = \pi Rn / 30;$$

$$R = \frac{g}{\pi^2} \cdot \left( \frac{30}{n} \right)^2 \cos \alpha. \quad (3.55)$$

При даній частоті обертання барабана млина  $n$  усі співмножники правої половини рівняння, крім  $\cos \alpha$ , будуть постійними:  

$$b = \frac{g}{\pi^2} \cdot \left(\frac{30}{n}\right)^2$$
, що дозволяє записати рівняння (3.55) у простішому вигляді:

$$R = b \cos \alpha, \quad (3.56)$$

де  $R$  – радіус-вектор, проведений з полюса  $O$  у будь-яку точку кола;  $b$  – діаметр допоміжного кола;  $\alpha$  – кут, створений радіусом-вектором і полярною віссю.

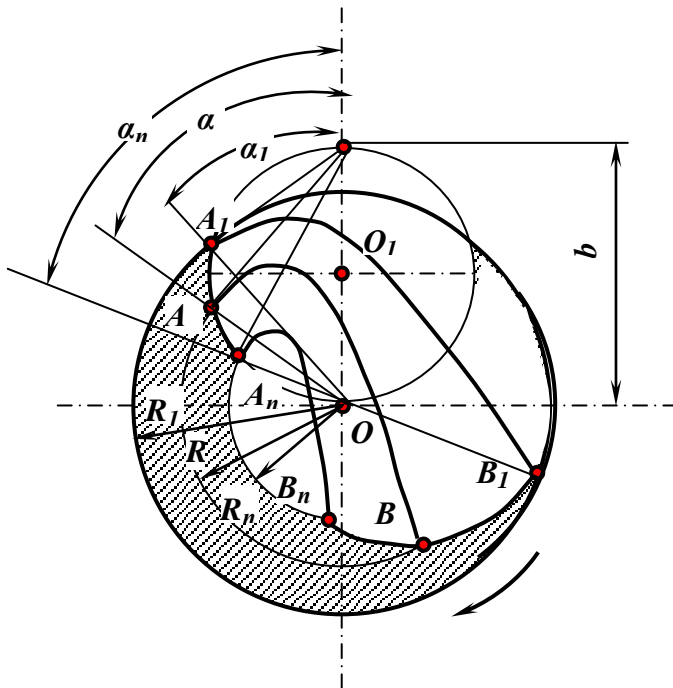


Рис. 3.30 – Геометричне місце точок переходу (відриву) куль з колових траєкторій на параболічні.

Рівняння (3.56) є рівнянням кола у полярних координатах, воно визначає відстань від осі обертання млина  $O$  до точки  $A$  переходу куль з колової траєкторії на параболічну під кутом  $\alpha$ . Перетин колових траєкторій з цим колом й визначає геометричне місце точок  $A_1, A, A_n$  переходу куль на параболічні траєкторії.

При постійному ступені заповнення млина кулями  $\varphi$  і незмінній частоті обертання його барабана  $n$  з рівняння (3.34) отримуємо дві рівності для визначення  $n$  по зовнішньому і по внутрішньому шарам куль:

$$n = \frac{30\sqrt{g}}{\pi\sqrt{R_1}} \sqrt{\cos \alpha_1} \quad \text{і} \quad n = \frac{30\sqrt{g}}{\pi\sqrt{R_n}} \sqrt{\cos \alpha_n}.$$

При порівнянні цих рівностей одержимо:

$$R_n = R_1 (\cos \alpha_n / \cos \alpha_1). \quad (3.57)$$

Якщо позначити:

$$\cos \alpha_n / \cos \alpha_1 = k, \quad (3.58)$$

маємо:

$$R_n = kR_1 \quad (3.59)$$

і

$$\cos \alpha_n = k \cos \alpha_1 = k\psi^2, \quad (3.60)$$

звідки

$$\alpha_1 = \arccos \varphi^2 \quad \text{і} \quad \alpha_n = \arccos k\varphi^2,$$

де  $k$  – відносний радіус:

$$k = R_n / R_1. \quad (3.61)$$

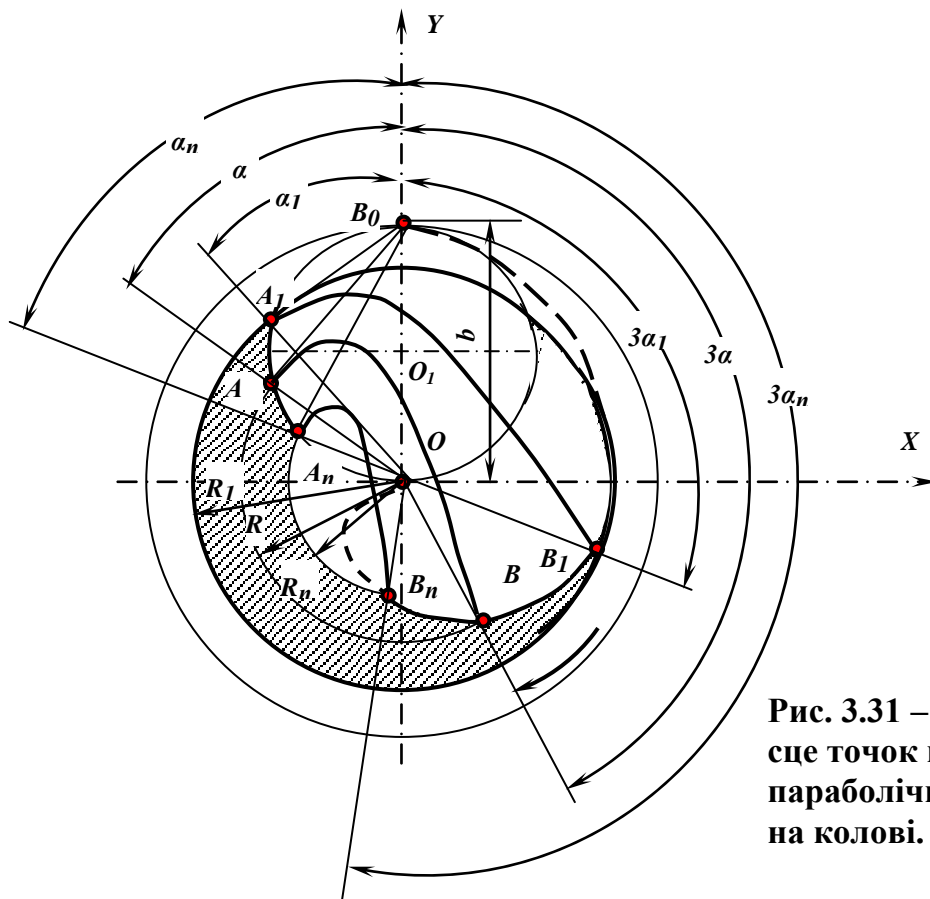
Таким чином, при заданій частоті обертання барабана млина  $\psi$  величина параметра  $k$  залежить від ступеня заповнення його об'єму кулями: чим більше кульове навантаження, тим менше радіус внутрішнього шару куль  $R_2$  і тим менше значення параметра  $k$  і навпаки. Отже, кут  $\alpha_1$  залежить тільки від частоти обертання млина  $\psi$ , кут  $\alpha_2$  залежить і від частоти  $\psi$  і від ступеня заповнення млина кулями  $\varphi$ .

*Геометричне місце точок переходу куль з параболічних траєкторій на колові* (рис. 3.31) створюється точками перетину радіусів, що проведені під кутами  $\beta = 3\alpha$  від відповідних колових траєкторій до вертикального діаметру млина.

Величина радіуса колової траєкторії з кутом відриву  $\alpha$  визначається рівнянням (3.56). Якщо перейти до полярної системи координат і призначити, що  $R = \rho$  і  $\alpha = \beta/3$ , одержимо рівняння геометричного місця точок переходу куль з параболічних траєкторій на колові:

$$\rho = b \cos(\beta/3). \quad (3.62)$$

При  $\beta = 3\pi/2 = 270^\circ$  з рівняння (3.62) отримуємо, що  $\rho = b \cos(\pi/2) = 0$ , тобто крива, яка з'єднує точки падіння куль, проходить через центр поперечного перетину барабана млина. Рівняння (3.62) є рівнянням спіралі у полярних координатах. Спіраль  $OB_nBB_1$  і допоміжне коло з центром у точці  $O_1$  перетинають вертикаль барабану млина у одній точці  $B_0$ .



**Рис. 3.31 – Геометричне місце точок переходу куль з параболічних траєкторій на колові.**

Дійсний рух подрібнювальних тіл при переході з параболічної траєкторії на колову значно відрізняється від теоретичної траєкторії.

На цій ділянці спостерігається створення так званої «п'яти», верхня межа якої лежить вище розрахункових точок падіння куль, при цьому поверхня «п'яти» близька до плоскої.

На формування траєкторії подрібнювальних тіл на ділянці переходу з параболічної траєкторії на колову суттєво впливає пульпа, яка заповнює зону «п'яти» і подрібнювальні тіла при проходженні крізь шар пульпи зазнають опору середовища і сповільнюють свій рух.

### 3.3.3 Швидкість падіння подрібнювальних тіл

У барабанних млинах найкраще подрібнення досягається при частотах обертання, що забезпечує максимальне число ударів подрібнювальних тіл по матеріалу, який подрібнюється. При ударному руйнуванні основним параметром є швидкість подрібнювального тіла в точці падіння (швидкість удару).

Для польоту по параболічній траєкторії подрібнювальне тіло необхідно підняти по коловій траєкторії від точки падіння **B** до точки відриву **A** (рис. 3.32).

Робота, що витрачена на переміщення тіла по коловій траєкторії, дорівнює роботі на підйом тіла з горизонту падіння до горизонту відриву на висоту ординати  $y_B$ :

$$A_1 = mg \cdot (4 \sin^2 \alpha \cos \alpha)$$

або з використанням залежності  $Rg \cos \alpha = v^2$  одержимо:

$$A_1 = 8 \frac{mv^2}{2} \sin^2 \alpha. \quad (3.63)$$

При відриві від колової траєкторії в точці  $A$  тіло зберігає швидкість  $v$  і володіє запасом кінетичної енергії  $A_2 = mv^2 / 2$ . Отже уся робота, яка необхідна для приведення тіла у водоспадний рух складає:

$$A = A_1 + A_2 = 8 \frac{mv^2}{2} \sin^2 \alpha + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv^2}{2} (1 + 8 \sin^2 \alpha) = \frac{mv^2}{2} (9 - 8 \cos^2 \alpha). \quad (3.64)$$

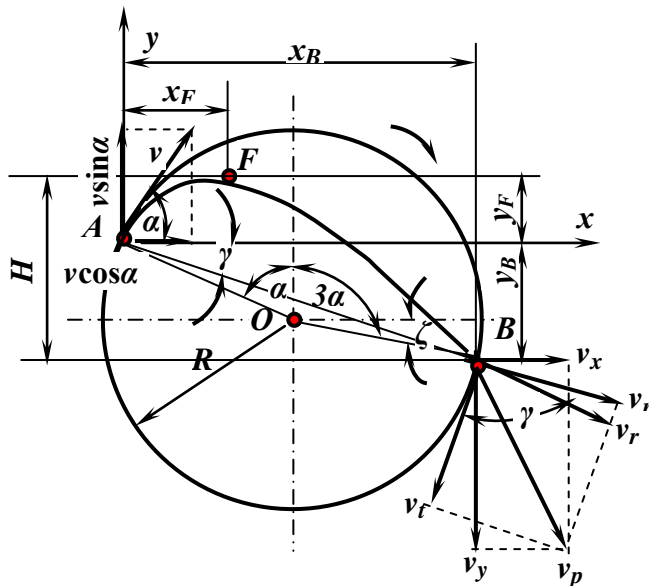


Рис. 3.32 – Швидкість подрібнювального тіла у момент удару.

Подрібнювальне тіло падає на рухому обертальну поверхню футеровки або зовнішній (по відношенню до даного) шар тіл з відносною швидкістю  $v_r$ . Швидкість  $v_r$  є геометричною сумою радіальної складової  $v_n$  швидкості падіння у точці  $B$  і відносної дотичної швидкості  $v_k$ , тобто:

$$v_r^2 = v_n^2 + v_k^2, \quad (3.65)$$

де  $v_k$  – алгебраїчна різниця швидкостей руху зовнішнього шару (або футеровки) по колу і дотичної складової руху тіла по параболі:

$$v_k = v - v_t. \quad (3.66)$$

Швидкість падіння тіла по параболі в точці **B** визначається як геометрична сума швидкостей  $v_x$  і  $v_y$ :

– швидкість  $v_x$  є проекцією колової швидкості тіла на вісь  $x$ :

$$v_x = v \cos \alpha; \quad (3.67)$$

– швидкість  $v_y$  являє собою швидкість вертикального руху тіла в точці **B**:

$$v_y = \sqrt{2gH}, \quad (3.68)$$

де  $H$  – висота падіння тіла згідно з формулами (3.47) і (3.49):

$$H = y_B + y_F = 4R \sin^2 \alpha \cos \alpha + 0,5R \sin^2 \alpha \cos \alpha = 4,5R \sin^2 \alpha \cos \alpha. \quad (3.69)$$

Після підстановки значення  $H$  в рівняння (3.68) одержуємо:

$$v_y = \sqrt{2g \cdot 4,5R \sin^2 \alpha \cos \alpha} = 3v \sin \alpha. \quad (3.70)$$

Швидкість падіння тіла по параболі у точці **B** буде:

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v^2 \cos^2 \alpha + 9v^2 \sin^2 \alpha} = v\sqrt{1 + 8 \sin^2 \alpha}. \quad (3.71)$$

Якщо швидкість  $v_p$  розкласти на складові: радіальну  $v_n$ , яка спрямована по лінії удару, і тангенціальну  $v_t$ , яка спрямована перпендикулярно до лінії удару, то кут між проекціями швидкостей  $v_n$  і  $v_x$  становитиме:

$$\zeta = 3\alpha - \pi/2. \quad (3.72)$$

Для визначення проекції  $v_p$  на напрямок  $v_n$  необхідно спроектувати її складові  $v_x$  і  $v_y$ :

$$v_n = v_x \cos \zeta + v_y \sin \zeta. \quad (3.73)$$

З урахуванням значення  $\zeta$  (3.72) отримуємо:

$$\cos \zeta = \cos(3\alpha - \pi/2) = \sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha; \quad (3.74)$$

$$\sin \zeta = \sin(3\alpha - \pi/2) = -\cos 3\alpha = 3 \cos \alpha - 4 \cos^3 \alpha. \quad (3.75)$$



Після заміни  $v_x = v \cos \alpha$  і  $v_y = 3v \sin \alpha$ , підстановки значень  $\cos \zeta$  і  $\sin \zeta$  у формулу (3.73) отримуємо:

$$v_n = 8v \sin^3 \alpha \cos \alpha. \quad (3.76)$$

Дотична швидкість  $v_t$  визначається як сума проєкцій швидкостей  $v_x$  і  $v_y$  на напрямок  $v_t$ :

$$v_t = v_y \cos \beta - v_x \sin \beta.$$

Після підстановки значень  $\cos \zeta$  (3.74) і  $\sin \zeta$  (3.75) і відповідних перетворень одержимо:

$$v_t = v(1 + 4 \sin^2 \alpha - 8 \sin^4 \alpha). \quad (3.77)$$

Тоді відносна дотична швидкість складе:

$$v_k = v - v_t = v(8 \sin^4 \alpha - 4 \sin^2 \alpha). \quad (3.78)$$

При відомих  $v_n$  і  $v_k$  знаходимо  $v_r$ :

$$v_r = \sqrt{v_n^2 + v_k^2} = 4v \sin^2 \alpha. \quad (3.79)$$

Напрямок відносної швидкості  $v_r$  визначається кутом  $\gamma$ :

$$\cos \gamma = \frac{v_t - v}{v_r} = \frac{4v \sin^2 \alpha \cos 2\alpha}{4v \sin^2 \alpha} = \cos 2\alpha,$$

таким чином

$$\gamma = 2\alpha. \quad (3.80)$$

Подрібнення матеріалу ударом відбувається тільки за рахунок прямого удару, що обумовлений швидкістю  $v_n$ , яка діє по лінії удару, тобто нормально по відношенню до поверхні млина або колової траєкторії зовнішнього (відносно даного) шару подрібнювальних тіл. Швидкість тіла  $v_t$ , яка діє у дотичному напрямку, до удару не приводить і сприяє тільки переміщенню подрібнювального тіла вздовж колової траєкторії, при цьому подрібнення може здійснюватись роздавлюванням і стиранням.

## 3.4 Потужність барабанних млинів

### 3.4.1 Подрібнювальне середовище барабанних млинів

У залежності від матеріалу подрібнювальних тіл розрізняють металеве і неметалеве подрібнювальне середовище, а у залежності від форми металевих тіл кульові, стержневі і цильпесні млини.

Під терміном «первинне навантаження подрібнювальних тіл» розуміється їх спільна маса у барабані млина, а терміном «довантаження» позначається безперервна або періодична добавка подрібнювальних тіл у млин для компенсації їхнього зносу.

Сталеві кулі діаметром від 15 до 125 мм виготовляють прокатуванням, куванням або штампуванням із сталі з таким складом: 0,7 – 1,05 % C; 0,17 – 0,37 % Si; 0,25 – 1,65 % Cr; 0,25 – 0,3 % Ni; 0,02 – 0,045 % S; 0,02 – 0,45 % P; 0,2 – 1,2 % Mn, інше – Fe. Кулі повинні бути загартовані і мати твердість від 300 НВ (для куль діаметром 125 мм) до 400 НВ (для куль діаметром 80 мм і менше). На поверхні куль не повинно бути тріщин, пухирів, плівок шлакових включень.

Стержні виготовляють діаметром від 40 до 125 мм прокатуванням із зносостійких сталей 50Г, 60Г, 65Г, С55. Стержні не повинні скручуватись і розламуватись на короткі шматки після зносу до технологічно допустимої межі (приблизно 30 – 50 мм).

У процесі роботи млинів на збагачувальних фабриках відбувається знос куль, стержнів, цильпесів і футеровки млина у результаті тертя при ковзанні і перекочуванні подрібнювальних тіл у середовищі абразивного матеріалу, при ударах подрібнювальних тіл між собою і футеровкою. Інтенсивність зносу залежить від: властивостей сталі, з якої виготовлені кулі, стержні, цильпеси, футеровки; розмірів подрібнювальних тіл; абразивності, крупності і міцності матеріалу, що подрібнюється; способу подрібнення; агресивності середовища (кисле, лужне); профілю футеровки; швидкісного режиму роботи млина; розміру барабана млина; схеми подрібнення та ін.

При сухому подрібненні знос сталевих подрібнювальних тіл відбувається у основному за рахунок абразивної дії, тобто мікрорізання, мікродряпання металу частинками матеріалу, що подрібнюється, у вигляді стружки. При мокрому подрібненні абразивний знос доповнюється корозійним зносом: при подрібненні у агресивному середовищі корозійна складова зносу сталевих подрібнювальних тіл може складати від 10 до 60 % від загального зносу.

Знос подрібнювальних тіл на збагачувальних фабриках оцінюють їх питомою витратою на 1 т переробленої руди. Так питомі витрати куль складають 1,2 – 2,2 кг/т, стержнів – 0,4 – 0,5 кг/т, футеровки – 0,1 – 0,2

кг/т. Але такий показник, як витрати сталі на 1 т подрібненої руди, не є стабільним, тому що він пов'язаний з продуктивністю млина, яка, у свою чергу, залежить від властивостей руди. Більш надійним показником є витрата подрібнювальних тіл, віднесена до одиниці корисної енергії, витраченої на подрібнення. У цьому випадку середня витрата сталевих куль віднесена до 1 кВт·год корисної енергії складає 0,09 кг/кВт·год, стержнів – 0,12 кг/кВт·год.

Для компенсації зносу подрібнювальних тіл застосовується два способи довантаження:

- регулярне – довантаження найбільш крупними подрібнювальними тілами (кулями, стержнями, рудною галькою) одного розміру;
- раціональне – довантаження подрібнювальними тілами різних розмірів, при дотриманні визначеного співвідношення між масами тіл різних розмірів.

Неметалеве подрібнювальне середовище, що використовується при рудногальковому самоподрібненні, довантажуються безперервно або через малі проміжки часу. Металеве подрібнювальне середовище звичайно довантажуються періодично від трьох разів на добу до одного разу у три – п'ять діб. Розмір подрібнювальних тіл, що довантажуються у млин, режим їх довантаження і склад визначаються у результаті технологічних досліджень. Найбільший розмір тіл у довантаженні, при яких досягається найбільша продуктивність по новоутвореному контрольному класу крупності називають раціональним (оптимальним).

Металевий скрап і кулі неефективного розміру або неправильної форми, за своєю руйнуючою дією значно менш ефективні ніж великі кулі правильної форми, і тому повинні безперервно або періодично видалятися з млина.

Згідно з даними експериментальних досліджень швидкість зношування кулі у млині, тобто зменшення її маси  $G_k$  в одиницю часу  $dt$ , пропорційна  $n$ -му степеню діаметра кулі:

$$dG_k / dt = -K_{zn} D^n, \quad (3.81)$$

де  $K_{zn}$  – коефіцієнт зносу.

Показник степеня  $n$  залежить від швидкісного режиму млина, якості металу подрібнювальних тіл і абразивності руди. При тихохідному режимі (каскадний з перекочуванням куль) показник  $n = 2$ , тобто швидкість зносу пропорційна поверхні кулі. При змішаному режимі (з польотом куль) показник  $n = 2,3 - 2,5$ . При швидкохідному режимі (заповнення  $\varphi \approx 0,45$  і швидкість  $\psi \approx 0,8$ ) показник  $n = 3$ , тобто швидкість зносу пропорційна масі або об'єму кулі.

При складанні первісного кульового завантаження млина його необхідно заповнювати кулями різних розмірів у відповідності з тією характеристикою крупності, яка спостерігається при сталому режимі.

Співвідношення кількості крупних і дрібних куль у кульовому навантаженні, тобто його характеристика крупності при регулярному довантаженні визначається за формулами:

– рівняння сумарної характеристики крупності кульового навантаження по «–  $D$ »:

$$\gamma_{+D} = 100 \cdot \frac{D^n}{D_m^n}, \quad (3.82)$$

– рівняння сумарної характеристики крупності кульового навантаження по «+  $D$ »:

$$\gamma_{-D} = 100 \cdot \frac{D_m^n - D^n}{D_m^n}, \quad (3.83)$$

де  $D_m$  – розмір кулі максимального розміру, що міститься у навантаженні млина.

За гіпотезою Девіса показник степеня  $n = 3$ , а за гіпотезою Мертселя і Прентиса –  $n = 4$ . При водоспадному режимі роботи млина кулі діють переважно ударом і їхній знос правильніше описується гіпотезою Девіса, а при каскадному режимі кулі діють стиранням і їхній знос правильніше описується гіпотезою Мертселя і Прентиса.

При раціональному довантаженні, яке складається з суміші куль різного розміру  $D_1, D_2, D_3$  і т.д., вихід куль крупних класів визначається сумою часткових виходів:

$$\gamma = (\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2 + \gamma_3\beta_3 + \dots)/100, \quad (3.84)$$

де  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти раціонування, які являють собою відношення маси куль даного розміру до загальної маси партії куль, що довантажуються одночасно.

Застосування довантаження у млин куль одного або різних розмірів залежить від крупності, гранулометричного складу, міцності і абразивності вихідного живлення, крупності готового продукту і умов роботи млина.

Для одержання спеціального гранулометричного складу подрібненого продукту (наприклад, бінарного при підготовці вугілля до приготування висококонцентрованої водовугільної суспензії – водовугільного

палива) застосовують спеціальні співвідношення кількості крупних і дрібних куль у кульовому навантаженні.

### 3.4.2 Пульпа

На споживану потужність млина, продуктивність і ефективність подрібнення впливає кількість пульпи, що знаходиться у млині.

*Пульпою* називається суміш мінеральних частинок і води, у якій тверді частинки знаходяться у завислому стані і рівномірно розподілені у об'ємі води.

Склад пульпи характеризується вмістом твердого в пульпі по масі, розрідженістю, густиною і в'язкістю.

*Вміст твердого* у пульпі по масі є відношенням маси твердої речовини до маси усїєї пульпи, у якій міститься ця кількість твердого. Вміст твердого оцінюється у процентах або частках одиниці.

*Розрідженість* являє собою відношення маси рідкого до маси твердого у деякому об'ємі пульпи. Розрідженість показує скільки кубічних метрів (або тонн) води припадає на 1 т твердого:

$$R = P : T = \frac{100 - p}{p}, \text{ м}^3/\text{т}; \quad (3.85)$$

$$p = 100 / (R + 1), \text{ \%}, \quad (3.86)$$

де  $R$  – розрідженість,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $p$  – вміст твердого у пульпі по масі,  $\%$  (для кульових і стержневих млинів  $p \approx 80 \%$ );  $P$  – маса рідкого у пульпі,  $\text{м}^3$  (або т);  $T$  – маса твердого у пульпі, т.

Практично розрідженість пульпи у млині коливається у широких межах – від 0,2 до 2  $\text{м}^3/\text{т}$ . Однак, для отримання максимальної продуктивності млина звичайно при подрібненні крупного вихідного матеріалу (15 мм і більше) розрідженість пульпи приймають 0,35 – 0,55  $\text{м}^3/\text{т}$ , при подрібненні дрібного вихідного матеріалу розрідженість пульпи приймають 0,4 – 1  $\text{м}^3/\text{т}$ .

*Густина пульпи* визначається з урахуванням густини складових і їхньої кількості у пульпі:

$$\Delta_n = \Delta_g + (\delta - \Delta_g)p, \text{ кг/м}^3 \quad (3.87)$$

або

$$\Delta_n = \frac{\delta}{p + \delta(1 - p)}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.88)$$

або

$$\Delta_n = \frac{R + 1}{R + (1/\delta)}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.89)$$

де  $\Delta_n$ ,  $\Delta_e$  – густина пульпи і води, т/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – густина твердого, т/м<sup>3</sup>;  $p$  – вміст твердого, частки одиниці.

*В'язкість* – властивість середовищ чинити опір відносному руху сусідніх елементарних шарів. Причиною опорів, що виникають при русі пульпи, є внутрішнє тертя між сусідніми дотичними шарами. В'язкість пульпи залежить від вмісту в ній твердої речовини, її крупності і хімічного складу, в'язкості рідкої речовини, присутності деяких хімічних сполук, температури. В'язкість пульпи різко зростає зі збільшенням вмісту твердої речовини і при вмісті твердого близько 40-60 % пульпа втрачає текучість. В'язкість характеризується динамічним коефіцієнтом в'язкості, який при вмісті твердого до 40 % визначається за формулою Ванда:

$$\mu_n = \mu_e (1 + 2,5C + 7,35C^2 + 16,3C^3 + \dots), \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (3.90)$$

де  $\mu_n$ ,  $\mu_e$  – динамічні коефіцієнти в'язкості пульпи і води, Па·с;  $C$  – вміст твердого, частки одиниці.

Крупнозернисті пульпи менш в'язкі, ніж тонкозернисті при тому ж вмісті твердого. Присутність первинних шламів, що містять глинисті частинки, значно збільшують в'язкість пульпи у млині, вторинні шлами (кристалічні) на в'язкість пульпи так суттєво не впливають. З підвищенням температури в'язкість пульпи зменшується.

### 3.4.3 Вплив маси і крупності подрібнювального середовища на роботу барабанних млинів

Показники роботи барабанних млинів суттєво залежать від маси і крупності тіл подрібнювального середовища, швидкості і числа ударів подрібнювальних тіл по матеріалу у млині, відносної швидкості обертання млина і заповнення його подрібнювальним середовищем, коефіцієнта тертя матеріалу млина та інших факторів.

*Маса кульового навантаження* при даному ступені заповнення кулями об'єму млина визначається об'ємною масою подрібнювального середовища. Об'ємна маса кульового навантаження, у свою чергу, зале-

жить від густини подрібнювальних тіл і ступеня заповнення ними об'єму, зайнятого кульовим навантаженням, тобто від характеру укладки куль при нерухомому барабані млина.

Густина  $\delta$  сталевих куль складає  $7,5 - 7,8 \text{ т/м}^3$ , чавунних –  $7,1 \text{ т/м}^3$ , кременевої гальки  $2,6 - 2,7 \text{ т/м}^3$ .

Практично кульове навантаження млина складається з куль різних розмірів, які безладно укладені у млині. Експериментально встановлено, що суміш таких куль заповнює близько  $60 - 62 \%$  усього об'єму кульового навантаження, проміжки між кулями займають  $38 - 40 \%$  цього об'єму. У такому випадку об'ємна маса сталевих куль при заповненні ними  $60 \%$  об'єму навантаження складає:

$$\gamma_k = (7,5 \div 7,8) \cdot 0,6 = 4,5 \div 4,7 \cong 4,6 \text{ т/м}^3$$

Маса кульового навантаження  $M_{кн}$  у млині з внутрішніми розмірами  $D \times L$  (м) при ступені заповнення кулями  $\varphi$ , визначається за формулою:

$$M_{кн} = \varphi \frac{\pi D^2}{4} L \cdot \gamma_k = 3,6 \varphi D^2 L, \text{ т.} \quad (3.91)$$

При об'ємній масі стержнів  $\gamma_c = 6,25 \text{ т/м}^3$  і густині сталі  $\delta = 7,8 \text{ т/м}^3$  ступінь заповнення стержнями об'єму подрібнювального середовища складає  $6,25/7,8 = 0,80$  ( $80 \%$ ), а об'єм проміжків між стержнями –  $20 \%$ .

Маса стержневого навантаження визначається за формулою:

$$M_{сн} = \varphi \frac{\pi D^2}{4} L \cdot \gamma_c = 4,9 \varphi D^2 L, \text{ т.} \quad (3.92)$$

Рудна галька при густині  $\delta = 2,6 - 2,7 \text{ т/м}^3$  і заповненні нею об'єму має насипну густину:

$$\gamma_{рз} = (2,6 \div 2,7) \cdot 0,6 = 1,56 \div 1,62 \cong 1,6 \text{ т/м}^3$$

При розрахунках корисної потужності барабанних млинів густину навантаження слід визначати з урахуванням заповнення пульпою порожнин між подрібнювальними тілами. Густина пульпи у млині визначається за формулою (3.88).

Таким чином, об'ємна маса навантаження з урахуванням заповнення порожнин пульпою визначається:

– для кульового навантаження:

$$\gamma_{кн} = \gamma_k + 0,4\Delta = 4,6 + 0,4\Delta, \text{ т/м}^3; \quad (3.93)$$

– для стержневого навантаження:

$$\gamma_{сн} = \gamma_c + 0,2\Delta = 6,25 + 0,2\Delta, \text{ т/м}^3; \quad (3.94)$$

– для рудногалькового навантаження і рудного навантаження у млинах самоподрібнення:

$$\gamma_{ргн} = \gamma_{рг} + 0,4\Delta = 1,6 + 0,4\Delta, \text{ т/м}^3. \quad (3.95)$$

Об'ємна маса навантаження млина напівсамоподрібнення  $\gamma_{нсп}$  визначається з урахуванням об'єму куль  $\varphi_{ш}$ , що додаються, і ступеня заповнення млина подрібнювальним навантаженням  $\varphi$ :

$$\gamma_{нсп} = \frac{\varphi_{ш}}{\varphi} \cdot 4,6 + \frac{\varphi - \varphi_{ш}}{\varphi} \cdot 1,6 + 0,4\Delta, \text{ т/м}^3, \quad (3.96)$$

де  $\varphi_{ш}$  – відношення об'єму куль (з порожнинами) до об'єму млина (звичайно  $\varphi_{ш} = 0,06 - 0,10$ );  $\varphi$  – відношення об'єму навантаження (кулі, великі грудки руди і пульпа) до об'єму млина (для млинів рудного самоподрібнення і напівсамоподрібнення  $\varphi = 0,30 - 0,35$ );  $\varphi_{ш}/\varphi$  – об'ємна частка, яка зайнята кулями з порожнинами в  $1\text{ м}^3$  навантаження;  $(\varphi - \varphi_{ш})/\varphi$  – об'ємна частка, яка зайнята рудними грудками з порожнинами в  $1\text{ м}^3$  навантаження.

Для подрібнення крупних і твердих матеріалів необхідно застосовувати подрібнювальні тіла (кулі) великих розмірів, а для дрібних і м'яких – менших розмірів. При постійному коефіцієнті заповнення млина зі зменшенням розміру куль число ударів у млині збільшується. Тому необхідно застосовувати подрібнювальні тіла найменших допустимих розмірів. Крім того, подрібнення кулями одного розміру менш ефективно, ніж при заповненні млина кулями різних розмірів.

Потенціальна енергія тіла, як відомо, залежить від його маси і висоти падіння. У кінці параболічної траєкторії уся кінетична енергія подрібнювального середовища складає:



$$E_k = mv_p^2 / 2, \quad (3.97)$$

але на подрібнення матеріалу ударом витрачається тільки її частина:

$$E_n = mv_n^2 / 2. \quad (3.98)$$

Інша частина енергії витрачається на подрібнення руди роздавлюванням і стиранням тілами, що ковзають і перекочуються:

$$E_t = mv_t^2 / 2. \quad (3.99)$$

Зміною частоти обертання барабану можна змінювати  $E_n$  і  $E_k$ .

Якщо підставити у формулу (3.98) значення  $v_n$  з рівняння (3.76), одержимо:

$$E_n = m(8v \sin^3 \alpha \cos \alpha)^2 / 2 = (m/2) \cdot (8\pi Dn \sin^3 \alpha \cos \alpha / 60)^2, \quad (3.100)$$

де  $v = \pi Dn / 60$  – колова швидкість падаючих тіл, м/с;  $D$  – діаметр падаючої кулі, м;  $n$  – частота обертання барабана,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $\alpha$  – кут відриву падаючих тіл, град.;  $m$  – маса тіла, кг.

За один оберт через перетин  $A_1A_n$  (рис. 3.33) по коловим траєкторіям проходить такий об'єм подрібнювальних тіл:

$$V_n = \pi(R_3^2 - R_B^2)L = \pi R_3^2(1 - k^2)L, \quad (3.101)$$

де  $k = R_B / R_3$  – співвідношення радіусів внутрішнього і зовнішнього шарів подрібнювальних тіл;  $L$  – довжина барабана, м.

За умови, що за час одного оберту барабана усе подрібнювальне середовище обернулося  $Z$  разів, можна записати:

$$\pi R_3^2(1 - k^2)L = Z\varphi\pi R_3^2L,$$

отже

$$Z = (1 - k^2) / \varphi, \quad (3.102)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення барабана подрібнювальним середовищем.

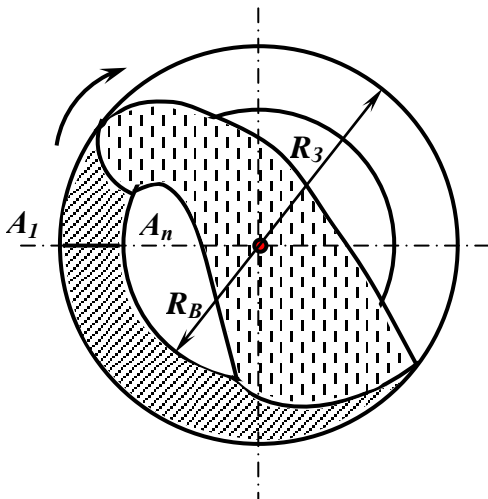


Рис. 3.33 – Обертальність усього подрібнювального середовища у млині.

Значення параметра  $k$  приймається залежно від відносного заповнення подрібнювальними тілами  $\varphi$  і відносної швидкості  $\psi$  (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення параметра  $k$  для різних  $\varphi$  і  $\psi$

| $\varphi$ – відносне заповнення барабана млина подрібнювальними тілами, % | Значення параметра $k$ (частки одиниці) при відносній частоті обертання барабана $\psi$ (%) |       |       |       |       |       |       |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 70  | 75    | 80    | 85    | 90    | 95    | 100   |
| 30  | 0,635   | 0,700 | 0,746 | 0,777 | 0,802 | 0,819 | 0,831 |
| 35  | –   | 0,618 | 0,683 | 0,726 | 0,759 | 0,781 | 0,797 |
| 40  | –   | 0,508 | 0,606 | 0,669 | 0,711 | 0,740 | 0,760 |
| 45  | –   | –     | 0,506 | 0,600 | 0,656 | 0,694 | 0,721 |
| 50  | –   | –     | –     | 0,508 | 0,592 | 0,644 | 0,676 |

При  $n = 42,3\psi / \sqrt{D}$  рівняння (3.91) можна записати у такому вигляді:

$$E_n = \frac{m}{2} \cdot \left( \frac{8\pi D \cdot 42,3\psi \sin^3 \alpha \cos \alpha}{60\sqrt{D}} \right)^2 = AmD, \quad (3.103)$$

де

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{8\pi \cdot 42,3\psi \sin^3 \alpha \cos \alpha}{60} \right)^2 = 157(\psi \sin^3 \alpha \cos \alpha)^2.$$

Якщо  $N$  зерен вихідного матеріалу масою  $m_1$  кожне рухаються назустріч нерухомому подрібнювальному тілу масою  $m$  з швидкістю удару  $v_y$ , то їхня сумарна енергія буде:

$$E_y = Nm_1v_y^2/2.$$

Прийmemo, що  $E_y = E_n$ , тоді

$$Nm_1v_y^2/2 = AmD. \quad (3.104)$$

Еквівалентний діаметр  $d_e$  подрібнювального тіла дорівнює:

$$d_e = 1,24\sqrt[3]{m/\delta}, \text{ м}, \quad (3.105)$$

де  $\delta$  – густина подрібнювального тіла, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – маса подрібнювального тіла, кг.

Після підстановки значення  $m$  з формули (3.104) одержимо:

$$d_e = 0,98\sqrt[3]{Nm_1v_y^2/(AD\delta)}, \text{ м}, \quad (3.106)$$

Таким чином, розміри подрібнювальних тіл залежать від маси зерен матеріалу, що подрібнюється, швидкості удару і діаметра кулі подрібнювального середовища, що аналізується.

Вибір крупності подрібнювальних тіл здійснюється з урахуванням міцності і крупності вихідної руди, діаметра млина, відносної частоти обертання барабана і коефіцієнта завантаження його подрібнювальними тілами та вихідним матеріалом. При цьому кінетична енергія  $E_n$  подрібнювального тіла масою  $m$  повинна бути достатньою для руйнування вихідного матеріалу максимальної крупності  $d$  і масою  $M$ , тобто

$$E_n \geq E_p M, \quad (3.107)$$

де  $E_p$  – величина початкової питомої енергії руйнування зерен крупністю  $d$ , Дж/кг;  $M$  – маса вихідного матеріалу, який зазнає удару подрібнювального тіла, кг.

З урахуванням к.к.д. удару  $\eta$  і відношення радіусів внутрішнього і зовнішнього шару подрібнювальних тіл  $k$  у млині маємо:

$$E_n \eta k = E_p M.$$

Після підстановки значення  $E_n$  з формули (3.94) отримуємо:

$$AmDk\eta = E_p M ,$$

звідки

$$m = E_p M / AkD\eta , \quad (3.108)$$

де  $D$  – діаметр барабана млина;  $\eta$  – к.к.д. використання енергії удару ( $\eta = 0,95$ ).

Для кульових млинів чим менше крупність вихідного матеріалу і чим крупніше продукт подрібнення, тим вища продуктивність. Продуктивність млинів самоподрібнення у значній мірі залежить від вмісту крупних грудок у живленні і рівномірності їхнього розподілу по всій масі руди.

#### 3.4.4 Вплив швидкості і числа ударів подрібнювальних тіл на роботу барабанних млинів

Надання швидкості подрібнювальним тілам здійснюється гравітаційними силами (барабанні і вібраційні млини), струменями (струминні млини), відцентровими силами (роторні млини-дробарки).

Швидкість подрібнювального тіла при його ударі по зерну може бути отримана з рівняння (3.104):

$$v_y = \sqrt{2AmD / (m_1 N)} . \quad (3.109)$$

Таким чином, швидкість удару залежить від співвідношення мас подрібнювального тіла і зерна вихідного матеріалу, діаметра шару подрібнювального середовища і числа зерен, які піддаються удару.

При тонкому подрібненні матеріалів необхідні великі швидкості ударів (більше 100 м/с), тому при тонкому і надтонкому подрібненні доцільно створювати сприятливі умови для стирання, якщо при цьому забезпечується необхідний ступінь розкриття рудних і нерудних мінералів з мінімальним їх переподрібненням.

Вихід розрахункового класу ( $-0,074$  мм) при подрібненні пропорційний числу ударів подрібнювальних тіл по зернах руди.

У барабанному млині число ударів  $C$  по одному рудному зерну з середньою масою  $m_1$  прямо пропорційне числу подрібнювальних тіл, що знаходяться у млині  $G_1/m$ , частоті обертання барабана  $n$ , числу циклів подрібнювального середовища  $Z$ , тривалості подрібнення  $t$  і обернено пропорційне числу рудних зерен масою  $m_1$  у млині ( $G_2/Nm_1$ ):

$$C = \frac{G_1 N m_1 n Z t}{m G_2} \cdot \frac{G_2}{G_1 + G_2}, \quad (3.110)$$

де  $G_1$  і  $G_2$  – маса подрібнювальних тіл і руди, що знаходяться у млині, кг;  $m$  – маса подрібнювального тіла, кг;  $N$  – число зерен вихідного матеріалу масою  $m_1$ , які потрапляють під удар подрібнювального тіла масою  $m$ .

Імовірність удару подрібнювального тіла по зерну орієнтовно визначається відношенням  $G_2/(G_1 + G_2)$ . При відносній частоті обертання барабана млина  $\psi = 0,8$  формула (3.110) може бути перетворена таким чином:

$$C = \frac{G_1 N m_1 Z}{m(G_1 + G_2)} \cdot \frac{34}{\sqrt{D}} \cdot \frac{L}{v_m}, \quad (3.111)$$

де  $D$  і  $L$  – діаметр і довжина барабана млина (внутрішні), м;  $v_m$  – швидкість руху матеріалу вздовж барабана млина, м/с.

Для даної руди при  $\psi = \text{const}$ ,  $34G_1 N m_1 Z / [m(G_1 + G_2)] = \text{const}$ , і постійній швидкості руху матеріалу вздовж млина  $v_m$ :

$$C = RL / \sqrt{D}, \quad (3.112)$$

де  $R = 34G_1 N m_1 Z / [m(G_1 + G_2)v_m]$  – коефіцієнт пропорційності.

При постійному відношенні  $D : L$  і рівності коефіцієнтів пропорційності  $R_1 = R_2$  для порівнюваних млинів зі збільшенням розміру млина спостерігається така залежність:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0,5}. \quad (3.113)$$

Тобто число ударів подрібнювальних тіл збільшується зі збільшенням довжини барабана і зменшенням його діаметра.

### 3.4.5 Потужність, споживана барабанними млинами

Потужність, що витрачається для приведення у рух подрібнювальних тіл (куль, стержнів, руди), називається корисною потужністю  $N$  (кВт). Потужність, що витрачається на обертання барабана  $N_\delta$  (кВт), визначається за формулою:

$$N_{\sigma} = N + N_x + N_{\partial}, \text{ кВт}, \quad (3.114)$$

де  $N_x$  – потужність, що витрачається у режимі холостого ходу (без подрібнення), кВт;  $N_{\partial}$  – додаткова потужність, що витрачається на подолання сил тертя у цапфах млина при завантаженні подрібнювального середовища, кВт.

Потужність на валу двигуна буде:

$$N_{\sigma\partial} = N_{\sigma} / \eta, \text{ кВт}, \quad (3.115)$$

де  $\eta$  – к.к.д. привода (при орієнтованих розрахунках  $\eta = 0,8$ ).

Установлена (номінальна) потужність електродвигуна:

$$N_{e\partial} = k_3 N_{\sigma\partial}, \text{ кВт}, \quad (3.116)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу (при розрахунках приймається  $k_3 = 1,1$ ).

Повна потужність, що споживається електродвигуном з електромережі:

$$N_{ec} = N_{e\partial} / \eta_{e\partial}, \text{ кВт}, \quad (3.117)$$

де  $\eta_{e\partial}$  – к.к.д. електродвигуна (у середньому  $\eta_{e\partial} = 0,92$ ).

Потужність, що витрачається тільки на тертя у головних підшипниках  $N_n = N_x + N_{\partial}$ , визначається у залежності від потужності на обертання барабана при концентрично розташованому навантаженні, яке дорівнює по масі загальному завантаженню барабана.

Для млинів діаметром більше 2 м втрати потужності  $N_n$  у вінцевій зубчатій передачі і підшипниках вала шестерні складає приблизно 2,5 % від корисної потужності і тоді з урахуванням сказаного:

$$N_{ec} = 1,025 N / \eta \eta_{e\partial}, \text{ кВт}, \quad (3.118)$$

З використанням формули (3.118) можна орієнтовано визначити корисну потужність  $N$ , якщо відома  $N_{ec}$ .

Корисна потужність, що споживається кульовим млином при каскадному режимі подрібнення (рис. 3.34), може бути розрахована за формулою С.Є. Андрєєва:

$$N = 3,63 D^{2,5} L \gamma \psi \sin^3 \frac{\Omega}{2} \sin \Theta, \quad (3.119)$$

де  $D$ ,  $L$  – діаметр і довжина барабана, м;  $\gamma$  – насипна густина куль, т/м<sup>3</sup>.

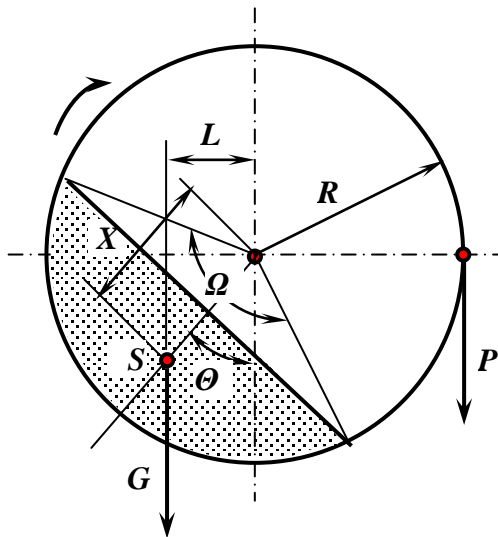


Рис. 3.34 – Схема каскадного режиму роботи барабанного млина.

З урахуванням того, що маса завантаження  $G = L\gamma\varphi\pi D^2 / 4$ , має-мо:

$$N = 4,62 \frac{G}{\varphi} \psi \sqrt{D} \sin^3 \frac{\Omega}{2} \sin \Theta, \quad (3.120)$$

де  $G$  – маса кульового завантаження, т;  $\varphi$  – ступінь заповнення барабана млина кулями, частки од.;  $\psi$  – відносна частота обертання барабана, частки од.;  $D$  – внутрішній діаметр барабана млина, м;  $\Omega$  – центральний кут кругового сегмента;  $\Theta$  – кут повороту кульового навантаження.

Для млинів різних розмірів при однакових  $\varphi$  і  $\psi$  кути  $\Omega$  і  $\Theta$  залишаються постійними. Тому у формулі (3.119) добуток усіх постійних можна замінити одним коефіцієнтом  $k$ :

$$k = 3,63\psi \sin^3 \frac{\Omega}{2} \sin \Theta, \quad (3.121)$$

тоді

$$N = kD^{2,5} L. \quad (3.122)$$

З використанням формули (3.122) можна визначити потужність млина, що проектується, якщо відома потужність млина, який працює в аналогічних умовах.

Для розрахунку потужності, що споживається млином при водоспадному режимі, Н.П. Неронов запропонував формулу:

$$N = 3,46 \frac{M}{\varphi} \sqrt{D} \varphi^3 \left[ 2(1 - k^4) - \frac{4}{3} \psi^4 (1 - k^6) \right], \quad (3.123)$$

де  $M$  – маса куль у млині, т;  $\varphi$  – ступінь заповнення млина кулями, частки од.;  $D$  – діаметр барабана млина, м;  $\psi$  – відносна частота обертання барабана млина, частки од.;  $k$  – відношення радіусів внутрішнього і зовнішнього шарів подрібнювальних тіл (рис. 3.33).

У формулі (3.123) за корисну потужність прийнято вважати тільки потужність, яка витрачається для підйому куль від точки падіння на колові траєкторії до точки переходу на параболічну траєкторію. Формула (3.123) одержана без урахування ковзання куль по футеровці барабана, тому її застосування обмежене.

В.А. Олевський запропонував узагальнену формулу для розрахунку корисної потужності  $N_{\bar{o}}$  (кВт):

$$N_{\bar{o}} = N = N_o S, \quad (3.124)$$

де  $N_o$  – основний параметр потужності;  $S$  – безрозмірний параметр режиму, що залежить від  $\varphi$  і  $\psi$ :

$$N_{\bar{o}} = A \gamma V \sqrt{DS}, \quad (3.125)$$

де  $A$  – константа С.Є. Андрєєва ( $A = g \sqrt{g} / \pi = 231 \text{ м}^{1,5}/\text{с}^3$ );  $\gamma$  – насипна густина куль ( $\gamma_k = 4,6 \text{ т}/\text{м}^3$ );  $V$  – об'єм барабана,  $\text{м}^3$ ;  $D$  – внутрішній діаметр барабана, м.

Для визначення залежності  $S = f(\varphi, \psi)$  запропоновано декілька теоретичних і емпіричних формул, але тому що на збагачувальних фабриках частіше застосовується змішаний режим, рекомендовано при розрахунку потужності користуватися емпіричними формулами для змішаного режиму.

При постійних ступені заповнення  $\varphi$  і швидкості обертання  $\psi$  теоретична формула для визначення корисної потужності  $N$  при водоспадному режимі подрібнення має вигляд:

$$N = k_1 D^{2,5} L, \quad (3.126)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Для розрахунку потужності, що споживається млином при змішаному режимі, звичайно використовують формулу:



$$N = 3,3\sqrt{2}\gamma D^{2,5} L\varphi^{0,9}\psi, \quad (3.127)$$

де  $D$  і  $L$  – діаметр і довжина млина, м;  $\gamma$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  – мають ті ж самі значення.

Для визначення корисної потужності, що споживається млином самоподрібнення типу ММС, рекомендована формула, у яку введені додатково коефіцієнт  $k_c$ , що враховує перехід від сухого способу подрібнення до мокрого, і коефіцієнт  $k_g$ , що враховує зміну вмісту твердого у пульпі:

$$N = 3,3\sqrt{2}\gamma_p D^{2,5} L\varphi^{0,9}\psi k_c k_g, \quad (3.128)$$

де  $\gamma_p$  – насипна густина завантаження млина, т/м<sup>3</sup>. При вмісті твердого  $55 < p < 75$  %  $k_c = 1,1 \div 1,2$ ;  $k_g = 0,93 + 0,007(p - 55)$ . При  $0,35 < \varphi < 0,4$  і  $0,75n_{кр} < \psi < 0,8n_{кр}$  розходження між розрахунковими і дослідними даними не перевищує 4 – 10 %.

Для розрахунку корисної потужності, що споживається кульовими  $N_k$  (кВт) і стержневими  $N_c$  (кВт) млинами, а також млинами само- і напівсамоподрібнення  $N_{cn}$  (кВт) Бонд запропонував такі емпіричні формули:

– для млинів кульових, рудного само- і напівсамоподрібнення:

$$N_k = N_{cn} = 3,86D^{2,3} L\gamma_p \psi(3,2 - 3\varphi)\psi(1 - 0,1/2^{9-10\psi}), \quad (3.129)$$

де  $D$  і  $L$  – внутрішні діаметр і довжина млина, м;  $\gamma_p$  – насипна густина подрібнювального середовища, т/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – ступінь заповнення млина навантаженням (для млинів само- і напівсамоподрібнення  $\varphi = 0,3 - 0,35$ ), частки од.;  $\psi$  – відносна частота обертання млина, частки од.

За формулою (3.129) визначається потужність на валу малої шестерні зубчатої вінцевої передачі для млинів зливного типу. Для млинів мокрого подрібнення з розвантаженням через решітку вводиться поправочний коефіцієнт  $k_1 = 1,12 - 1,15$ , а для млинів сухого подрібнення з решіткою – коефіцієнт  $k_2 = 1,08$ ;

– для стержневих млинів:

$$N_c = 1,375D^{2,33} L\gamma_c \varphi(6,3 - 5,4\varphi)\psi, \quad (3.130)$$

$\gamma_c$  – насипна густина стержньового навантаження, т/м<sup>3</sup> (для нових стержнів  $\gamma_c = 6,25$  т/м<sup>3</sup>; для відсортованих стержнів, що були у роботі  $\gamma_c = 5,75$  т/м<sup>3</sup>; для стержнів, що були у роботі, але невідсортованих  $\gamma_c = 5,6$  т/м<sup>3</sup>).

### 3.5 Продуктивність барабанних млинів

#### 3.5.1 Фактори, що впливають на продуктивність барабанних млинів

Продуктивність барабанних млинів вимірюється кількістю тонн подрібненого вихідного матеріалу (т/год., т/добу); кількістю новоутворених поверхонь-тонн за одиницю часу; кількістю тонн новоутвореного розрахункового класу крупності (звичайно – 0, 074 мм) за одиницю часу.

Продуктивність млинів визначається багатьма факторами, які розділяють на три групи:

- *технологічні фактори*, які залежать від властивостей матеріалу – крупності вихідного матеріалу і подрібненого продукту, подрібнюваності руди;
- *конструктивні фактори*, які залежать від конструкції млина, його розміру, форми футеровки;
- *експлуатаційні фактори*, які визначаються умовами роботи млина – відкритий або замкнений цикл, ефективність роботи класифікаційного апарата, заповнення млина подрібнювальним середовищем, характеристика крупності, форма, густина і твердість подрібнювальних тіл, розрідженість пульпи, число обертів млина.

Регулюванню при експлуатації піддаються тільки фактори третьої групи, а також крупність вихідної руди і продукту подрібнення.

Між продуктивністю млина і подрібнюваністю матеріалу, його крупністю і крупністю подрібненого продукту існує прямо пропорційна залежність. Практикою встановлено, що оптимальна крупність живлення стержневих млинів – 15 – 20 мм, а кульових – 10 – 15 мм (така крупність може бути отримана після тристадіального дроблення). Для млинів самоподрібнення крупність живлення – 300 – 500 мм (така крупність може бути отримана після одностадіального дроблення). Чим менше крупність вихідного матеріалу і чим крупніше подрібнений продукт, тим вище продуктивність млина. Теоретичним підтвердженням цієї залежності є закон Ріттінгера:

$$6Q\delta^{-1}(d^{-1} - D^{-1}) = k_n N, \quad (3.131)$$

де  $Q$  – продуктивність млина;  $\delta$  – густина вихідного матеріалу;  $D$  і  $d$  – середній розмір вихідного і подрібнюваного матеріалу;  $k_n$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від подрібнюваності матеріалу;  $N$  – крисна потужність, що споживається млином.

Якщо позначити через  $\mathcal{E} = k_n / [6\delta^{-1}(d^{-1} - D^{-1})]$ , формула (3.131) може бути представлена так:

$$Q = \mathcal{E}N, \quad (3.132)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\mathcal{E}$  чисельно дорівнює кількості тонн матеріалу, який подрібнюється за 1 годину і приходиться на одиницю споживаної потужності, тобто він являє собою ефективність подрібнення. Таким чином, при постійних умовах подрібнення матеріалу продуктивність млина пропорційна споживаній корисній потужності. За практичними даними корисна потужність складає 75 – 90 % від загальної споживаної потужності.

Між корисною потужністю і геометричними розмірами барабанного млина існує визначена залежність, яка представлена формулою:

$$N = kD^{2,5 \div 2,6} L, \quad (3.133)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $D$  і  $L$  – діаметр і довжина барабана млина.

Формула (3.133) вірна при визначеному і постійному режимах роботи млина. При збільшенні довжини кульового млина з решіткою і при роботі його у замкненому циклі з класифікатором необхідно знижувати його питому продуктивність. Оптимальне циркуляційне навантаження цих млинів при визначеному режимі роботи обернено пропорційне довжині їхнього барабана.

Якщо підставити значення  $N$  з формули (3.133) у формулу (3.132) і позначити  $\mathcal{E}k = c$ , то отримуємо:

$$Q = \mathcal{E}kD^{2,5 \div 2,6} L = cD^{2,5 \div 2,6} L. \quad (3.134)$$

Таким чином, при інших рівних умовах продуктивність млина пропорційна діаметру його барабана в степені  $2,5 \div 2,6$  і його довжині. Показник степені  $D$  у кульових млинів складає 2,5, у млинів самоподрібнення 2,6.

Питома продуктивність, тобто продуктивність, що припадає на одиницю внутрішнього об'єму (при  $a = 4c/\pi$ ) становить:

$$q = cD^{2,5 \div 2,6} L / (\pi D^2 L / 4) = 4cD^{0,5 \div 0,6} / \pi = aD^{0,5 \div 0,6}, \quad (3.135)$$

тобто питома продуктивність млина пропорційна діаметру його барабана в ступені  $0,5 \div 0,6$ .

З викладеного витікає, що відношення питомих продуктивностей двох млинів, які подрібнюють один й той же матеріал при однаковому режимі роботи, дорівнює відношенню їхніх діаметрів в ступені  $0,5 \div 0,6$ :

$$q_2 / q_1 = (D_2 / D_1)^{0,5 \div 0,6}. \quad (3.136)$$

Продуктивність млина пропорційна витратам енергії на подрібнення, а витрати енергії пов'язані з ступенем заповнення млина подрібнювальним середовищем. З ростом ступеня заповнення  $\varphi$  млина подрібнювальним середовищем зростає витрата енергії на подрібнення і досягає максимуму при ступені заповнення  $\varphi = 50\%$ . Відповідно зростає й продуктивність млина.

З підвищенням відносної частоти обертання спостерігається підвищення споживаної питомої потужності. Одночасно продуктивність і вихід класу –  $0,074$  мм в розрахунку на  $1$  кВт·год зростають приблизно так само, як і частота. Однак це справедливо до деякої межі (для млинів типу «Аерофол» до  $\psi = 0,95$ ; для млинів типу «Каскад» до  $\psi = 0,85$ ). Якщо у живленні млина самоподрібнення міститься багато дріб'язку, його продуктивність знижується, тому що немає достатньої кількості крупних грудок, які могли би подрібнити грудки середньої величини, руда подрібнюється дуже повільно і, головним чином, стиранням.

Оптимальні ступені заповнення млина подрібнювальним середовищем  $\varphi$  і відносні частоти обертання барабана  $\psi$ , при яких досягаються найбільш високі показники подрібнення, наведені у табл. 3.3.

**Таблиця 3.3 – Оптимальні значення ступеня заповнення млина подрібнювальним середовищем  $\varphi$  і відносної частоти обертання барабана  $\psi$**

| Значення $\varphi$ і $\psi$ | Млини   |           |          |           |               |
|-----------------------------|---------|-----------|----------|-----------|---------------|
|                             | Кульові | Стержневі | «Каскад» | «Аерофол» | Рудногалькові |
| $\varphi, \%$               | 40 – 50 | 35 – 40   | 38 – 42  | 35 – 42   | 45 – 50       |
| $\psi, \%$                  | 75 – 80 | 65 – 70   | 70 – 75  | 85 – 95   | 75 – 85       |

Розрідження пульпи у млині визначає масу або об'єм твердого матеріалу, який знаходиться у ньому у кожний даний момент, а також ефективність дії подрібнювальних тіл. Загальний об'єм пульпи у млині приблизно постійний, тому зі збільшенням вмісту у пульпі води вміст твердого зменшується, і навпаки. При меншому вмісті води густина

пульпи збільшується і, отже, подрібнювальні тіла при русі у більш густому середовищі будуть мати меншу силу удару.

Вміст води у пульпі визначає її текучість і здатність проходження через млин. При вмісті води близько 20 % матеріал достатньо вільно проходить через млин. Чим більше густина пульпи, тим більше крупних частинок досягає розвантажувального кінця млина. У млинах з центральним розвантаженням цей крупний матеріал іде у розвантаження і вміст крупного класу у продукті подрібнення збільшується. У млинах з решіткою густа пульпа, яка містить крупні частинки затримується решіткою і збільшення вмісту крупного класу у розвантаженні млина не спостерігається. При великих розрідженнях пульпи матеріал швидше проходить млин з решіткою, що приводить до укрупнення продукту подрібнення. У млинах з центральним розвантаженням великі розрідження, навпаки, спричиняють збільшення вмісту дрібних класів у подрібненому продукті.

Продуктивність млина тим вище, чим вище ефективність класифікації. Низька ефективність класифікації особливо негативно впливає на роботу млина при малих циркуляційних навантаженнях. Підвищення ефективності класифікації визначає зменшення кількості переподрібненого матеріалу. Збільшення швидкості проходження матеріалу через млин, що спостерігається при зростанні циркуляційного навантаження, сприяє підвищенню ефективності роботи подрібнювального середовища, зменшенню ступеня переподрібнення і підвищенню продуктивності млина.

Вплив конструкції млинів і форми футеровки на їхню продуктивність встановлений на основі практичних даних. Млини, які працюють з низьким рівнем пульпи, мають продуктивність дещо більшу, ніж млини з високим рівнем пульпи. Так, продуктивність млинів з решіткою приблизно на 15 % вище продуктивності млинів з центральним розвантаженням. Цей факт пояснюється тим, що при низькому рівні пульпи елементи подрібнювального середовища діють більш ефективно. Продуктивність млинів з гладкою футеровкою менше, ніж млинів з ребристою футеровкою.

### **3.5.2 Розрахунок продуктивності барабанних млинів**

Продуктивність барабанних млинів розраховують за методом подібності, виходячи з практичних даних роботи млинів на подібній сировині при режимах, близьких до оптимального. Розрахунок роблять за *питомою продуктивністю* або за *ефективністю подрібнення*. При розрахунку враховують відмінності в подрібнюваності, крупності вихідно-

го і подрібненого продуктів, розмірах млинів і способі їхнього розвантаження.

*Розрахунок продуктивності млина за питомим навантаженням*

За цим методом експериментально визначають питому продуктивність еталонного (який працює на діючій фабриці) млина за новоутвореним розрахунковим класом. За розрахунковий звичайно беруть клас крупності – 0,074 мм.

*Питома продуктивність* проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом визначається за формулою:

$$q = q_e k_n k_k k_T k_\varphi k_\psi k_L k_D, \quad (3.137)$$

де  $q$  – питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м<sup>3</sup>;  $q_e$  – питома продуктивність еталонного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м<sup>3</sup>;  $k_n$  – коефіцієнт, що враховує відмінності в подрібнюваності проектного до переробки руди і руди, що переробляється;  $k_k$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в крупності вихідного і кінцевого продуктів на діючій та проективній фабриках;  $k_T$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в типі проектного і працюючого млинів;  $k_\varphi$  – коефіцієнт, що враховує розходження в об'ємному заповненні проектного і працюючого млинів подрібнювальним середовищем;  $k_\psi$  – коефіцієнт, що враховує розходження в частоті обертання проектного і працюючого млинів;  $k_L$  – коефіцієнт, що враховує розходження в довжині барабанів проектного і працюючого млинів;  $k_D$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в діаметрах барабанів проектного і працюючого млинів.

*Коефіцієнт подрібнюваності руди  $k_n$*  визначають у процесі досліджень проектного руди на подрібнюваність. Звичайно  $k_n > 1$ , якщо проективна для переробки руда має меншу міцність від еталонної, і  $k_n < 1$ , якщо проективна для переробки руда має більшу міцність від еталонної. Якщо міцність проективної для переробки руди і еталонної однакова, то коефіцієнт подрібнюваності  $k_n = 1$ .

*Коефіцієнт крупності руди  $k_k$*  визначається співвідношенням відносної продуктивності проектного і еталонного млинів:

$$k_k = m / m_e, \quad (3.138)$$

де  $m$  – відносна продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом при заданій крупності вихідного і кінцевого продуктів;  $m_e$  – те ж для еталонного млина.

Відносну продуктивність млини приймають відповідно до даних табл. 3.4.

**Таблиця 3.4 – Відносна продуктивність млинів за новоутвореним класом – 0,074 мм залежно від крупності вихідного і кінцевого продуктів**

| Крупність вихідного матеріалу, мм | Вміст класу –0,074 мм в кінцевому продукті, % |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
|                                   | 30  | 40   | 48   | 60   | 72   | 85   | 95   |
| 0 - 40                            | 0,68  | 0,77 | 0,81 | 0,83 | 0,81 | 0,80 | 0,78 |
| 0 - 20                            | 0,81  | 0,89 | 0,92 | 0,92 | 0,88 | 0,86 | 0,82 |
| 0 - 15                            | 0,87  | 0,95 | 0,98 | 0,96 | 0,91 | 0,88 | 0,83 |
| 0 - 10                            | 0,96  | 1,02 | 1,03 | 1,00 | 0,93 | 0,90 | 0,84 |
| 0 - 5                             | 1,11  | 1,15 | 1,13 | 1,05 | 0,95 | 0,91 | 0,85 |
| 0 - 3                             | 1,17  | 1,19 | 1,16 | 1,06 | 0,95 | 0,91 | 0,85 |

Коефіцієнт типу млина  $k_T$  (табл. 3.5) враховується, якщо тип розвантаження проектного млина відрізняється від еталонного.

**Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнта  $k_T$**

| Співвідношення типів млинів | Проектований | МШЦ | МШЦ | МШР | МШР |
|-----------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
|                             | Еталонний    | МШР | МШЦ | МШР | МШЦ |
| Значення $k_T$              |              | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |

Коефіцієнт частоти обертання  $k_\psi$  вводять при розбіжності між частотами обертання проектного  $\psi$  і еталонного  $\psi_e$  млинів (табл. 3.6):

$$k_\psi = \psi / \psi_e, \quad (3.139)$$

**Таблиця 3.6 – Граничні частоти обертання млинів**

| Тип млина  | МШЦ     | МШЦ і МШР об'ємом до 50 м <sup>3</sup> | МШЦ і МШР об'ємом 50-100 м <sup>3</sup> | МШЦ і МШР об'ємом більше 100 м <sup>3</sup> |
|------------|---------|--|---|---|
| $\psi, \%$ | 60 - 72 | 75 - 85                                | 75 - 82                                 | 70 - 78                                     |

Коефіцієнт заповнення подрібнювальним середовищем  $k_\phi$  запроваджується при розбіжності в ступені заповнення проектного  $\phi$  й ета-

лонного  $\varphi_e$  млинів подрібнювальними тілами (максимальний ступінь заповнення – табл. 3.7):

$$k_\varphi = \varphi / \varphi_e, \quad (3.140)$$

**Таблиця 3.7 – Максимальний ступінь заповнення млинів подрібнювальним середовищем**

| Тип млина     | МСЦ | МШЦ | МШР |
|---------------|-----|-----|-----|
| $\varphi, \%$ | 35  | 42  | 45  |

Середня насипна густина середовища при розрахунках приймається для куль  $4,6 \text{ т/м}^3$ , для стержнів  $6,6 \text{ т/м}^3$ .

Коефіцієнт довжини млина  $k_L$  визначають за формулою:

$$k_L = (L / L_e)^{0,15}, \quad (3.141)$$

де  $L$  і  $L_e$  – довжина проектного і еталонного млинів, м.

Коефіцієнт діаметра млина  $k_D$  визначають за формулою:

$$k_D = \sqrt{(D - 2t) / (D_e - 2t_e)}, \quad (3.142)$$

де  $D$  і  $D_e$  – діаметри проектного і еталонного млинів, м;  $t$  і  $t_e$  – товщина футеровки проектного і еталонного млинів:

$$t = 0,04 + 0,02D, \text{ м.} \quad (3.143)$$

*Продуктивність млина по вихідній руді:*

$$Q = Vq / (\beta_k - \beta_g), \text{ т/год,} \quad (3.144)$$

де  $V$  – номінальний об'єм барабана проектного млина,  $\text{м}^3$ ;  $q$  – питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом,  $\text{т/год} \cdot \text{м}^3$ ;  $\beta_g$  і  $\beta_k$  – вміст розрахункового класу крупності відповідно у вихідному живленні і готовому кінцевому продукті, частки од.

Визначивши продуктивність млинів декількох типорозмірів, необхідно зробити їхнє порівняння і вибрати варіант найменш метало- і енергоємний. Практично у всіх випадках доцільний перехід від використання млинів меншого об'єму до більшого.



Методика розрахунку за питомим навантаженням використовується для визначення продуктивності барабанних млинів зі сталевими подрібнювальними тілами.

*Розрахунок продуктивності млина за ефективністю подрібнення*

Ця методика використовується при розрахунку продуктивності млинів самоподрібнення.

Ефективність подрібнення для проектного млина розраховують за формулою:

$$e = e_e k_n k_k, \quad (3.145)$$

де  $e$  – ефективність подрібнення проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/кВт·год;  $e_e$  – ефективність подрібнення еталонного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/кВт·год;  $k_n$  і  $k_k$  – коефіцієнти подрібнюваності і крупності, обумовлені так само, як і при розрахунку млина за питомою продуктивністю.

Коефіцієнти, що враховують розміри і тип млина, у формулу не включені, тому що мало впливають на ефективність подрібнення.

Продуктивність млина по вихідній руді визначається за формулою:

$$Q = N \eta e / (\beta_k - \beta_e), \text{ т/год}, \quad (3.146)$$

де  $N$  – установлена потужність електродвигуна млина, кВт;  $\eta$  – коефіцієнт використання потужності електродвигуна ( $\eta = 0,85 - 0,90$ ); інші позначення ті ж самі.

Вибір варіанта установлення млинів здійснюється так само, як і при використанні попередньої методики.

### **3.6. Моделювання процесів у проточній і розвантажувальній частині барабанного млина**

#### **3.6.1. Модель руху матеріалу в проточній частині барабанного млина**

При роботі барабанного млина мокрого подрібнення відбувається рух частинок подрібнюваного матеріалу як по параболічних траєкторіях за рахунок дії відцентрових сил, так і уздовж барабана млина від завантажувального його кінця до розвантажувального. Швидкість проходження пульпи до розвантажувального кінця барабана і своєчасне розвантаження її значною мірою визначають ефективність всього процесу подрібнення.

Аналітичне визначення взаємозв'язку між витратою пульпи, її фізико-механічними властивостями і гідравлічним тиском при русі матеріалу уздовж барабана млина має важливе значення для науково обґрунтованого вибору конструктивних і технологічних параметрів млина.

Наявність грудкового матеріалу в барабані обумовлює виникнення додаткових сил тертя, що перешкоджають руху готового продукту через подрібнювальне середовище. При дослідженні безнапірного руху пульпи необхідно враховувати пористість цього середовища. Величина пористості залежить від форми тіл, гранулометричного складу і характеру розподілу цих тіл в даному об'ємі. Крупногрудковий матеріал, застосований в барабанних млинах самоподрібнення як подрібнювальне середовище, під час роботи млина набуває форми, близької до форми кулі або еліпсоїдів. Розміри тіл подрібнення відрізняються один від одного в значних межах. Для спрощення завдання визначення пористості за наявності різнорідних по величині подрібнюючих тіл припустимо, що даний матеріал має форму куль з однаковими діаметрами  $d$ .

У основу дослідження руху пульпи через робочий об'єм барабанного млина приймаємо наступні положення:

1. Руслом потоку є внутрішня горизонтальна циліндрова поверхня корпусу барабана млина.

2. Нормальні перетини вважаємо плоскими і вертикальними (похил дна  $i = 0$ ).

3. Нижньою лінією потоку буде дно русла, а верхньою – крива депресії.

Приймаючи ці допущення, замість дійсного фільтраційного потоку отримуємо його розрахункову модель (рис. 3.35). Для розрахункової схеми величина п'єзометричного похилу в усіх точках даного нормального перетину однакова і рівна похилу вільної поверхні, тобто п'єзометрична лінія співпадає з вільною поверхнею.

В результаті безперервної рівномірної подачі початкової сировини і води в барабанний млин, настає момент, коли витрата пульпи  $Q$  через розвантажувальні ґрати стає рівною притоку. Цьому сталому руху пульпи відповідає глибина потоку  $H_1$ , в місці завантаження початкового матеріалу і глибина  $H_2$  перед завантажувальними ґратами млина.

Встановимо аналітичну залежність глибини потоку  $H_1$ , і  $H_2$  від об'ємної витрати  $Q$  пульпи, що фільтрується через подрібнювальне середовище. Для вирішення завдання виділимо довільний нормальний перетин потоку  $a - a$  з глибиною  $H$ , відліченою від нижньої точки внутрішньої поверхні корпусу млина.

Середня швидкість фільтрації  $U$  рівна:

$$U = KJ, \quad (3.147)$$

де  $K$  – коефіцієнт фільтрації, м/с;  $J$  – похил кривої депресії в даному перетині (частки одиниці)

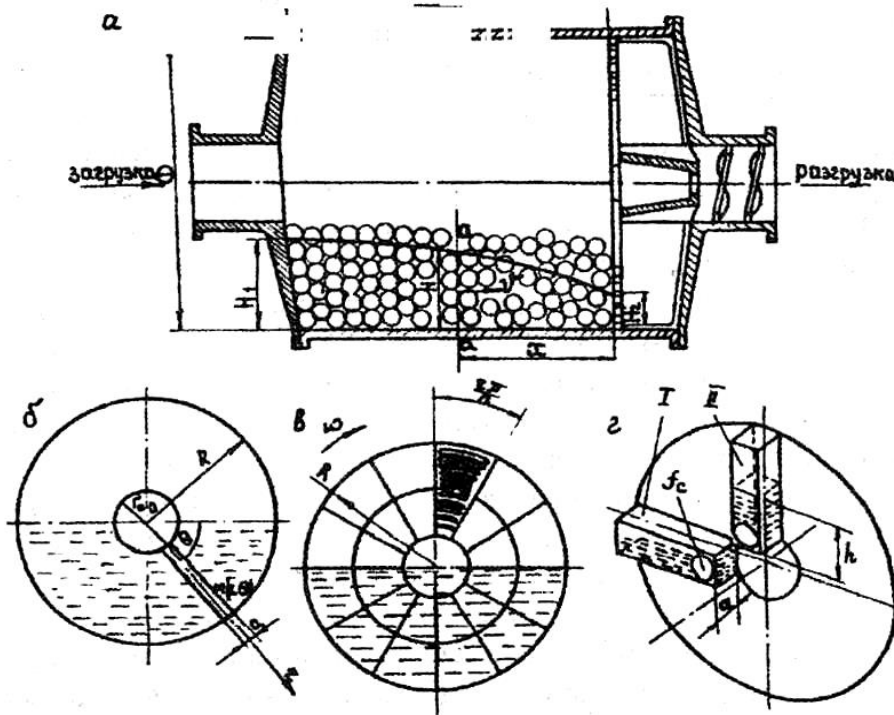


Рис. 3.35. Модель руху матеріалу в проточній частині барабанного млина: а – уподовж подрібнювальної частини барабана; б – через щілину розвантажувальних ґрат; в — через сектор розвантажувальних ґрат; г – по елеватору на розвантаження (I — заповнений пульпою елеватор в горизонтальному положенні, II – елеватор, що розвантажується, у вертикальному положенні).

Якщо вісь  $x$  направити проти протікання потоку, то похил вільної поверхні потоку можна записати у такому вигляді:

$$J = \frac{dH}{dx} > 0 \quad (3.148)$$

Знаючи середню швидкість  $U$  фільтрації в цьому перетині, об'ємну витрату  $Q$  пульпи через подрібнювальне середовище виразимо у формі:

$$Q = FkJ \quad (3.149)$$

де  $F$  – загальна площа фільтрації в даному нормальному перетині,  $\text{м}^2$ .

Площу сегмента  $F$  запишемо через внутрішній діаметр  $D$  барабана млина і глибину  $H$  потоку в даному перетині:

$$F = 4H^{1.5}(D - H)^{0.5} / 3 \quad (3.150)$$

Підставляючи початкові дані в (3.149), отримаємо диференціальне рівняння руху пульпи через подрібнювальне середовище

$$Q = \frac{4}{3} kH^{1.5}(D - H)^{0.5} dH / dx \quad (3.151)$$

Інтегруючи це рівняння в межах зміни  $x$  від 0 до довжини  $\alpha$  робочої зони млина, знайдемо наближене значення витрати пульпи:

$$Q = \frac{8k}{15\alpha} (D - H_1)^{0.5} H_1^{2.5} \beta_1, \text{ м}^3/\text{с}$$

де  $\beta = 1 - (H_2 / H_1)^{2.5}$ .

Середня швидкість фільтрації рівна:

$$U = \frac{2k}{5\alpha} H_1 \beta, \text{ м/с} \quad (3.152)$$

В процесі проведення аналітичних досліджень по встановленню залежності швидкості руху пульпи через робочий об'єм барабанного млина від параметрів середовища використовуємо основні закономірності в'язкої рідини з малими швидкостями. Дійсна площа просвітів в каналах між сферичними помельними тілами наближається до форми криволінійного трикутника. Вона змінюється уздовж осі потоку відповідно до проходження пульпи між тілами.

Швидкість фільтрації  $U$  в даному нормальному перетині потоку пульпи виразимо у функції від дійсної середньої швидкості і сталого руху в порах між помельними тілами, тобто

$$U = n_0 u \quad (3.153)$$

де  $n_0 = F_0 / F$  – коефіцієнт поверхневої пористості подрібнювального середовища, рівний відношенню площі просвітів  $F_0$  між тілами до загальної площі  $F$  фільтрації пульпи.

За умови рівномірного кульового завантаження млина коефіцієнт поверхневої пористості  $n_0$  не залежить від діаметра помельних тіл (куль) і визначається за рівнянням:

$$n_0 = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \alpha} \quad (3.154)$$

де  $\alpha$  – кут між сторонами паралелограма, вершинами якого є центри прилеглих суміжних тіл.

Унаслідок інтенсивного перемішування помельних тіл під час обертання млина встановлюється найбільш щільне розташування цих тіл. Мінімальне значення коефіцієнта поверхневої пористості  $n_0 = 0,0931$  отримуємо при  $\alpha = \frac{\pi}{3}$ .

Для встановленого рівномірного завантаження млина  $n_0$  потрібно визначити експериментально через коефіцієнт об'ємної пористості  $m_0$ .

За дослідженнями Ж.В.Буссінеска при русі в'язкої рідини по каналу з поперечним перетином у формі рівнобічного трикутника площею  $f$  середня швидкість  $i$  потоку рідини рівна:

$$i = \frac{Pf}{20\sqrt{3}\mu l}, \text{ м/с} \quad (3.155)$$

де  $P$  – різниця тиску на кінцях каналу, Па;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини,  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = \text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $l$  – довжина потоку, м.

У барабані млина під час його обертання рух пульпи в каналах подрібнювального середовища відбувається під дією гравітаційного та інерційного полів. Витікає пульпа через отвори розвантажувальних ґрат. Виразимо надлишковий тиск  $P$  через густину пульпи  $\rho$  і різницю напорів  $\Delta H$ , відповідну різниці рівнів пульпи в місці завантаження і розвантаження млина:

$$P = \rho(g + j)\Delta H, \text{ Па} \quad (3.156)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $j = rw$  – прискорення відцентрової сили на відстані  $r$  від осі обертання,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $w$  – кутова швидкість обертання барабана,  $\text{рад}/\text{с}$ .

Середнє значення величини площі  $f$  нормального перетину загального потоку пульпи протікаючої між помельними тілами діаметром  $d$  в  $e$  разів більше найвужчого перетину  $f_{min}$  по довжині потоку:

$$f_{min} = e \cdot f_{min} \quad (3.157)$$

Площа найменшого перетину  $f_{min}$  між кулями діаметром близька до рівнобічного трикутника і рівна:

$$f_{min} = 0,5d^2 \left( \sin d - \frac{\pi}{4} \right) \quad (3.158)$$

У разі однорозмірного завантаження млина  $e$  — 1,435, тобто середня площа на 43,5% більше площі найвужчого перетину каналу. Для рівно-розмірного завантаження млинів площу  $f_{min}$  необхідно виражати у функції середньозваженого розміру  $d_{cp}$  всієї суміші помельних тіл.

Шлях  $l$ , по якому здійснюється рух пульпи при обгинанні сферичних тіл, визначається через довжину робочої камери млина:

$$l = L \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{1 + 2 \cos \alpha}} \quad (3.159)$$

З геометричних побудов кульового завантаження випливає, що коефіцієнт об'ємної пористості  $m_0$  рівний:

$$m_0 = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \alpha) \sqrt{1 + 2 \cos \alpha}} \quad (3.160)$$

Запишемо шлях руху пульпи через коефіцієнт  $m_0$ :

$$l = L \frac{(1 - m_0) \sin \alpha}{\pi} \quad (3.161)$$

Оскільки  $\sin \alpha - \frac{\pi}{4} = n_0 \sin \alpha$ , то середня швидкість руху пульпи рівна:

$$u = \frac{Pf}{20\sqrt{3}\mu l} = \frac{0.5ed^2 n_0 \pi p (g + j) \Delta H}{20\sqrt{3}\mu 6(1 - m_0)L} \quad (3.162)$$

Швидкість фільтрації  $U$  через робочу зону барабанного млина отримаємо в наступному вигляді:

$$U = \frac{\pi e d^2 n_0^2 p (g + j) \Delta H}{240\sqrt{3}\mu (1 - m_0)L} \quad (3.163)$$

Закон ламінарної фільтрації у разі сталого руху рідини представимо залежністю Дарсі, згідно якої швидкість фільтрації  $U$  прямо пропорційна величині гідравлічного похилу  $J$ :

$$U = kJ \quad (3.164)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрації (швидкість фільтрації при гідравлічному похилу = 1).

Порівнюючи формулу Дарсі зі встановленою залежністю (3.163) швидкості фільтрації від основних параметрів подрібнювального середовища і фізико-механічних властивостей пульпи, отримаємо вираз для коефіцієнта фільтрації  $K$ :

$$K = \frac{\pi n_0 e d^2 p (g + j)}{240 \sqrt{3} \mu (1 - m_0)} \quad (3.165)$$

Використавши значення коефіцієнта фільтрації пульпи через пори помельного середовища (3.165), отримаємо взаємозв'язок між витратою  $Q$  пульпи і її рівнем  $H_1$  в місці завантаження барабанного млина:

$$Q = \frac{\pi_0^2 e d^2 p (g + j) (D - H_1)^{0.5} \beta}{450 \sqrt{3} \mu (1 - m_0) L} \quad (3.166)$$

Встановлену залежність рекомендується використовувати при визначенні оптимальних режимів роботи млина для отримання готового продукту подрібнення із заданими фізико-механічними властивостями.

### **3.6.2. Математична модель проходження матеріалу через розвантажувальні ґрати млина**

Розвантажувальна решітка є одним з основних елементів розвантажувального пристрою млина. Вона забезпечує підтримку необхідного рівня подрібнюваного матеріалу в барабані млина. Пропускна здатність ґрат залежить від площі отворів, їх форми, розмірів і профілю робочої поверхні ґрат. Розвантажувальні ґрати виготовляються у вигляді радіальних секторів з круглими, квадратними або щілинними отворами. У разі рівномірного розташування отворів за площею секторів розвантажувальних ґрат, для характеристики їх пропускної здатності (витрати пульпи із заданою величиною подрібнювального матеріалу) введемо коефіцієнт, який залежить від конструкції ґрат і форми їх отворів:

$$k_0 = F_0 / F$$

де  $F_0$  – загальна площа всіх отворів ґрат (решітки), м<sup>2</sup>;  $F$  – сумарна площа секторів ґрат, м<sup>2</sup>.

При одному і тому ж рівні пульпи в барабані млина витрата пульпи пропорційна  $k_0$ .

Розглянемо потік пульпи з циліндрового барабана радіусом  $= 0,5D$  (діаметр  $D$  млина в світлі) через вертикальні розвантажувальні ґрати.

Елементарному майданчику розвантажувальних ґрат  $dF$  відповідає елементарний майданчик отвору з площею  $dF_0$

$$dF_0 = k_0 dF \quad (3.167)$$

При безперервній рівномірній подачі матеріалу і води в млин потік пульпи через кожен отвір у вертикальній стінці відбувається при постійному натиску потоку  $H_i$ . Натиск потоку  $H_i$  розглядаємо як питому енергію потоку в його перетині по центру отвору. Тому середню швидкість пульпи в перетинах отворів, розташованих на глибині  $H_i$  під вільною поверхнею знаходимо з рівняння Д.Бернуллі:

$$u_i = \varphi_i \sqrt{2gH} \quad (3.168)$$

де  $u_i$  – середня швидкість пульпи, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\varphi$  – коефіцієнт швидкості, що враховує вплив гідравлічних опорів.

До отворів частинки пульпи рухаються з усіх боків по криволінійних траєкторіях. Струмінь стискається при виході пульпи з отвору. На стиснення струменя впливає форма отвору і наявність грудкового матеріалу перед отвором. При наявності останнього перетин струменя істотно змінюється. Особливість виток пульпи з млинів – стиснення струменя на деякій частині периметра отвору. Коефіцієнт стиснення струменя  $e$  визначається за формулою

$$e = f_c / f_0 \quad (3.169)$$

де  $f_c$  – площа перетину струменя, м<sup>2</sup>;  $f_0$  – площа отвору, м<sup>2</sup>.

Витрати через отвір дорівнюють:



$$Q_i = E_i k_0 f_0 \varphi_0 \sqrt{2gH_i} \quad (3.170)$$

Введемо коефіцієнт витрати отвору  $a_i$ :

$$\alpha_i = E_i \varphi_i \quad (3.171)$$

Кожен отвір має свої значення коефіцієнта стиснення, коефіцієнта швидкості і коефіцієнта витрати  $\alpha_p$ .

Витрати через ґрати представимо у вигляді суми витрат через  $n$  отворів, прийнявши середнє значення коефіцієнта витрати рівним  $\alpha_p$ :

$$Q = k_0 \sum_{i=1}^n \alpha_p f_0 \sqrt{2gH_i} = k_0 \alpha_p f_0 \sqrt{2g} \sum_{i=1}^n \sqrt{H_i} \quad (3.172)$$

При динамічній рівновазі рівень вільної поверхні пульпи перед ґратами решітки встановлюється залежно від притоку і витрат пульпи через ґрати.

Встановимо аналітичну залежність між витратами пульпи  $Q$  і рівнем вільної поверхні  $H$  перед завантажувальними ґратами (див. рис. 3.35):

$$Q = \int dQ = \int u dF \quad (3.173)$$

де  $dF = 2k_{obdh}$  – елементарна площа отворів на глибині  $h$ .

Швидкість потоку на цій глибині рівна  $u$ :

$$u = \varphi \sqrt{2gH} \quad (3.174)$$

Підставляючи значення швидкості в (3.170) отримаємо:

$$Q = 2\varphi \sqrt{2gk_0} \int_0^k b \sqrt{hdh} \quad (3.175)$$

Запишемо ширину майданчика  $b$  через радіус барабана:

$$b = \sqrt{R^2 - (R \cos \alpha_0 + h)^2} \quad (3.176)$$

Позначимо

$$c = R \cos \alpha_0 \quad (3.177)$$

Розкладемо  $b = (R^2 - (c + h)^2)^{0.5}$  в ряд за формулою бінома Ньютона:

$$b = R \left[ 1 - \left[ \frac{c+h}{R} \right]^2 \right]^{0,5} = R \left[ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{c+h}{R} \right] - \frac{1}{8} \left[ \frac{c+h}{R} \right]^3 + \dots \right] \quad (3.178)$$

Після інтегрування отримаємо залежність:  $Q = \int (H)$

$$Q = 4k_0\varphi\sqrt{2g}RH^{3/2}\left(\frac{1}{3} - \frac{c^2}{2R^2} - \frac{c^4}{8R^4}\right) + \frac{1}{5}\left(\frac{c}{R^2} + \frac{c^3}{2R^4}\right)H - \frac{1}{7}\left(\frac{3c^2}{4R} + \frac{1}{2R^2}\right)H^2 + \frac{c}{18R^4}H^3 \quad \text{м}^3/\text{с} \quad (3.179)$$

Як показує аналіз отриманої залежності, її можна замінити наближеним значенням. Площу змоченого сегменту  $F_c$  визначимо як добуток його основи  $L$  на висоту  $H$

$$F_c = \frac{2}{3}LH, \text{ м}^2, \quad (3.180)$$

$$\text{де } L = 2\sqrt{R^2 - (R-H)^2} = 2\sqrt{H(2R-H)}, \text{ м} \quad (3.181)$$

$$F_c = \frac{2}{3}2H\sqrt{H(2R-H)} = \frac{4}{3}H\sqrt{H(2R-H)} = \varphi_n\pi R^2, \text{ м}^2 \quad (3.182)$$

де  $\varphi_n$  – ступінь заповнення барабана пульпою (частки одиниці).

Витрату пульпи запишемо через середню теоретичну швидкість потоку  $U_c$  в центрі ваги сегменту, прийнявши тиск витікання  $H_c$ , що дорівнює:

$$H_c = \frac{1}{3}H + H_j \quad (3.183)$$

де  $H_j$  – тиск, обумовлений відцентровою силою при обертанні барабана

$$H_j = \left(R - \frac{2}{3}H\right)^2 \varpi^2 / 2g, \text{ м} \quad (3.184)$$

$\varpi$  – кутова швидкість обертання барабана.

$$Q = \alpha_p k_0 F_c U_c \quad (3.185)$$

$$U_c = \sqrt{2gH_c} = \sqrt{\frac{2}{3}gH + R^2\varpi^2 - \frac{4}{3}RH\varpi^2 + \frac{4}{9}H^2\varpi^2} \quad (3.186)$$

Після спрощення визначимо наближене значення середньої теоретичної швидкості потоку  $U_c$  в центрі ваги сегменту:

$$U_c = \sqrt{H \frac{2}{3} g + 2R\varpi^2 - \frac{4}{3} R\varpi^2 + \frac{2}{9} R\varpi^2} = \sqrt{H \left( \frac{2}{3} g + R\varpi^2 \right)}, \text{ м/с} \quad (3.187)$$

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

Пропускна спроможність розвантажувальних решіток дорівнює:

$$Q = \alpha_p k_0 \frac{4}{3} H^2 (2R - H)^{0,5} \left( \frac{2}{3} g + R\varpi^2 \right)^{0,5} \quad (3.188)$$

За експериментальними даними при ламінарному потоці пульпи через отвори розвантажувальних решіток коефіцієнт витрати  $\alpha_p$  залежить від густини  $\rho$  пульпи і значення її коефіцієнта динамічної в'язкості  $\mu$ :

$$\alpha_p = 0,13 \lg \frac{4U\rho f}{\mu x} \quad (3.189)$$

де  $f$  – площа отвору,  $\text{м}^2$ ;  $x$  – змочений периметр отвору,  $\text{м}$ .

Із залежності (3.188) визначимо рівень пульпи перед розвантажувальними решітками:

$$H = 0,865 Q^{0,5} / \alpha_p^{0,5} D^{0,25} \left( \frac{2}{3} g + 0,5 D \varpi^2 \right)^{0,25} \quad (3.190)$$

Оскільки коефіцієнт витрати  $\alpha_p$  залежить від швидкості витікання пульпи, рішення задачі можливе методом послідовних наближень.

Виведені аналітичні залежності можуть бути використані як наукова основа для розробки нових конструкцій вузлів проточної частини барабанних млинів з урахуванням основних параметрів роботи млина: швидкості і витрати потоку пульпи (формули 3.187 і 3.188) та рівня пульпи перед розвантажувальними решітками (формула 3.190).

Окрім цього, ці викладки є теоретичною базою для розробки програми імітаційного моделювання кінетики руху пульпи в проточній частині барабанного млина.

### 3.6.3. Основи кінетики матеріалу в розвантажувальній частині барабана млина

Ефективність подрібнення руди і мінеральної сировини в барабанному млині в значній мірі визначається конструктивними особливостями вузла розвантаження. В результаті недосконалості конструкції розвантажувальної частини барабана млина (решіток, розвантажувальних елеваторів, розвантажувального конуса) виникає внутрішньо-

млинова циркуляція, що істотно знижує ефективність роботи млина. З цієї причини значна частина пульпи, що пройшла через отвори ґрат в розвантажувальну камеру, в процесі розвантаження її розвантажувальними елеваторами не потрапляє в розвантажувальну втулку, а повертається назад в помельну камеру барабана через отвори ґрат. З одного боку це обумовлено відносно пізнім початком ковзання подрібненого матеріалу по розвантажувальному елеватору, з іншого боку, існуюча конструкція розвантажувальних ґрат, елеваторів і вузла їх сполучення дає можливість пульпі, що рухається по елеватору на розвантаження, вільно витікати через отвори ґрат назад в млин, створюючи непродуктивну внутрішньомлинову циркуляцію.

Розглянемо механізм руху пульпи за один поворот барабана в замкнутій системі: помельна камера барабана – решітка – розвантажувальна камера. Прийmemo, що пульпа займає сектор розвантажувальної камери в половину круга (рис. 3.36), число секторів з розвантажувальними елеваторами –  $n$ , кутова швидкість обертання барабана  $\omega$  рад/с, об'єм камери одного розвантажувального сектора  $V_p$  м<sup>3</sup>. Рух кожного розвантажувального сектора за один оберт можна розділити на чотири періоди.

У *перший період* відбувається заповнення розвантажувальної камери з моменту початку занурення сектора в пульпу до повного його занурення. Протікання пульпи в розвантажувальну камеру відбувається через отвори ґрат змінного перетину

$$S_p = k_c S_p(\tau) = k_c \frac{1}{2} R^2 \omega \tau \quad (3.191)$$

де  $\tau$  – час з моменту початку занурення, с;  $R$  – радіус барабана, м;  $k_c$  – коефіцієнт ефективного перерізу ґрат (що враховує опір шару руди перед ґратами).

Для середньої швидкості протікання пульпи  $V_1$  м/с, в даний період отримаємо витрати пульпи за одиницю часу:

$$Q(\tau) = V_1 S_p(\tau) = k_c \frac{V_1}{2} R^2 \omega \tau \quad (3.192)$$

До часу повного вивантаження сектора у розвантажувальну камеру потрапить наступна кількість пульпи:

$$Q = \int_0^{\tau_1} Q(\tau) d\tau = k_c \int_0^{\tau_1} \frac{V_1}{2} R^2 \omega \tau d\tau = k_c \frac{V_1}{4} R^2 \omega \tau_1^2 \quad (3.193)$$

де  $\tau = \frac{2\pi}{n\omega}$  – тривалість даного періоду, с.

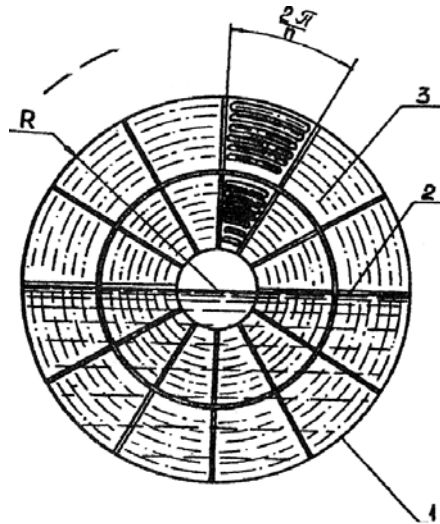


Рис. 3.36. Загальний вид розвантажувальних ґрат барабана млина:  
1 – обичайка барабана; 2 – рівень пульпи в барабані; 3 – сектор розвантажувальних ґрат.

У другому періоді відбувається заповнення камери зануреного в пульпу розвантажувального сектора. Час руху розвантажувального сектора в режимі повного занурення в пульпу складе:

$$\tau = \frac{\pi}{\omega} \left( 1 - \frac{2}{n} \right) \quad (3.194)$$

За час  $\tau_2^1$  розвантажувальна камера буде повністю завантажена:

$$V_p = Q_1 + Q_2 \quad (3.195)$$

де  $Q_2$  – кількість пульпи, що надійшла в розвантажувальну камеру за другий період, м<sup>3</sup>.

Під час другого періоду пульпа надходить в розвантажувальну камеру через повну площу отворів сектора ґрат:

$$S_p = k_{жс} \frac{\pi R^2}{n} \quad (3.196)$$

де  $k_{жс}$  – коефіцієнт живого перетину ґрат.

Середня швидкість протікання пульпи через отвори ґрат в даний період є змінною і в кожен момент часу описується наступною залежністю:

$$V_2(\tau) = \frac{1}{S_p} \int_0^{\frac{2\pi}{n}} \int_0^R V_2(\tau, \theta, r) d\theta dr \quad (3.197)$$

де  $\theta$  – поточний полярний кут, град;  $r$  – поточний радіус, м;  $S_p$  – площа перетину отвору сектора розвантажувальних грат.

Тоді кількість пульпи, що надійшла в розвантажувальну камеру в другий період її руху, дорівнюватиме:

$$Q_2 = k_c S_2 \int_0^{\tau_2} V_2(\tau) d\tau \quad (3.198)$$

Після закінчення часу  $\tau_2^1$  рівні пульпи в помельній і розвантажувальній камерах стануть однаковими і заповнення розвантажувальної камери припиниться. Загальна витрата пульпи в період описаний вище за два цикли заповнення розвантажувальної камери визначається з виразу:

$$V_p = Q_1 + Q_2 = k_c \left( \frac{V_1}{4} R^2 \omega \tau_1^2 + S_p \int_0^{\tau_2^1} V_2(\tau) d\tau \right) \quad (3.199)$$

У третьому періоді в процесі обертання барабана відбувається подальший рух розвантажувального сектора з моменту початку виходу з пульпи до початку протікання пульпи по елеваторах на розвантажувальний конус. Оскільки швидкість обертання барабана постійна, то тривалість третього періоду рівна тривалості першого (періоду занурення):

$$\tau_3 = \tau_1$$

У третьому періоді матеріал з розвантажувальної камери також рухається через грати назад в помельну камеру. Кількість матеріалу, що повернувся в помельну камеру, визначається з виразу:

$$Q_3 = \int_0^{\tau_1} Q_3(\tau) d\tau = k_c \int_0^{\tau_1} \frac{V_3}{2} R^2 \omega \tau d\tau = k_c \frac{V_3}{4} R^2 \omega \tau^2 \quad (3.200)$$

де  $V_3$  – середня швидкість протікання пульпи через отвори грат, м/с.

*Четвертий період* продовжується від моменту початку протікання пульпи по розвантажувальних елеваторах на розвантажувальний конус до повного спорожнення розвантажувальної камери. Тривалість четвертого періоду  $\tau_4$ , с. У четвертому періоді частина матеріалу з розвантажувальної камери рухається на розвантажувальний конус, а через грати частина надходить назад в помельну камеру. Рух пульпи по елеваторах і

через отвори ґрат відбувається із змінними середніми швидкостями  $V_4^1(\tau)$  і  $V_4(\tau)$  через змінні перетини  $S_e(\tau)$  і  $S_p(\tau)$  відповідно. Тоді за четвертий період розвантажиться наступна кількість пульпи:

$$Q_4^1 = \int_0^{\tau_4} Q(\tau) d\tau = \int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_e(\tau) d\tau \quad (3.201)$$

де  $V_4^1(\tau)$  – середня швидкість протікання пульпи на розвантажувальний конус, м/с;  $S_e(\tau)$  – площа перетину розвантажувального елеватора, м<sup>2</sup>.

Повернеться в млин відповідно така кількість пульпи:

$$Q_4 = \int_0^{\tau_4} Q(\tau) d\tau = \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau \quad (3.202)$$

де  $V_4(\tau)$  – швидкість протікання пульпи в розвантажувальну камеру, м/с;  $S_p(\tau)$  – площа перетину отворів сектора розвантажувальних ґрат, м<sup>2</sup>.

Загальний об'єм пульпи, що повернулася назад у млин, (внутрішньомлинова циркуляція), визначається як:

$$Q_y = Q_3 + Q_4 = k_c \frac{V_3}{4} R^2 \omega \tau_1^2 + \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau \quad (3.203)$$

Об'єм пульпи, що потрапила по елеваторах на розвантажувальний конус:

$$Q_p = Q_4^1 = \int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_e(\tau) d\tau \quad (3.204)$$

Оскільки об'єм сектора розвантажувальної камери, що заповнюється за один оберт пульпою  $V_p$  то справедливим є наступне співвідношення:

$$V_p = Q_y + Q_p = k_c \frac{V_3}{4} R^2 \omega \tau_1^2 + \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau + \int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_e(\tau) d\tau \quad (3.205)$$

Для характеристики відносної величини внутрішньомлинової циркуляції вводимо поняття коефіцієнта рециклу або повернення  $k_p$ :

$$k_p = \frac{Q_y}{Q_y + Q_p} = \frac{Q_p}{V_p} \quad (3.206)$$

Підставивши в (3.206) значення  $Q_y$  і  $V_p$  із (3.203) і (3.205) отримаємо:

$$k_p = \frac{k_c \frac{V_3}{4} R \omega \tau_1^2 + \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau}{k_c \frac{V_3}{4} R^3 \omega \tau_1^2 + \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau + \int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_e(\tau) d\tau} \quad (3.207)$$

Для оцінки ефективності роботи розвантажувального вузла млина вводимо поняття коефіцієнта ефективності  $k_e$ , який визначатиметься як відношення об'єму матеріалу, що розвантажуються з млина, до загального об'єму матеріалу, що пройшов через ґрати, в розвантажувальну камеру, тобто

$$k_e = \frac{Q_p}{Q_y + Q_p} = \frac{Q_p}{V_p} = \frac{\int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_s(\tau) d\tau}{k_c \frac{V_3}{4} R^2 \omega \tau_1^2 + \int_0^{\tau_4} V_4(\tau) S_p(\tau) d\tau + \int_0^{\tau_4} V_4^1(\tau) S_e(\tau) d\tau} \quad (3.208)$$

З рівнянь (3.206), (3.207) і (3.208) витікає:

$$k_p + k_e = 1$$

При стаціонарному режимі роботи млина загальна кількість завантаженого в барабан матеріалу за один оберт  $V_0$ , м<sup>3</sup> дорівнює кількості матеріалу, вивантажуваного всіма  $n$  секторами розвантажувальної камери:

$$V_0 = nQ_p \quad (3.209)$$

Загальний об'єм  $n$  розвантажувальних секторів:

$$V = nV_p \quad (3.210)$$

Тоді внутрішньомлинова циркуляція дорівнює:

$$Q_y = V - V_0 = nV_p - V_0 \quad (3.211)$$

Коефіцієнт рециркуляції (або внутрішньомлинової циркуляції) в загальному випадку визначається наступним чином:

$$k_p = \frac{nV_p - V_0}{nV_p} = 1 - \frac{V_0}{V} \quad (3.212)$$

Відповідно, коефіцієнт ефективності розвантаження буде дорівнювати:



$$k_e = \frac{V_0}{V} \quad (3.213)$$

Якісний аналіз запропонованої моделі роботи розвантажувального вузла млина і виведених рівнянь (3.203), (3.204), (3.207) і (3.208) дозволяє зробити наступні **висновки**:

1. Оптимальною є конструкція розвантажувального вузла, яка не дає внутрішньомлинової циркуляції, тобто коли весь матеріал, який пройшов через грати в завантажувальні елеватори вивантажується з млина. В цьому випадку величина внутрішньомлинової циркуляції  $Q_y = 0$ , а об'єм матеріалу, що надходить в млин дорівнює об'єму вивантажуваного, тобто  $V_0 = V_p$ .

2. Живий перетин грат (решітки), перетин і об'єм завантажувальних елеваторів повинен бути таким, щоб за час руху в пульпі розвантажувальна камера повністю заповнювалася, в той же час різниця між часом руху сектора в пульпі і необхідним часом його заповнення повинна бути мінімальною або рівною нулю, тобто

$$\Delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_2^1 = 0$$

Це дозволяє зменшити внутрішньомлинову циркуляцію, усунути переподрібнення матеріалу і підвищити ефективність роботи млина.

3. Конструкція розвантажувальної частини барабанного млина (решітка, елеватори, конус) повинна забезпечувати проходження з помельної камери в розвантажувальну максимального об'єму пульпи і перешкоджати її перетіканню назад.

Водночас, бажано мінімізувати перетікання пульпи з елеватора у помельну камеру. Для цього в інституті Механобрчормет і ДГІ були проведені дослідження, що дозволяють визначити оптимальну форму бічних стінок розвантажувального елеватора і оптимальні координати точок з'єднання елеватора з розвантажувальним конусом. Встановлено, що для забезпечення одночасного початку руху частинок подрібненого матеріалу на розвантаження форма поверхонь бічних стінок елеватора повинна бути описана рівнянням:

$$\frac{x^2 \left( y - 1 / \psi^2 \right)^2}{x_n + \left( y_n - 1 / \psi^2 \right)^2} = e^{2\mu} \left( \arctg \frac{y_n - 1 / \psi^2}{x_n} - \arctg \frac{y_n - 1 / \psi^2}{x} \right) \quad (3.214)$$

Встановлено також, що оптимальні координати точки під'єднання елеватора до розвантажувального конуса такі:

$$x_n = \frac{\mu R_n}{(1 - \mu^2)(\psi^2 R_n + \sqrt{1 + \mu^2(1 - R_n^2 \psi^2)})} \quad (3.215)$$

$$y_n = -\sqrt{R_n^2 - x_n^2} \quad (3.216)$$

де  $x_1, y_1$  – поточні координати бічної стінки на площині решітки (відносних, од.);  $x_n, y_n$  – координати точки дотику дотичної до кола з центром на осі обертання млина (відносних, од.);  $\psi$  – відносна частота обертання барабана в частках одиниці від критичної,  $\psi/\psi_k$ ;  $\psi$  – частота обертання барабана, 1/с;  $\psi_k$  – критична частота обертання барабана  $\left(\omega_k = \sqrt{g/R_o}\right)$ , 1/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт тертя частинок продукту об поверхню елеватора;  $R_n = R_n^1/R_o$  – радіус окружності з центром на осі обертання млина, в. од.;  $R_k^1$  – радіус розвантажувального конуса, м;  $R_o$  – радіус барабана млина, м.

Приведені вище науково-теоретичні і аналітичні викладки пояснюють фізичну суть явищ, що відбуваються в проточній частині барабанного млина і дають певну якісну картину проходження матеріалу в барабані млина від моменту його завантаження в барабан до вивантаження з млина готового продукту.

Запропонована математична модель може бути використана як наукова база для розрахунку конструктивних і технологічних параметрів основних вузлів проточної частини млина, футеровок, ґрат (решітки), розвантажувальних елеваторів .

### 3.6.4. Математичні моделі електроспоживання дробильно-збагачувальних фабрик

Тривалі дослідження енергоємності процесів рудопідготовки (у тому числі і дезинтеграції руди) проводилися в різних країнах на 14-ти найбільших гірничо-збагачувальних комбінатах, що переробляють різну за фізико-механічними властивостями сировину.

Встановлені якісні і кількісні характеристики енергоспоживання у процесах збагачувального переділу з яких витікає, що на процес дезинтеграції руд припадає 50-70% загальних витрат, при цьому витрата електроенергії на подрібнення складає в середньому близько 60%, а на дроблення всього 5% (рис. 3.37).

Тому зниження витрат електроенергії на дезинтеграцію руд є надзвичайно важливою науково-технічною проблемою.

На підставі результатів досліджень побудовані математичні моделі енергоспоживання процесів дроблення і подрібнення руди, питомих і загальних витрат електроенергії на збагачувальних фабриках .

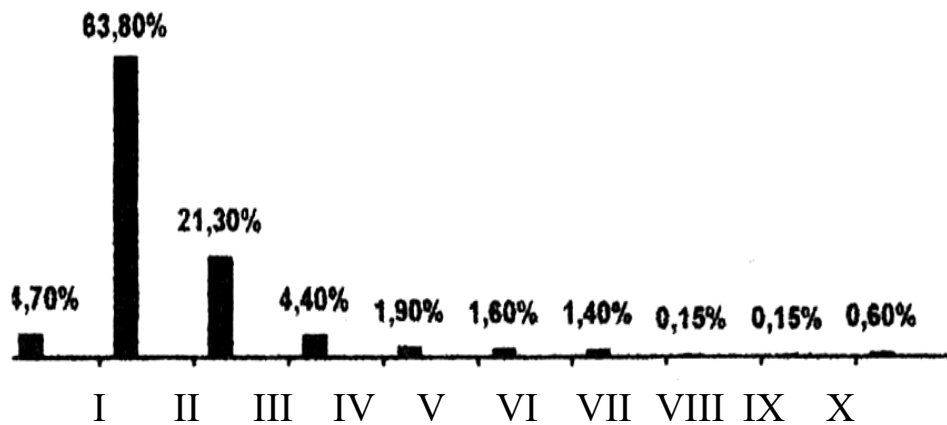


Рис. 3.37. Діаграма розподілу енергоспоживання по окремих процесах на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК: I – дроблення; II – подрібнення; III – транспорт пульпи; IV – конвеєрний транспорт; V – зневоднення; VI – магнітна сепарація; VII – сантехнічне устаткування; VIII – класифікація; IX – освітлення; X – інші споживачі

Рівняння множинної кореляції енергоспоживання дробильної фабрики має вигляд:

$$E_{\text{пум.др.}} = -8,83 - 0,0975 X_1 + 0,0535 X_2 + 107,2 X_3 - 3,63 X_4 - 2,93 X_5 + 0,015 X_6 + 13,4 X_7 + 19,9 X_8 + 2,98 X_9 + 11,2 X_{10} + 0,002 X_{11}$$

$$E_{\text{р.др.}} = -84,8 + 1,2 X_1 + 0,506 X_2 + 2,07 X_3 - 70,4 X_4 + 53,6 X_5 + 14,06 X_6 + 59,08 X_7 + 114,8 X_8 + 60,3 X_9 + 58,4 X_{10} + 0,12 X_{11}$$

де:  $E_{\text{пум.др.}}$  – питомі витрати електроенергії на 1 т роздробленої руди, кВт ч/т;  $X_1$  – річна продуктивність дробильної фабрики;  $X_2$  – міцність руди – (ум. од.);  $X_3, X_4, X_5, X_6$  – приведений розмір розвантажувальної щілини дробарок стадії відповідно крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення %;  $X_7, X_8, X_9, X_{10}$  – встановлені потужності відповідно стадій крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення %;  $X_{11}$  – приведена крупність початкової руди %;  $E_{\text{р.др.}}$  – річні витрати електроенергії на дроблення, кВт•год.

Коефіцієнт множинної кореляції для рівнянь 0,96- 0,98.

Рівняння множинної регресії питомих і загальних витрат електроенергії на збагачувальних фабриках:

$$E_{\text{уд1}} = 30,706 - 0,465Y_1 + 0,07Y_2 + 0,021Y_3 + \\ + 0,177Y_4 - 0,131Y_5 + 0,02Y_6 - 0,023Y_7 - 0,007Y_8 - \\ - 4,348Y_{10} + 0,206Y_{11} - 0,734Y_{12} + 0,296Y_{13} + 3,6Y_{14} + \\ + 0,026Y_{15} + 0,718Y_{16}$$

$$E_{\text{уд2}} = 269,91 - 1,644Y_1 + 0,14Y_2 - 1,307Y_3 - 0,602Y_4 - \\ - 0,285Y_5 + 0,042Y_6 - 0,127Y_7 - 0,0714Y_8 - 84,576Y_9 + \\ + 0,116Y_{10} + 1,458Y_{11} - 3,673Y_{12} + 1,187Y_{13} + 0,114Y_{14} - \\ - 0,129Y_{15} + 2,471Y_{16}$$

$$E_{\text{уд3}} = 69,1 + 0,29Y_1 + 0,12Y_2 + 0,29Y_4 - 0,32Y_5 + \\ + 0,11Y_6 - 0,03Y_7 - 0,004Y_8 - 125,1Y_9 - 3,6Y_{10} + \\ + 0,45Y_{11} - 0,38Y_{12} + 0,21Y_{13} + 0,06Y_{14} + 0,31Y_{15} + \\ + 0,35Y_{16}$$

$$E_{\text{уд4}} = 866,233 - 0,269Y_2 - 0,0014Y_4 + 9,77Y_5 - \\ - 5,59Y_6 + 0,02Y_7 - 1068,11Y_9 - 13,42Y_{10} + 0,301Y_{14} + \\ + 0,776Y_{16} - 0,02Y_1Y_2 + 0,02Y_1Y_4 - 212,6Y_1$$

$$E_{\text{уд5}} = 949,327 - 0,022Y_2 - 4,64Y_4 - 13,62Y_5 + \\ + 30,44Y_6 - 8,33Y_7 + 1,301Y_9 + 1441,8Y_{10} - 65,92Y_{14} - \\ - 4,039Y_{15} + 7,622Y_{16} - 0,002Y_3Y_4 + 0,338Y_3Y_6 - \\ - 78,67Y_3Y_{11} + 0,081Y_3Y_{15} + 0,105Y_3Y_{16}$$

$$E_6 = 0,261 - 0,002Y_2 - 0,019Y_4 - 0,1384Y_5 - 0,026Y_6 + \\ + 0,1914Y_7 + 0,025Y_9 + 26,75Y_{10} - 0,876Y_{14} - \\ - 0,0576Y_{15} + 0,31Y_{16}$$

де:  $E_{\text{уд1}}$  – питома витрата електроенергії на 1 т початкової руди для фабрик з кульовими і стрижньовими млинами;  $Y_1$  – загальна кількість переробленої руди, млн.т;  $Y_2$  – об'єм млинів по РОФ, м<sup>3</sup>;  $Y_3$  – вихід концентрату %;  $Y_4$  – вміст класу +20 мм в початковій руді %;  $Y_5$  – вміст класу -0,074 мм в концентраті %;  $Y_6, Y_7, Y_8$  – циркуляційне навантаження відповідно першої, другої і третьої стадій подрібнення %;  $Y_9$  – частота обертання барабана млина %;  $Y_{10}$  – приведений діаметр млинів, м;  $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}$  – ступінь заповнення помельними тілами, відповідно першої,

другої і третьої стадій подрібнення %;  $U_{14}, U_{15}$  – загальна встановлена потужність фабрик і млинів, кВт;  $U_{16}$  – питома витрата води на 1 т концентрату  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $E_{уд2}$  – питома витрата електроенергії на 1 т концентрату, кВт•год/т;  $E_3$  – загальна витрата електроенергії по фабриці, кВт•год;  $E_{уд4}$  – питома витрата електроенергії для збагачувальних фабрик з самоподрібненням на 1 т початкової руди, кВт•год/т;  $E_{уд5}$  – те ж, на 1 т концентрату кВт•год/т;  $E_6$  – загальна витрата електроенергії на фабриці з самоподрібненням, кВт•год.

Коефіцієнт множинної кореляції для рівняння складає 0,96-0,99.

Аналіз парних коефіцієнтів кореляції в отриманих рівняннях дозволяє зробити висновки про ступінь впливу різних чинників на витрати електроенергії на дезинтеграцію руди і розробити науково-обгрунтовані заходи щодо їх зниження.

### **3.6.5. Експериментальна перевірка теоретичних викладок і впровадження основних науково-технічних розробок у промисловість**

Як впливає з аналітичних викладок для інтенсифікації розвантаження подрібненого матеріалу з барабана млина і підвищення ефективності його роботи розвантажувальні елеватори і решітка млина повинні мати конструкцію, що забезпечує проходження в розвантажувальну камеру максимального об'єму пульпи, в той же час перешкоджає її виливанню назад в помельну камеру.

Цим вимогам відповідає конструкція розвантажувальних елеваторів з бічними стінками, що мають нахил до ґрат млина у бік обертання її барабана (згідно а.с. 589018), розроблена на підставі результатів проведених експериментальних досліджень (рис. 3.38).

Для перевірки ефективності роботи запропонованої конструкції розвантажувального пристрою млина виконані напівпромислові випробування на дослідній фабриці інституту Механобрчормет.

В результаті порівняльних випробувань встановлено, що за ідентичних умов роботи млин з новою конструкцією розвантажувальних елеваторів в порівнянні з існуючою конструкцією може розвивати в середньому на 30-40% більшу продуктивність по класах -0.040 мм і -0.074 мм при роботі у відкритому циклі. Для замкнутого циклу подрібнення приріст продуктивності складе 15-20%.

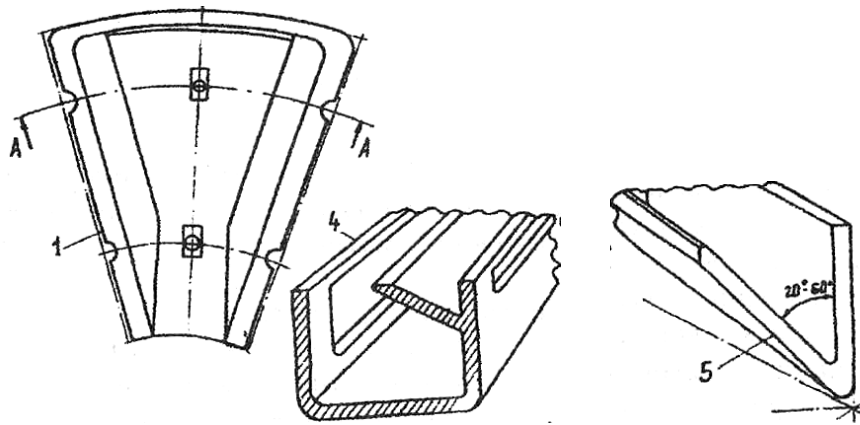


Рис. 3.38. Оптимальна конструкція розвантажувальних елеваторів барабанного млина: 1 – загальний вигляд; 2,3 – поперечний перетин старої і нової конструкції відповідно; 4, 5 – конструктивне виконання млинів МШР з використанням а.с. 589018 і 1431137 відповідно.

Із застосуванням методик багатофакторного планування експериментів досліджувалися залежності продуктивності млина від технологічних і конструктивних параметрів: ступеня заповнення барабана  $\varphi\%$ , вмісту твердого в пульпі  $P\%$ , гранулометричного складу продуктів подрібнення  $g\%$  і кута нахилу розвантажувального конуса  $a^\circ$ .

Для проведення досліджень були спеціально спроектовані і виготовлені напівпромислова і лабораторна подрібнюючі установки. При моделюванні застосовано метод крутого сходження. Поліном-модель має такий загальний вигляд:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4 \quad (3.217)$$

де  $y = Q$  – продуктивність – параметр оптимізації.

Обробка експериментальних даних проводилася за спеціальною програмою на ЕОМ.

Встановлені закономірності руху подрібненого матеріалу, отримані рівняння регресії, що відображають залежність продуктивності проточної частини від технологічних і конструктивних параметрів млинів:

$$Q = -52.97 + 0.98g + 0.534\psi + 0.32p + 0.1\alpha \quad (3.218)$$

$$Q = -54.3 + g + 0.62\psi + 0.29p \quad (3.219)$$

Область факторного простору:

$$30\% \leq g \leq 60\%, 20\% \leq \psi \leq 50\%, 40\% \leq p \leq 70\% .$$

Вільні члени і величини коефіцієнтів при змінних факторах в рівняннях, отриманих двома методами, дещо відрізняються один від одного. Експериментальна перевірка отриманих рівнянь показала, що значення питомої продуктивності задовільно співпадають з її величинами, отриманими розрахунковим шляхом з використанням одержаних рівнянь, і вони можуть бути рекомендовані для практичного застосування.

Зокрема, при розробці конструкції розвантажувальної частини млина необхідно враховувати що кут нахилу розвантажувального конуса істотно не впливає на продуктивність млина і його можна приймати мінімальним. З урахуванням цього запропонована нова конструкція розвантажувального конуса циліндро-конічної форми і розвантажувальних елеваторів коробчатої форми і з похилими стінками з мінімальним кутом конусності (10-15°).

З використанням запропонованого технічного рішення розроблені робочі креслення розвантажувальної частини для всіх млинів самоподрібнення і кульових МШР 4500x5000 і МШР 4000x7500, експлуатованих на ГЗК країни.

Розроблена конструкція розвантажувальних елеваторів прийнята до впровадження також на млині ММС-105X54, що входить в комплекс збагачувального устаткування продуктивністю 5 млн. т/год.

Проведені також експериментальні дослідження зносу футерувань і ґрат млинів самоподрібнення ММС-70-23 і ММС-90-30 в промислових умовах. Встановлені характер і закономірності зносу футерувань і ґрат, виявлені причини, що знижують ефективність їх роботи. Встановлено, що максимальний знос мають футерування циліндричної частини барабана біля ґрат, а ґрати мають максимальний знос в периферичній частині (біля обичайки барабана).

Розроблені теоретичні передумови, а також результати експериментальних досліджень послужили науково-технічною основою для вдосконалення конструкції і підвищення ефективності роботи проточної частини барабаних млинів. З їх використанням розроблені наступні науково-обґрунтовані рекомендації по конструкції основних вузлів проточної частини млина:

1. розвантажувальні ґрати (решітки) виконувати перфорованими квадратними отворами тільки в периферійному поясі, при цьому розмір отворів рекомендується в межах 65x65-90x90 мм, а висота перфорованого поясу 0,05-0,1 діаметру (згідно а.с. 1.115800, за умови використання в схемах інтенсифікованого самоподрібнення з виведенням класів критичної величини);

2. можливий варіант виконання розвантажувальних ґрат комбінованого типу з чергуванням секторів з квадратними і щелевидними отворами у співвідношенні 1:3 (згідно а.с. 1.202.618);

3. розвантажувальні ґрати млина повинні мати конструкцію, що забезпечує самоочищення і що виключає забивання її отворів шматками матеріалу критичної величини (згідно а.с. 1210289, 133410, 1334685, 1443959); для млинів, призначених для подрібнення і диспергації глинистих руд (наприклад, марганцевих), розвантажувальні ґрати рекомендується виконувати у вигляді сектора, обмеженого хордами з кутом між ними 120-240° (відповідно до а.с. 1505579);

4. футерування і ліфтери циліндрової частини барабана виконувати змінного розміру, що криволінійно зменшується від центральної частини до торцевих стінок висоти по еліпсоїдному закону; відповідно до характеру зносу кожен елемент може мати жолобчасту Ш-подібну форму з певним співвідношенням розмірів ребер (ліфтерів), що забезпечує зносостійкість і необхідний термін служби при мінімальній металоємності і оптимальних технологічних параметрах роботи млинів (у відповідності а.с. 762974, 1278022, 136968, 1417924, 1480196);

5. кріплення ліфтерів здійснювати глибоким посадочним місцем і приляганням по всій довжині, а безліфтерне футерування відливати спільно з ліфтерами різної висоти;

6. розвантажувальні елеватори виконувати з бічними стінками, що мають нахил до розвантажувальних ґрат у бік, протилежний обертанню млина (згідно а.с. 589018., 1431137);

7. бічні стінки елеватора рекомендується розташовувати по дотичній до кола розвантажувальної втулки, при цьому їх периферійну частину виконувати криволінійною (по а.с. 1335320):

8. розвантажувальний конус виконувати циліндро-конічної форми з незначним кутом конусності і відкритою більшою і меншою основою (для можливості радіоізотопного контролю ступеня заповнення барабана) (згідно а.с. 652965, 997803);

9. розвантажувальну втулку виконувати із спеціальним пристроєм для запобігання викиду пульпи при запуску млина (а.с. 688750);

10. для млинів одностадіального подрібнення (ММС 70-60 і ін.) обладнати розвантажувальну частину поворотною бутарою спеціальної конструкції (у відповідності а.с. 670333, 961762).

Зокрема, на Північному ГЗК на млинах ММС 90-30А упроваджена нова конструкція футерувань жолобчастої форми з криволінійною формою робочої поверхні, що дозволяє істотно підвищити зносостійкість та інтенсифікувати рух млинового завантаження (у відповідності з а.с. 762974 і 1369068). Футерування виготовляється серійно.



Промисловими випробуваннями встановлено, що термін служби нового футерування склав 6000 маш. год. (на 60% триваліше, ніж старого футерування), питома витрата 41,25 г/т, питомий знос 18,56 г/т, що на 40% нижче, ніж в старій конструкції.

На Інгулецькому ГЗК упроваджена нова конструкція футерувань жолобчастої форми млинів ММС 70-23 з різновисокими ліфтерами, що інтенсифікують рух внутрішньомлинового завантаження при мінімальній металоемності (а.с. 1480196). Футерування виготовляється серійно. Впровадження такої конструкції футерування на млинах ІнГЗК дозволило підвищити термін служби, збільшити міжремонтний період, скоротити витрату футерувальної сталі.

Для найбільшого в нашій країні Північного ГЗК розроблені нові конструкції розвантажувальних ґрат, реалізовані на млинах ММС 90-30А і МРГ 55-75, експлуатованих на РЗФ-2. Решітка млина ММС 90-30А виконана комбінованою, складається з секторів з вузькими щілинами шириною 12 мм і секторів з квадратними отворами розміром 65х65 мм (співвідношення 14:14), при цьому отвори розташовані в периферичному поясі ґрат заввишки 650-850 мм (у відповідності а.с. 1115800 і 1202613). Ширина щілин ґрат МРГ 55х75 – 12 мм. Впровадження даної розробки на ПівнГЗКа дозволило інтенсифікувати вивід з млина кондиційного по крупності матеріалу, підвищити ефективність роботи подрібнювального відділення збагачувальної фабрики.

Розвантажувальні ґрати такої ж конструкції упроваджені так само на млинах ММС 70-23, експлуатованих на ЗФ-2 і ЗФ-3 Інгулецького ГЗК. В результаті підвищилася ефективність роботи млинів.

Враховуючи перспективність і високу ефективність розробленої конструкції розвантажувальних ґрат комбінованого типу, в промислових умовах Інгулецького ГЗК були проведені широкомасштабні дослідження такої конструкції ґрат з метою оптимізації виводу з млина гальки і скрапу і мінімізації його роботи по критерію втрати заліза в хвостах.

На основі результатів цих досліджень для умов Інгулецького ГЗК запропонована конструкція ґрат комбінованого типу із співвідношенням площ живого перетину секторів з щілиноподібними і квадратними (або круглими) отворами 3:1 (а.с. 1202618).

Це технічне рішення успішно опробовано в промислових умовах і реалізовано на 20-ти млинах ММС 70-23 на ІнГЗК (а.с. 12020618). Впровадження цієї розробки дозволило підвищити ефективність роботи млинів, підвищити масову частку заліза в концентраті на 0,5%.

Ряд описаних розробок інституту «Механобрчормет» запуснені у серійне виробництво.

### **3.7. Конструкція і напружений стан барабанів млинів**

#### **3.7.1. Вплив ребер жорсткості на величину і характер розподілу напружень в барабані млина**

Відповідно до розробленої методики, що передбачає імітацію навантажень на моделі барабанів в полі відцентрових сил, були проведені дослідження впливу ребер жорсткості на характер розподілу напруги в барабані млина самоподрібнення.

В результаті проведених досліджень знайдені експериментальні значення у всіх точках вимірів моделей барабана без ребер жорсткості і з ребрами.

За середніми значеннями експериментальних даних побудовані епюри розподілу напруження в торцевих стінках і обичайці барабана, а також в ребрах жорсткості стінок і обичайки.

Встановлено, що максимальна напруга виникає в торцевих стінках без ребер жорсткості на стінках і обичайці. По висоті стінки напруги розподіляються нерівномірно і мають тенденцію до різкого збільшення у напрямку до цапфи.

За наявності ребер жорсткості на торцевій стінці напруги в ній знижуються майже на 20%, по висоті стінки характер розподілу напружень залишається таким же, як і в стінці без ребер жорсткості.

При установці ребер жорсткості на торцевій стінці і на обичайці барабана, напруження в торцевій стінці знижуються на 35-50%, але в перетині біля сполучного фланця цапфи залишаються в два-три рази більшими, ніж напруження біля обичайки.

При установці ребер жорсткості тільки на торцевій стінці характер розподілу напружень у ребрах такий же як і в стінці і вони не викликають помітного перерозподілу напружень як в самій стінці, так і в ребрах, а тільки дещо знижують їх величину.

У ребрах жорсткості характер розподілу напружень такий же, як і в обичайці без ребер жорсткості, а величина напруження в 1,5 рази вище, ніж в обичайці.

При збільшенні швидкості обертання центрифуги, а отже, при збільшенні навантажень на моделі барабана млина, величини напружень у всіх елементах барабана зростають, а характер зміни напружень не змінюється.

На підставі результатів дослідження впливу ребер жорсткості на напружений стан барабана млина зроблено наступні висновки:

1. При дії на барабан млина динамічних навантажень в торцевих стінках постійної товщини без ребер жорсткості виникають значні

напруження знакозмінного характеру які мають тенденцію збільшуватися до цапфи.

2. Посилення тільки торцевої стінки радіальними ребрами жорсткості призводить до зниження напружень в стінках на 20%, але не усуває їх нерівномірного розподілу по висоті стінки в радіальному перетині. Напруження в ребрах також нерівномірно розподіляються по довжині ребра і збільшуються у напрямку до цапфи.

3. Посилення барабана млина сумірними ребрами жорсткості на торцевій стінці і на обичайці призводить до зниження напружень в торцевій стінці на 35-50% і зменшує концентрацію напружень біля цапфи. У ребрах відбувається перерозподіл напружень з тенденцією до зменшення в небезпечному перетині.

4. Ребра обичайки істотного не впливають на характер розподілу напружень в самій обичайці.

5. При збільшенні навантаження на барабан напруження у всіх його елементах збільшуються.

### **3.7.2. Визначення залишкових напружень**

На дослідному зразку млина МБ-90-30 експериментально визначені значення залишкових напружень в місцях концентрації напруження і в зварних швах ребер жорсткості барабана млина.

З аналізу експериментальних даних витікає, що при прийнятій конструкції і технології виготовлення барабана дослідно-промислового зразка млина самоподнібнення МБ-90-30, що передбачає установку ребер жорсткості і проведення великого обсягу зварних робіт на вже змонтованому барабані, в ньому виникають значні залишкові напруження, величини яких в більшості випадків перевищують значення 1000 даН/см<sup>2</sup>. Це напруження при одночасній дії на барабан динамічних навантажень може стати причиною тріщиноутворень і руйнування барабана млина.

Істотним конструктивним недоліком барабана дослідного зразка млина є наявність на торцевій стінці різкого переходу від товщини 205 мм до товщини 56 мм і приварка ребра жорсткості в цьому місці. Як показали результати експериментальних досліджень, даний перехід є небезпечним концентратором напружень, яке досягає у вказаних точках значень порядку 2000 даН/см<sup>2</sup>.

У зварних швах ребер жорсткості залишкові напруження також великі і досягають значень до 2500 даН/см<sup>2</sup>, що, очевидно, є наслідком відсутності технічних рішень щодо зняття залишкового напруження при проведенні зварних робіт на барабані млина.

### 3.7.3. Дослідження напруження від динамічних навантажень в промислових умовах

Експериментально визначені величини, характер зміни і характер розподілу напруження від динамічних навантажень у всіх елементах конструкції дослідно-промислового зразка млина МБ-90-30 в промислових умовах Інгулецького ГЗКа (рис. 3.39.).

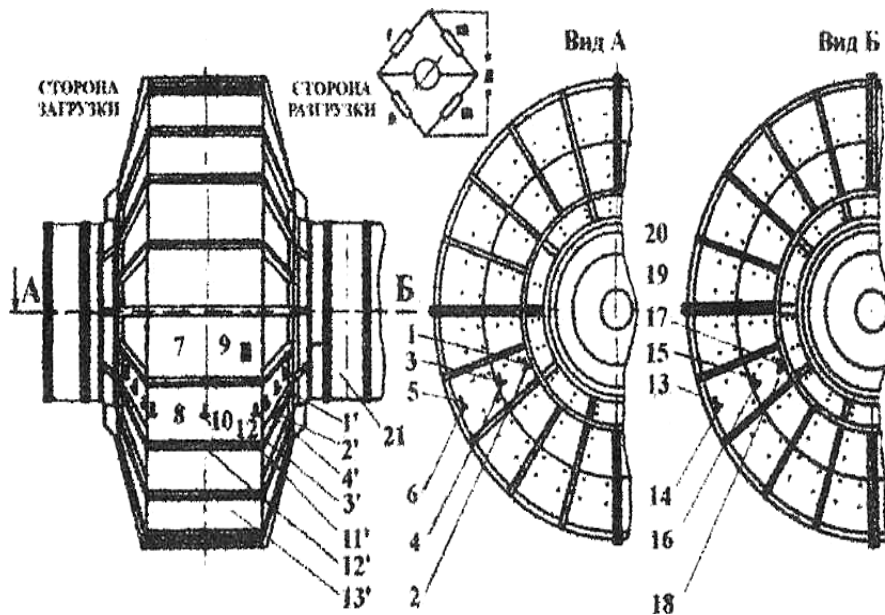


Рис. 3.39. Схема розташування тензорезисторів на торцевих стінках, обичайці і ребрах жорсткості барабана млина самоподрібнення при проведенні тензометричних досліджень напруженого стану барабана:

1, 2, 3, 4... – тензорезистори, змонтовані на торцевих стінках і обичайці барабана; 1', 2', 4'... тензорезистори, змонтовані на ребрах жорсткості барабана; (вгорі показана схема з'єднання тензорезисторів за мостовою схемою).

Записані осцилограми зміни максимального напруження у всіх точках вимірів при ступені заповнення барабана рудою  $\varphi=0,50$  і швидкості його обертання  $n=12,0$  хв<sup>-1</sup>.

Шляхом розшифровки осцилограм визначені величини напруження і характер їх зміни при обертанні барабана.

В процесі обробки результатів досліджень методами математичної статистики отримані середні значення величин напруження у всіх точках вимірів при різних режимах роботи млина.

По середніх значеннях максимальних величин напруження в точках вимірів побудовані епюри напружень в торцевих стінках, обичайці і ребрах жорсткості барабана млина (рис. 3.40.).

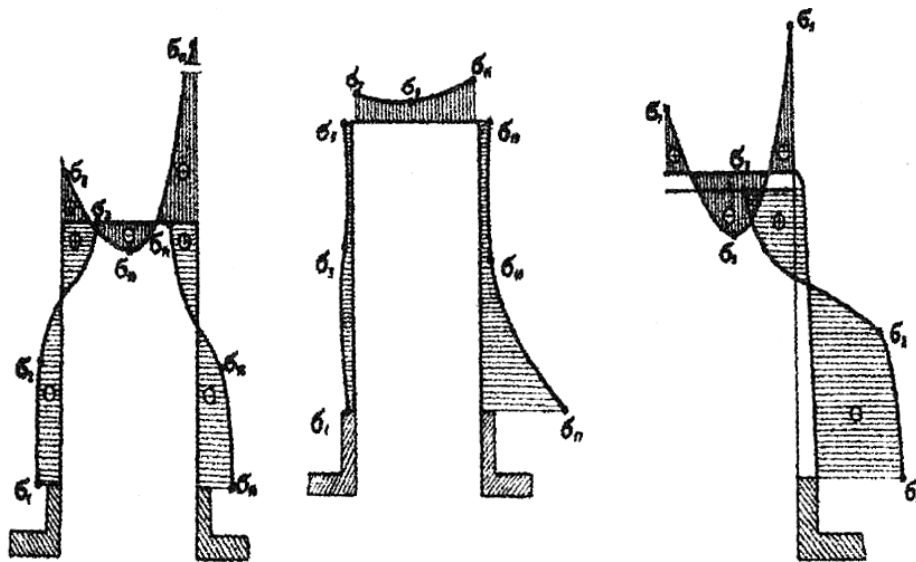


Рис. 3.40. Епюри розподілу напружень в елементах конструкції барабана млина самоподрібнення:

*a* – епюри радіальних напружень в торцевих стінках і обичайці; *б* – епюри тангенціальних напружень в стінках і обичайці; *в* – епюри радіальних напружень в ребрах жорсткості торцевої стінки і обичайці барабана.

Як видно з приведених вище епюр, максимальні напруження в торцевих стінках і в радіальному перетині рівні 200-220 даН/см<sup>2</sup>, в тангенціальному напрямі – 500 даН/см<sup>2</sup>.

У обичайці барабана напруження в осьовому напрямі в центральній частині обичайки (точка виміру "10") рівні 120 даН/см<sup>2</sup>, на периферичній частині обичайки з боку навантаження (точка "8") напруження зростають до 200 даН/см<sup>2</sup>, а з боку розвантаження (точка "12") – до 950 даН/см<sup>2</sup>, що очевидно пояснюється дією приводу. Тангенціальні напруження в тих же точках відповідно рівні 9,11 і 18 даН/см<sup>2</sup>.

У ребрах жорсткості торцевої стінки барабана (рис. 3.40. в) максимальні напруження зареєстровані в нижній частині ребра біля цапфи (точка виміру "1") – 500 даН/см<sup>2</sup>, мінімальні – поблизу обичайки – 310 даН/см<sup>2</sup>.

У ребрах жорсткості обичайки максимальне напруження зареєстровано в місці зварки ребра обичайки і ребер торцевих стінок (280 і 650 даН/см<sup>2</sup>), а в центральній частині ребра напруження значно менші і рівні 240 даН/см<sup>2</sup>.

В результаті вимірювання напружень в ребрах жорсткості в небезпечному перетині (у місці руйнування ребер) встановлено, що середні значення величин напружень вигину у вертикальній площині рівні 150 даН/см<sup>2</sup>, а в горизонтальній площині (у площині ребра) – 135

даН/см<sup>2</sup>. Напруження від розтягуючих зусиль досягає в ребрі значень 380-400 даН/см<sup>2</sup>. Характер зміни цих напружень за один цикл такий же, як і сумарного напруження у всіх заміряних точках на корпусі і ребрах жорсткості барабана млина. (рис. 3.41.).

Таким чином, в результаті проведених випробувань встановлено:

при виробництві зварних робіт на вже змонтованому барабані млина в ньому виникають значні залишкові напруження, які можуть стати однією з причин тріщиноутворень і руйнування барабана;

у місці приварювання торцевої стінки товщиною 56 мм до кільцевого фланця завтовшки 205 мм залишкове напруження досягає значних величин (близько 1800 даН/см<sup>2</sup>) і даний перехід є небезпечним концентратором напружень;

у зварних швах по довжині ребра залишкові напруження також досягають небезпечних значень (більше 2000 даН/см<sup>2</sup>) і можуть бути причиною руйнування барабана.

В той же час у елементах барабана виникає значна напруга від динамічних навантажень, залежні від ступеня заповнення барабана, що мають знакозмінний характер з майже симетричним циклом, при цьому напруги в ребрах жорсткості вищі, ніж в стінках барабана.

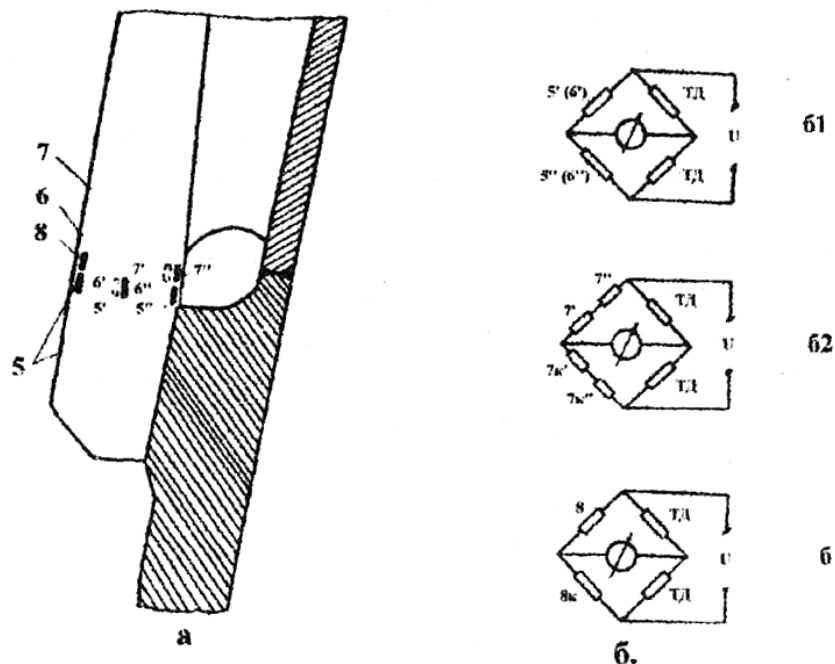


Рис. 3.41. Схема розташування тензорезисторів на ребрі жорсткості барабана в небезпечному перетині (а) і принципові схеми з'єднання тензорезисторів в мости для детального дослідження стану ребер жорсткості барабана млина самоподрібнення (б).

У ребрі жорсткості плоскої форми виникає значне напруження вигину як у вертикальній ( $150 \text{ даН/см}^2$ ), так і в горизонтальній площині (у площині ребра  $-135 \text{ даН /см}^2$ ), яке може стати причиною значних деформацій і руйнувань ребер жорсткості плоскої форми.

У місці приварювання торцевої стінки до кільцевого фланця (перехід від товщини 56 мм до товщини 205 мм) напруження в ребрах і в торцевій стінці в радіальному і тангенціальному напрямках досягають максимальних значень, отже, даний перетин є небезпечним концентратором напружень, що вимагає вдосконалення конструкції цього вузла і контрольованого затягування вузлів кріплення цапф до торцевих стінок барабана.

Як видно з епюр на рис. 3.40. у торцевих стінках барабана напруження розподіляються нерівномірно і мають тенденцію збільшуватися у напрямку до цапфи, по довжині обичайки напруження теж розподіляються нерівномірно і збільшуються у напрямку до периферійної частини обичайки, особливо у бік приводної стінки барабана млина.

З використанням результатів проведених досліджень встановлені закономірності розподілу напружень по висоті торцевих стінок барабана млина і показано, що характер зміни напружень описується рівнянням степеневої функції гіперболічного типу:

$$y = F(\varphi, \nu, \gamma_1, \gamma_2) \cdot D^3 \cdot \frac{1}{x^2}, \quad (3.220)$$

де:  $\varphi$  – ступінь заповнення барабана;  $\nu$  – об'єм внутрішньомлинового завантаження,  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  – питома вага помельних тіл і руди відповідно,  $D$  – діаметр барабана млина.

На основі встановлених закономірностей запропонована формула, що описує раціональну зміну товщини торцевої кришки барабана млина, що забезпечує допустимий і рівномірний розподіл напруги за її висотою:

$$\delta = KD^3 \cdot \frac{1}{x^2}, \quad (3.221)$$

де:  $\delta$  – товщина торцевої стінки, мм;  $D$  – діаметр барабана млина, м;  $x$  – змінна складова, що характеризує розташування перетину, для котрого розраховується товщина стінки, і рівна відстані від осі млина до перетину, що розраховується, мм;  $K$  – коефіцієнт, залежний від питомої ваги внутрішньомлинового завантаження, змінюється в межах 2,5-3,5.

Граничні значення коефіцієнта  $K$ , рівні 2,5-3,5 визначені експериментально і визначаються відповідно до питомої ваги внутрішньо-млинового завантаження.

Розрахунок торцевих стінок барабана млина по запропонованій формулі дозволяє створити конструкцію барабана, що забезпечує достатню динамічну міцність і надійність млина при зниженні її металоємності. Так, наприклад, маса барабанів млинів діаметром 9 м і 10,5 м на 20-25%, тобто на 50-80 т менше старої конструкції, що підтверджує високу ефективність розробленого технічного рішення.

На рис. 3.42. наведена конструкція барабана млина самоподрібнення, виконана з урахуванням встановлених закономірностей розподілу напружень і відповідно до розробленого науково-технічного рішення за авторським свідоцтвом №1608929.

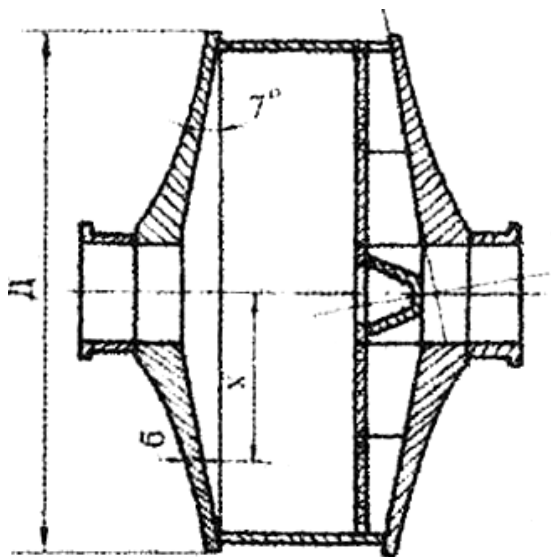


Рис. 3.42. Нова конструкція барабанів з рівномісними торцевими стінками, зовнішня поверхня яких виконана увігнутою, при цьому товщина стінки змінюється за степеневою функцією гіперболічного типу, що описується рівнянням  $\delta = \kappa D^3 / x^2$  (а.с. 1608929)

На основі запропонованого технічного рішення в інституті Механобрчормет розроблені конструкції барабанів млинів всіх типорозмірів, використовуваних в гірничорудній промисловості України .

#### **3.7.4. Промислове освоєння нових науково-технічних розробок конструкції барабанних млинів**

На підставі рекомендацій по вдосконаленню конструкції барабанів млинів самоподрібнення був модернізований барабан млина МБ-90-30



шляхом посилення його ребрами жорсткості таврового перетину (згідно а.с. 617073) і виготовлені барабани млинів ММС-70-23 і ММС-90-30А нової конструкції (з торцевими стінками неремінної товщини).

Для оцінки ефективності заходів щодо підвищення надійності барабанів були проведені комплексні випробування і дегальні дослідження напруженого стану барабанів нової конструкції на збагачувальних фабриках Інгулецького і Лебединського ГЗК. В процесі промислових випробувань встановлено:

- величина напружень в барабанах млинів нової конструкції істотно зменшена і не перевищує допустимих меж (25,0-30,0) МПа,
- розподіл напружень по висоті торцевих стінок барабанів більш рівномірний і не має тенденції різко збільшуватися у напрямку до цапфи: напруження в площині ребра жорсткості і перетині зменшилися в 3-5 разів, подовжня стійкість ребер жорсткості істотно підвищилася.

Модернізована конструкція барабана дозволила істотно підвищити надійність млина і скоротити на 22% простої секції через відмову млинів, що суттєво підвищило ефективність її роботи.

Отже, створені і реалізовані в промислових умовах 2 типи барабанів млинів самоподрібнення: реброва конструкція і барабан з торцевими стінками, геометрія яких змінюється за лінійним або гіперболічним законом.

Ці конструкції барабанів прийняті до впровадження при розробці млинів нового покоління, зокрема млина самоподрібнення ММС-105-50, що входить у комплекс великих рудопомольних млинів значної одиничної потужності продуктивністю 5 млн. т. на рік.

Слід зазначити, що розроблена з використанням встановлених закономірностей конструкція барабана млина при підвищеній надійності є рівномірною і менш металоемною в порівнянні з традиційною конструкцією (так, наприклад, маса барабанів млинів діаметром 9,0 м і 10,5 м на 20-25%, тобто на 50-80 т менше старої конструкції).

Загальний вид барабанного млина з новими конструкціями основних вузлів, розроблених за результатами виконаних досліджень і широко впроваджених у виробництво, показаний на рис. 3.43.

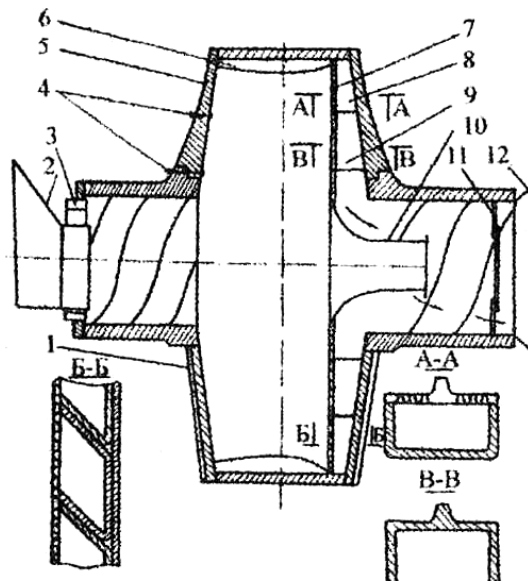


Рис. 3.43. Реалізація результатів досліджень в нових конструкціях основних вузлів барабанного млина великої одиничної потужності:

1 – барабан (а.с. 617073); 2 – завантажувальний жолоб; 3 – завантажувальна втулка; 4 – футерування торцевої стінки і спосіб її кріплення (а.с. 1417924, 4687952); 5 – торцева стінка барабана (а.с. 1608925); 6 – футерування обичайки барабана (а.с. 762979, 1278022, 1369068, 1480196); 7 – розвантажувальні ґрати (а.с. 1202618, 1210239, 1333410, 1334680, 1443959, 1505579); 8 – розвантажувальний елеватор (а.с. 589018, 1335320, 1431137); 9 – розвантажувальний пристрій (а.с. 1115800); 10 – розвантажувальний конус (а.с. 652926, 997083); 11 – розвантажувальна втулка (а.с. 686760); 12 – бутара (а.с. 670333, 961762, 1572696).

Розроблені нові технічні рішення конструкції основних вузлів млинів широко використовуються при модернізації існуючих і нових конструкцій барабанних млинів великої потужності.

Зокрема, ці розробки використовуються гірничозбагачувальними комбінатами при модернізації млинів кульових і самоподрібнення.

### Висновки і рекомендації:

1. У барабані млина зварної конструкції виникають значні залишкові напруження, які досягають небезпечних значень в зварних швах ребер жорсткості і в місці приварювання торцевої стінки товщиною 56 мм до кільцевого фланця завтовшки 205 мм, тому такі перетини є небезпечними концентраторами напружень.

2. При дії на барабан млина динамічних навантажень в торцевих стінках постійної товщини і в обичайці барабана виникають значні

напруження знакозмінного характеру з майже симетричним циклом, які мають тенденцію різко збільшуватися в торцевих стінках – у напрямку до цапфи, в обичайці – до периферії (особливо у бік приводної стінки), при цьому характер розподілу напружень описується рівнянням статичної функції гіперболічного типу:

$$y = \kappa \cdot D^3 \cdot \frac{1}{X^2}$$

3.Посилення торцевих стінок барабана радіальними ребрами жорсткості плоскої форми призводить до деякого зниження величини напруження в них, але не усуває їх нерівномірного розподілу в радіальному перетині.

4.Посилення барабана млина сумірними ребрами жорсткості на торцевій стінці і обичайці барабана призводить до істотного зниження напруження в стінці, зменшує концентрацію напруження в небезпечному перетині (біля сполучного фланця), в ребрах жорсткості торцевої стінки в цьому випадку відбувається перерозподіл напружень по висоті ребра з тенденцією до зменшення в небезпечному перетині.

5.У ребрі жорсткості плоскої форми виникає значне напруження вигину як у вертикальній, так і в горизонтальній площині (у площині ребра), яке може стати причиною значних деформацій ребер жорсткості плоскої форми.

6.Для зменшення напруження в небезпечному перетині торцевої стінки біля цапфи і забезпечення сприятливішого розподілу напружень по її висоті рекомендується торцеві стінки барабана млина виконувати змінної товщини, що плавно збільшується по лінійному або гіперболічному закону у напрямку до цапфи: при виконанні торцевих стінок барабана постійної товщини рекомендується здійснити плавний перехід від стінки завтовшки 56-70 мм до кільцевого фланця завтовшки 140-200 мм, при цьому з'єднання частин стінки постійної і змінної товщини необхідно здійснювати на максимально можливому діаметрі (у зоні мінімального напруження).

7.Обичайку барабана рекомендується також виконувати змінної товщини із збільшенням її від осі обичайки до периферії (у напрямі торцевих стінок барабана).

8.При посиленні торцевих стінок барабана млина ребрами жорсткості рекомендується їх також виконати змінної висоти, що збільшується до цапфи, при цьому доцільно відливати їх разом із стінкою і встановлювати відповідні ребра на обичайці. При цьому ребра рекомендується виконувати з додатковими полицями на вільній стороні ребра (таврового перетину) для забезпечення необхідної граничної жорсткості при одночасній дії крутних моментів та моментів вигину (згідно а.с. № 617079). Найбільш раціональною є конструкція барабана, коли ребра

жорсткості торцевих стінок таврового перетину жорстко сполучені з відповідними ребрами на обичайці і з цапфою барабана, утворюючи, таким чином жорстку рамку, що несе основне навантаження.

9. При проведенні зварних робіт на барабані млина рекомендується в обов'язковому порядку застосовувати комплекс заходів щодо зняття залишкових напружень; при виготовленні барабанів рекомендується застосовувати низьколеговані марки сталі з високими механічними характеристиками типу ЮХСНД, 09ГС, 18ГС.

10. При виготовленні і збірці барабана млина необхідно ретельно контролювати стан цапф барабана і дотримувати необхідну величину затягування болтового з'єднання цапф з торцевими стінками барабана при періодичній контрольній підтяжці болтів (особливо в перші 2-3 роки експлуатації млина).

## 4 МОНТАЖ І ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ МЛИНІВ

### 4.1 Млин самоподрібнення ММС-70-23

Млин ММС-70-23 призначений для мокрого самоподрібнення руд чорних і кольорових металів (табл. 4.1).

Робота млина здійснюється при безперервній подачі в барабан руди і води. Матеріал, що потрапив у барабан, захоплюється ліфтерами і піднімається на певну висоту. Падаючи зверху, шматки матеріалу ударяються один об одного і об броню. При цьому відбувається постійне перемішування матеріалу, під час якого він подрібнюється шляхом розколювання, роздавлювання і стирання. Подрібнений матеріал, крупність якого стає менше розміру щілини розвантажувальних ґраток, разом з водою проходить через щілини в порожнині підґратчастих футерувань і вивантажується з барабана млина.

Млин складається з наступних основних частин (рис. 4.1): барабан, підшипник опорний, підшипник опорно-упорний, завантажувальний пристрій, редуктор, установка приводної шестерні, кожух вінця, муфта пружна, кожух муфти, муфта зубчата, огорожа муфти, розводка трубопроводів на млині, станція рідкого мастила підшипників барабана, станція рідкого мастила редуктора головного привода, установка станцій густого мастила, установка гідропідпору підшипників барабана.

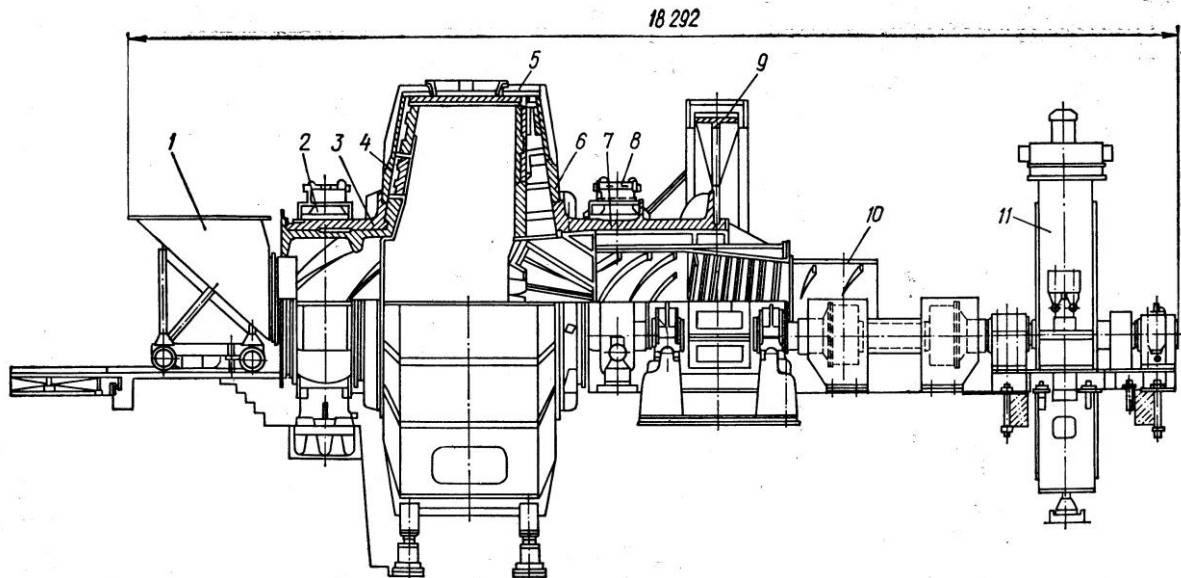


Рис. 4.1. Млин самоподрібнення ММС-70-23:

- 1 – завантажувальний пристрій; 2 – підшипник завантаження; 3 – цапфа завантажувальна; 4 – кришка барабана завантажувальна; 5 – обичайки барабана; 6 – кришка барабана розвантажувальна; 7 – цапфа розвантажувальна; 8 – підшипник розвантаження; 9 – вінець зубчатий; 10 – бутара; 11 – електродвигун.

Залежно від замовлення з млином поставляються наступні пристосування і комплекти: пристосування для підйому барабана, привод допоміжний, бутара, спеціальні пристрої для механізації ремонту млина, гайковерт (на три млини), комплект монтажних частин, комплект електрообладнання головного приводу.

Таблиця 4.1

Технічна характеристика млина ММС-70-23

|   |             |
|---|-------------|
| Внутрішній діаметр барабана, мм                                       | 7000        |
| Внутрішня довжина циліндричної частини барабана (без футерування), мм | 2300        |
| Продуктивність млина, т/год (залежно від властивостей матеріалу)      | 80-500      |
| Частота обертання барабана, $\text{хв}^{-1}$                          | 13          |
| Максимальна крупність грудок матеріалу, що завантажується в млин, мм  | 400         |
| Частота обертання барабана від допоміжного приводу, $\text{хв}^{-1}$  | 0,05        |
| Електродвигун:  |             |
| тип   | СДМ-15-49-6 |
| потужність, кВт   | 1600        |
| напруга, В  | 6000        |
| частота обертання, $\text{хв}^{-1}$                                   | 95          |
| маса, кг  | 10250       |
| Редуктор:   |             |
| тип   | ЦГШ-1250    |
| частота обертання вхідного валу, $\text{хв}^{-1}$                     | 1000        |
| передаткове число   | 13,0        |
| Відкрита зубчата передача:  |             |
| число зубів шестерні, шт.   | 43          |
| число зубів колеса, шт.   | 254         |
| модуль нормальний, шт.  | 20          |
| крутний момент на валу шестерні, н.м                                  | 191000      |
| матеріал шестерні   | сталь 35ХМ  |
| матеріал колеса   | сталь 45Л   |

#### 4.1.1. Конструкція і робота складових частин млинів

**Барабан.** Барабан є головною і найбільш важкою складовою частиною млина. Він складається з корпусу барабана, порожнистих цапф, завантажувальної і розвантажувальної втулок, футерувань, ліфтерів і ґрат.

Корпус барабана має зварно-литу конструкцію, розділену діаметральною площиною на дві частини. Ці частини з'єднуються між собою за допомогою болтів, після чого зварюються на монтажі. Після зварки корпус барабана є нероз'ємною конструкцією. Для монтажу і демонтажу футерувань і ліфтерів в корпусі барабана є три люки.

Цапфами завантажувальна і розвантажувальна є монолітні деталі, виготовлені із сталевих відливок. Вони приєднуються до корпусу барабана фланцевим болтовим з'єднанням. Болти мають спеціальну конструкцію і виготовляються з легованої сталі. Фланцеве з'єднання ущільнюється гумовим шнуром.

Втулка розвантажувальної цапфи має спіралі, які сприяють розвантаженню пульпи. Вхідний кінець розвантажувальної втулки висунутий всередину барабана і є зварною приймальною частиною з ребрами, які направляють потік пульпи в розвантажувальну втулку.

Внутрішні поверхні барабана мають змінне облицювання, що складається з футерувань, ліфтерів і грат. Кріплення футеровок і ліфтерів здійснюється болтами з потайними головками. Для ущільнення отворів під болти є кільця з технічної гуми, а також спеціальні шайби. Для оберігання внутрішньої поверхні корпусу барабана від абразивного зносу і зменшення шуму під футерування укладається листовою гума.

До розвантажувальної частини барабана також належать грати, клини і підгратчасті футерування. Радіальні стики грат мають похилі скоси для сполучення з клинами, що забезпечують кріплення грат. Щілини в гратах виконані клиноподібної форми.

За гратами є футерування, які, окрім захисної ролі, забезпечують вивантаження з млина подрібненого матеріалу безперервним потоком. Ці футерування мають ребра, які перешкоджають поверненню пульпи в барабан.

Розвантаження матеріалу відбувається через двоступінчасту бутару, перший ступінь якої розміщується усередині розвантажувальної втулки і має отвір, друга – виступає назовні і отворів не має.

#### **4.1.2. Підшипники барабана**

Опорами барабана служать два підшипники барабана.

Підшипник, розташований з боку зубчатого вінця, сприймає не тільки радіальні зусилля, але і осьові, завдяки наявності кругових буртів на розвантажувальній цапфі. Інший підшипник сприймає тільки радіальні зусилля. Обидва підшипники вмонтовуються на опорних і фундаментних плитах.

Нижня опорна частина підшипників має сферичну поверхню, що дозволяє компенсувати неточності монтажу і рівномірно розподілити

навантаження на робочу поверхню підшипників. Сферична поверхня корпусів підшипників змащується жиром солідолом УС-1 або УС-2 ГОСТ 1033-79 за допомогою ручного шприца, для чого в опорних плитах передбачені отвори для підведення мастила.

Внутрішні порожнини підшипників, на які спираються цапфи, мають бабітову заливку (бабіт марки Б-16 ГОСТ 1320-74). У бабітовій заливці підшипників є порожнини і отвори для системи гідропідпору.

Система гідропідпору служить для зниження втрат потужності на тертя в підшипниках у момент пуску млина, а також для оберігання бабітової заливки від задирів при пуску і зупинці млина. Конструкція і робота гідропідпору викладені в технічному описі та інструкції з експлуатації системи мастила. Мастило підшипників млина рідке, циркуляційне. Контроль подачі мастила ведеться за допомогою спеціальних приладів. Опис системи мащення наведений в інструкції з експлуатації. Відведення відпрацьованого масла проводиться по спеціальних каналах.

Для контролю температури в корпусі кожного підшипника передбачені по два отвори під термометри опору типу ТСП-783 діаметром 320 мм.

Ущільнення підшипників виконані повстяними.

Для скидання масла цапфи мають масловикидні гребінці.

### **4.1.3. Завантажувальний пристрій**

Подача руди в млин здійснюється через завантажувальний пристрій, який є патрубком зварної конструкції.

Для забезпечення вільного доступу всередину млина завантажувальний пристрій виконаний пересувним на рейках, з механічним і ручним приводами.

Для оберігання від зносу патрубка завантажувального пристрою внутрішні поверхні футеровані броньовими листами.

Сполучення завантажувального пристрою з втулкою здійснене із зазором 10 мм.

Для ліквідації можливих протікань пульпи через зазор є гумове ущільнення.

У внутрішній порожнині патрубка є відсік для класифікуючих пісків. Вихідна частина патрубка зроблена зйомною.

Фіксація завантажувального пристрою в певному положенні здійснюється двома рейковими захватами.

Привод завантажувального пристрою здійснюється від мотор-редуктора через черв'ячний редуктор, в якому передбачена можливість здійснення ручного приводу за допомогою спеціальної рукоятки.



#### 4.1.4. Головний привод

Привод млина призначений для обертання барабана з робочим числом обертів під навантаженням.

Привод млина складається з циліндричного косозубого вінця, змонтованого на фланці розвантажувальної цапфи, приводної шестерні, напресованої на вал і встановленої на роликівих сферичних підшипниках, муфти, що сполучає вал приводної шестерні з тихохідним валом редуктора, двоступінчатого циліндричного редуктора з шевронними зубчатими колесами.

Швидкохідний вал редуктора має вихід своїх кінців на обидві сторони; один кінець швидкохідного валу редуктора сполучений за допомогою зубчатої муфти з валом електродвигуна, інший – за допомогою кулачкової муфти з валом редуктора допоміжного приводу. Корпус приводної шестерні встановлений на рамі.

Для контролю температури в корпусі кожного підшипника приводної шестерні передбачено по одному отвору під термометри опору типу ТСП-783.

Зубчатий вінець, приводна шестерня і муфти мають огорожі.

#### 4.1.5. Пристосування та інструмент

*Пристосування для підйому барабана.* Пристосування призначене для підйому барабана млинів із завантаженням при проведенні ремонтних робіт, а також використовується при монтажі млина. Пристосування складається з 2-х опор зварної конструкції, чотирьох гідравлічних домкратів вантажопідйомністю по 180 т кожен і насосної установки.

Для підйому барабана необхідно: а) зняти кришки підшипників барабана, б) відвести завантажувальний пристрій в крайнє положення від млина, в) зняти чохла з домкратів.

При підйомі барабана повинні працювати одночасно тільки два домкрати. Спочатку працюють два домкрати, розташовані з боку розвантаження. Після підйому барабана на 5-7 мм поршні домкратів фіксуються стопорними гайками. Потім працюють домкрати, розташовані з боку завантаження. Після підйому барабана на 5-7 мм поршні домкратів також фіксуються стопорними гайками. Потім знову працює перша пара домкратів і так далі до досягнення необхідної висоти підйому барабана. Управління черговою роботою домкратів здійснюється за допомогою вентилів, розташованих на насосній установці. Висота підйому барабана невелика – 30 мм.

*Допоміжний привод.* Допоміжний привод призначений для обертання барабана млина при проведенні ремонтних робіт і

розрахований на обертання млина із завантаженням при включеній установці гідропідпору. Частота обертання барабана від допоміжного приводу  $0,06 \text{ хв}^{-1}$ .

Допоміжний привод складається з кулачкової і пружної муфт, черв'ячно-циліндрового редуктора і електродвигуна, змонтованих на загальній рамі. Допоміжний привод має блокуючий пристрій, який виключає можливість включення головного приводу при приєднаному допоміжному приводі. Черв'ячне зачеплення в редукторі виконує роль гальма і виключає можливість мимовільного провороту барабана.

**Спеціальний пристрій для механізації ремонту млина.** Для монтажу і демонтажу бронефутеровок передбачений спеціальний пристрій, який складається з механізму підйому і пересування, монорельсів, блоків, візка і підвіски крюка.

Для транспортування бронефутеровок в барабан і з барабана використовуються дві лебідки, встановлені на рамі механізму підйому і пересування.

Пересування візка з вантажем по монорельсу здійснюється шляхом змотування троса з барабана однієї лебідки і намотування троса на барабан іншої лебідки. Напряму пересування візка по монорельсу залежить від напряму обертання барабанів лебідок. Передбачена автоматична зупинка візка в крайніх положеннях кінцевими вимикачами, які, спрацьовуючи, відключають двигуни лебідок.

При транспортуванні вантажу через горловину цапфи барабана підвіска крюка повинна бути піднята у верхнє положення. При переміщенні візка без вантажу підвіска крюка для забезпечення натягнення троса повинна знаходитися у верхньому положенні. Механізмом підйому і опускання підвіски крюка є нижня лебідка механізму пересування.

Передбачена автоматична зупинка підйомного крюка в крайньому верхньому положенні за допомогою кінцевого вимикача, який спрацьовує, відключає двигун лебідки.

Управління роботою спеціального пристрою здійснюється з пульта управління, який знаходиться на рамі механізму підйому і пересування. Пульт має п'ять кнопок. Дві кнопки "вперед" і "назад" служать для управління переміщення візка, дві кнопки "вгору" і "вниз" служать для управління підйомом і опусканням підвіски крюка, одна загальна кнопка "стоп" – для зупинки.

Робота електроустаткування спеціального пристрою для монтажу і демонтажу бронефутеровок проводиться в технічному описі електричної частини.

**Спеціальний інструмент.** Для механізації робіт при монтажі і ремонтах млина призначений пневматичний гайковерт і спеціальний

інструмент, до складу якого входять: ключ торцевий 65 для обтяжки болтів зубчатого вінця і болти віджимні для демонтажу завантажувальної і розвантажувальної втулок.

**Система мащення.** Мастило редуктора Ц2ш-1250 і підшипників барабана млина рідке, циркуляційне, здійснюване роздільно від станцій рідкого мастила:

а) Мащення редуктора Ц2г-1250 проводиться від станції рідкого мастила  $Q=125$  л/хв. Зміна масла 1 раз на 6 місяців. Витрата масла 10000 кг/рік. Кількість зливаного відпрацьовуваного масла 2000 кг/рік. Марка масла – індустріальне І-100А ГОСТ 20799-75.

б) Мащення підшипників барабана млина проводиться від станції рідкого мастила  $Q=35$  л/хв. Зміна масла 1 раз на 3 місяці. Витрата масла 10000 кг/рік. Кількість зливаного відпрацьованого масла 2000 кг/рік. Марка масла – індустріальне І-40А або І-50А ГОСТ 20799-88.

в) Мащення зубчатого зачеплення приводу – проводиться шляхом розпилення від станції густого мастила 0600-2-1-1 ГОСТ 11700-80. Марка мастила – графітне УСсА ГОСТ 3333-80 з додаванням масла трансмісійного автотракторного ГОСТ 4002-53.

г) Тип мастила системи гідропідпору – рідке, циркуляційне під тиском від насосної установки. Марка масла – індустріальне І-40А або І-50А ГОСТ 20799-88.

д) Мастило роликпідшипників установки приводної шестерні – густа паста. Марка мастила – солідол жировий УС-1 або УС-2 ГОСТ 1033-79. Частота зміни 6 місяців. Дозволяється також робота і на рідкому циркуляційному мастилі, для чого передбачено підведення і відведення рідкого мастила через отвір в кришках підшипників, замість пробок. Мащення рідким мастилом здійснювати від циркуляційної станції, яка обслуговує підшипники барабана млина.

Муфта зубчата головного приводу заповнюється маслом трансмісійним автотракторним ГОСТ 4002-53. Частота зміни 6 місяців.

#### **4.1.6. Монтаж і обкатка млина**

**Порядок монтажу млина.** Порядок монтажу млина визначається монтажною організацією спільно з представником шефперсоналу заводу-виготівника.

В процесі виробництва монтажних і пуско-налагоджувальних робіт виконання технічних вимог шефперсоналу заводу-виготівника є обов'язковим як для замовника, так і для монтажно-будівельної і пуско-налагоджувальної організацій. У разі невиконання вимог шефперсоналу завод-виготівник знімає з себе всю відповідальність за

працездатність млина, шеф-інженер виїжджає на завод, а договір на шефмонтаж розривається.

Для проведення правильної збірки млина слід керуватися заводським маркуванням. В ході монтажу млина відступ від технічної документації заводу-виготівника забороняється.

**Установка фундаментних рам.** Для установки фундаментних рам необхідно підготувати сталеві підкладки з розрахунку навантаження на них не більше  $40 \text{ кгс/см}^2$ . У кожному пакеті повинні бути не більше трьох підкладок загальною товщиною від 30 до 50 мм, причому задирки і забоїни на них не допускаються. Встановлені підкладки повинні щільно прилягати до бетону фундаменту і до нижньої опорної поверхні фундаментних рам.

Для полегшення і прискорення монтажу рекомендується застосовувати клинові підкладки шириною 80-100 мм і довжиною, що перевищує ширину рами не менше ніж на 100 мм. Похил кожного клину повинен бути 1:25.

Нижні опорні поверхні фундаментних рам перед установкою знежирити. Виступи на них в місцях установки підкладок не допускаються.

При установці фундаментні рами орієнтують по подовжній і поперечній осях фундаменту. Перевіряється збіг осей отворів у фундаментних плитах з фактичними центрами колодязів для фундаментних болтів, а також збіг розмітки осей симетрії на плитах з осями симетрії на фундаменті. Установка і вивіряння фундаментних рам проводиться після вивіряння горизонтальності цапф барабана в зборі з футеровкою і зубчатим вінцем.

Після установки і вивіряння млина і закріплення рам фундаментними болтами, будівельна організація повинна провести підливку фундаментних рам бетонною сумішшю. Перед підливкою підкладки в кожному пакеті прихопити електрозварюванням.

В процесі підливки в анкерні колодязі не повинен потрапляти бетон. Для цього анкерні болти біля виходу їх з колодязів щільно обмотати кабельним обплетенням або азбестовим шнуром, а потім колодязь залити кабельною мастикою.

При підливці необхідно дотримувати наступні умови: поверхні, що підливаються, добре очистити від сміття, масляних плям і промити водою, фракція щебеня в бетоні підливки не повинна бути більше 15 мм, підливку проводити без перерви і закінчити до початку схоплювання бетону.

Особливу увагу звернути на те, щоб простір під фундаментними рамами ретельно заповнювався бетоном. Бетонну суміш проштовхувати під рами і ущільнювати за допомогою металевих штирів, вібраторів і

інших пристосувань. Час витримки бетону встановлюється організацією, що проводить підливку. Підливку виконати строго за технологією будівельної організації і Державними будівельними нормами (ДБН).

Після набору міцності бетону підливки не менше 70% провести остаточне затягування болтів.

**Монтаж барабана і підшипників.** Барабан млина надходить на монтажний майданчик в розібраному вигляді. Корпус барабана, що складається з двох половин, змонтовувати на двох опорах для підйому барабана, які заздалегідь встановити на фундаменті на чотирьох гідравлічних домкратах. Опори застосовуються для зручності монтажу, в процесі ж експлуатації вони використовуються при ремонті.

На опори спочатку встановлюють одну половину корпусу барабана, на яку за допомогою крана накладають другу половину. Обидві половини скріплюють болтами.

На встановлені фундаментні рами монтують опорні плити, а потім – корпуси підшипників. Болти, що кріплять опорні плити, залишають незатягнутими. Перед установкою корпусів підшипників необхідно перевірити пришабровку їх сферичних поверхонь по фарбі, після чого останні рясно змастити жировим солідолом УС-1 або УС-2 ГОСТ 1033-79. Ступінь прилягання сферичної поверхні корпусу підшипника до сферичної поверхні опорної плити і бабітової заливки до цапф барабана повинен відповідати спеціальним нормам.

У разі відхилень пришаброваних поверхонь від норми, які можуть виникнути в результаті транспортування і зберігання, необхідно ці поверхні знов пришабрити на монтажі силами і засобами замовника.

Ступінь прилягання поверхні бабітової заливки підшипників до цапф необхідно перевірити методом прокручування барабана від допоміжного привода.

Потім до корпусу барабана прикріпити завантажувальну і розвантажувальну цапфи. Контрольні риски осі "Х" на корпусі барабана і цапфах повинні співпадати. Затягування болтів, що кріплять цапфи до корпусу барабана, провести згідно інструкції. Ступінь прилягання цапф до корпусу барабана повинен відповідати нормам.

Зібраний барабан за допомогою домкратів обережно опустити на підшипники, при цьому перевищення однієї цапфи над іншою більше 2 мм не допускається.

Співвідношення осі барабана з віссю підшипників забезпечують переміщенням в потрібну сторону опорних плит за допомогою віджимних болтів. Зазор між опорними буртами розвантажувальної цапфи і бічними поверхнями опорно-упорного підшипника не повинен бути більше зазору, вказаного в інструкції. На підшипники барабана

встановлюють кришки. Для зручності збірки на кожному фланцевому з'єднанні кришок встановлено по два контрольні штифти.

Необхідно видалити з корпусу барабана всі розпірки і потім провести зварку монтажних швів барабана і корпусу барабана зсередини і зовні згідно кресленням і інструкції заводу. На фланець розвантажувальної цапфи встановити зубчатий вінець, при цьому перевірити щільність прилягання стикуючих поверхонь в площинах роз'єму вінця. Допустимий зазор (місцевий) не повинен бути більше вказаного в інструкції. При установці вінця необхідно керуватися заводським маркуванням.

Необхідно провести футерування барабана, при цьому роботу доцільно проводити в наступній послідовності:

1. Підігнати, пробити отвори і наклеїти гумові пластини на мастику УМС-5 ГОСТ 14791-79, яка підігріта до  $+60^{\circ}\text{C}$  і наноситься шаром до 2 мм на очищену від пилу внутрішню поверхню корпусу барабана силами і засобами замовника. Стики прокладок повинні бути розташовані так, щоб запобігти циркуляції пульпи.
2. Укласти на циліндричній частині барабана футерування і ліфтери.
3. Встановити втулки порожнистих цапф. При цьому контрольні риски осі "X" на втулках і цапфах повинні співпадати.
4. Укласти торцеве футерування, ліфтери і решітки. Подачу футерувань в барабан здійснювати через люки за допомогою крана або через завантажувальну втулку за допомогою спеціального пристрою для механізації. При необхідності, підігнати футерування, решітки, ліфтери шляхом вогняного різання силами і засобами замовника.
5. Після закінчення футерування барабана перевірити радіальне і торцеве биття цапф і зубчатого вінця, які не повинні бути більше величин, вказаних в кресленнях.

Після закінчення монтажу корпусу барабана захвати на обичайці зрізати, місця різання ретельно зачистити урівень з основним металом.

**Монтаж приводної шестерні.** Перед установкою приводної шестерні на фундамент необхідно перевірити наявність зазору 20 мм між стінками корпусу і рами приводу. У разі його відсутності, зазор встановити зсувом корпусу на рамі приводу у бік барабана. Наявність зазору 20 мм забезпечує: регулювання бічного і радіального зазорів між зубами шестерні і вінця, витягання валу з шестернею з корпусу, установку валу з шестернею в корпус, витягання корпусу підшипників в зборі з валом і кришками підшипників з рами приводу, установку корпусу підшипників в зборі з валом і кришками підшипників на раму приводу.

При установці шестерні її необхідно піднімати лебідкою або таллю до вінця і котити по ньому до посадки на своє місце.

При заливці рами приводу бетонним розчином необхідно прийняти заходи, щоб бетонний розчин і сторонні предмети, сміття не потрапили в простір між корпусом і рамою. Корпус повинен мати можливість, при необхідності, переміщатися по рамі. Після установки приводної шестерні, вставити в зазори дерев'яні клини.

Для того, щоб вийняти шестерню будь-яким з вказаних способів, необхідно зрушити віджимними болтами корпус від барабана на величину зазору. Потім обережно підняти за вал і, при необхідності, одночасно котити шестерню по вінцю. Притиск шестерні до вінця забезпечуватиметься власною вагою шестерні.

Приводну шестерню встановлюють по зубчатому вінцю таким чином: зубчатий вінець розділяють на 12 рівних частин так, щоб роз'єм половинок знаходився в середині частин, заміряють в 12 точках радіальне і бічне биття зубчатого вінця, по точці максимального радіального биття вінця встановлюють радіальний зазор в передачі рівний 5 мм, бічні зазори з притиснутого боку повинні бути відсутніми, а з протилежного боку, залежно від величини радіального зазору, повинні бути в межах допустимих величин. Прилягання зубів вінця і приводної шестерні (пляма контакту) повинне бути забезпечене відповідно до норм.

Після вивіряння і закріплення установки приводної шестерні проводять заливку рами приводу бетонним розчином як вказано вище, а потім встановлюють кожух зубчатого вінця.

**Монтаж електродвигуна.** Втулка на вал електродвигуна напресовується при монтажі. Електродвигун встановлюють на фундамент. При цьому, після центрівки, повинна бути витримана співісна валів електродвигуна, редукторів і приводної шестерні. Неспіввісність валів, що сполучаються, не більше 0,2 мм.

Після напресовки втулки на вал електродвигуна ретельно зашпаклювати торець валу для чого використовують епоксидну шпаклівку з наповнювачем: азбестом, портландцементом або маршалітом.

Після установки і вивіряння електродвигуна на фундаменті проводиться заливка його рами бетонним розчином.

Перевіривши і оглянувши електродвигун згідно інструкції по монтажу і експлуатації електродвигуна, його включають під напругою і перевіряють правильність напряму обертання валу. Після цього втулки, насаджені на кінці валів електродвигуна і редуктора, сполучають з обіймами муфти.

**Монтаж завантажувального пристрою.** До монтажу завантажувального пристрою можна приступити після закінчення установки барабана млина. Для цього у відповідних місцях насипають щебінь, на який укладають шпали з рейками, встановлюють рами для кріплення завантажувального пристрою.

Після установки, вивіряння і закріплення рейок і рам проводять установку завантажувального пристрою в робоче положення за допомогою ручного приводу.

Необхідно перевірити зазор в сполученні патрубків завантажувального пристрою і завантажувальної втулки барабана. Зазор в сполученні повинен бути не менше 10 мм.

Включити механічний привод і завантажувальний пристрій, відсунути від млина, а потім знов по рейках встановити в робоче положення. Переконавшись в тому, що зазор в сполученні не змінився, провести заливку рам шпал і рейок бетонним розчином.

**Монтаж редуктора Ц2ш-1250.** Монтаж редуктора проводиться у відповідності з паспортом редуктора.

**Монтаж допоміжного приводу.** Допоміжний привод складається з електродвигуна і редуктора, вмонтовується на спеціальній рамі з боку протилежного головному електродвигуну. Редуктор допоміжного приводу прицентровується до редуктора головного приводу і з'єднується з ним за допомогою кулачкової муфти. Величини допусків радіальних зсувів і перекосів валів вказані в паспорті допоміжного редуктора 5Бу134-ОПС.

Електродвигун і редуктор допоміжного приводу з'єднується пружною втулково-пальцевою муфтою. При збірці і установці приводу необхідно перевірити роботу механізму включення кулачкової муфти.

**Центрування валів.** Центрівку валів слід проводити центрувальними скобами, що встановлюються так, щоб при обертанні одного валу щодо іншого, вони не зачіпали одна одну, а вимірюваний зазор між ними був в межах 0,5-1 мм. Необхідно, щоб скоби були надійно закріплені на втулках, мали достатню жорсткість і не пружинили при вимірах. Радіальні і торцеві виміри проводити щупом або індикатором.

Центрування проводиться в наступному порядку.

При суміщених монтажних мітках втулок скоба ставиться у вертикальне положення, яке буде нульовим ( $0^\circ$ ). Потім для запису вимірів радіальних і торцевих зазорів в положеннях  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ , а також результируючих даних, готується схема з п'яти кіл.

У середині кола заносяться торцеві зазори, а поза нею – радіальні зазори. Торцеві зазори в нульовому положенні заміряють в чотирьох крапках (зверху, знизу, справа, зліва), а радіальний зазор по скобі – зверху. Результати вимірів заносять в коло для положення  $0^\circ$ . Якщо



вимір торцевого зазору в нижній крапці провести неможливо, то його величину приймають рівній сумі бічних зазорів мінус величина верхнього зазору, а потім, повертаючи одночасно вали послідовно до положень 90°, 180°, 270°, вимірюють торцеві і радіальні зазори в кожному положенні.

Для контролю правильності вимірів після чотирьох вимірювань вали слід встановити в первинне положення (0°). Результати при цьому повинні співпадати з первинними. Результати вимірювань торцевих зазорів, отриманих в кожній однаково розташованій крапці на втулці, підсумовують і, для отримання середньої величини, ділять на число вимірювань в даній крапці. Це і є результуючим записом центрівки по торцю.

Виміри вважаються правильними, якщо сума верхніх і нижніх вимірів рівна сумі бічних, як по торцю, так і по колу. Різниця сум протилежних зазорів допускається не більше 0,02 мм.

При великих різницях необхідно знайти і усунути причину неточності вимірювань і повторити виміри торцевих і радіальних зазорів у всіх положеннях. Центрівка вважається задовільною, якщо різниця протилежних зазорів по колу і по торцю не перевищуватиме 0,1 мм.

У разі незадовільних результатів центрівки необхідно перемістити прицентровуючий вузол в горизонтальній або вертикальній площинах і всі операції по центрівці провести знов.

**Підготовка до пуску і холоста обкатка.** При закінченні монтажу проводять холосту обкатку млина, при цьому необхідно заздалегідь: перевірити стан кріплення ліфтерів, футерувань і грат, переконатися у відсутності сторонніх предметів в кожусі зубчатого вінця, зубах вінця і приводної шестерні, роз'єднати зубчату муфту, що сполучає вал електродвигуна з валом редуктора, на повільних обертах за допомогою допоміжного приводу повернути барабан (підшипники барабана при цьому повинні бути змащені), проконтролювати поверхні прилягання зубів зубчатого вінця і шестерні по всій довжині, що сполучається.

Після перевірки і огляду млина допоміжний привод відключають, включають електродвигун головного приводу під напругу і перевіряють правильність напрямку обертання валу. Потім вал електродвигуна сполучають з валом редуктора за допомогою зубчатої муфти, включають в роботу системи мастила млина.

Після перевірки готовності млина до обкатки і усунення всіх виявлених дефектів проводять обкатку млина на холостому ході при подачі води і робочих числах обертів барабана протягом 8 годин.

При обкатці млина необхідно стежити за плавністю роботи приводу, за температурою масла, за роботою змащувальної системи.

Всі виявлені несправності усунути в процесі обкатки.

Переконавшись в справній роботі млина, обкатку її припиняють і проводять ревізію кріпильних деталей.

**Обкатка млина під навантаженням.** Контрольне випробування млина проводиться під навантаженням з подачею в млин подрібнюваного продукту з водою протягом 72-х годин безперервно, з короткочасними зупинками для огляду механізмів.

При контрольних випробуваннях необхідно керуватися наступними вимогами:

- перевірити правильність монтажу;
- перевірити відсутність протікання через отвори для болтів кріплення броньових плит, через кришки люків й ущільнення;
- перевірити плавність роботи зубчатої передачі і сполучних муфт;
- перевірити температуру нагріву підшипників барабана, яка не повинна перевищувати +60°C;
- перевірити роботу допоміжного приводу шляхом обертання ним млина на один оберт барабана в двох напрямках.

#### **4.1.7. Здача в експлуатацію і технічне обслуговування млина**

##### **Здача в експлуатацію млина**

Млин, який безперебійно і надійно пропрацював при контрольному випробуванні протягом 72 годин, вважається прийнятим в експлуатацію. При цьому повинен бути складений приймально-здавальний акт, що підписується замовником і представником заводу-виготівника.

Млин, не прийнятий замовником по акту, не може бути допущений до експлуатації без дозволу заводу-виготівника. При пуску млина в експлуатацію без дозволу заводу-виготівника, млин вважається остаточно прийнятим замовником і завод-виготівник в цьому випадку звільняється від всіх гарантій по роботі млина.

##### **Технічне обслуговування млина**

**Підготовка до роботи.** За роботою млина повинен вести спостереження обслуговуючий персонал. До роботи по обслуговуванню і ремонту млина допускаються фахівці, що пройшли інструктаж по техніці безпеки, а також засвоєння правил експлуатації.

**Порядок роботи.** Необхідно стежити за станом підшипників барабана, перевіряти подачу масла. Масло через бризкало повинно рівномірно потрапляти на всю робочу поверхню цапф, а також на наполегливі бурти розвантажувальної цапфи. Знос бабіту на торцях

корпусу опорно-упорного підшипника допускається не більше 5 мм і підлягає перевірці не пізніше 24 місяців експлуатації. Необхідно контролювати наявність достатньої кількості мастила в підшипниках приводної шестерні. У разі забруднення мастило необхідно змінити, а деталі виробів промити гасом.

При роботі млина зсув корпусу підшипників по сфері щодо опорної плити, як в поперечному так і подовжньому напрямках, допускається не більше 1,5 мм від його номінального розташування.

Сферичні поверхні корпусів підшипників і підшипники приводної шестерні повинні періодично, не рідше ніж один раз на місяць, змащуватися жировим солідолом УС-1 або УС-2 ГОСТ 1033-79 за допомогою ручного шприца, через отвори, які є в опорній плиті підшипників барабана і в кришках підшипників приводної шестерні. Нагрів підшипників барабана вищий  $+60^{\circ}\text{C}$  указує на ненормальну їх роботу і спричиняє за собою розплавлення бабіту.

Привод млина повинен працювати м'яко, без стукотів і вібрацій. В процесі експлуатації млина не допускається: ослаблення затягування болтів, що кріплять ліфтери, футерування і грати, зносу футерувань до повного їх випадання (може привести до пошкодження і швидкого зносу корпусу барабана), попадання пульпи на зубчатий вінець. У разі попадання пульпи на зубчатий вінець, завод-виготівник звільняється від гарантій по терміну служби зубчатого вінця і приводної шестерні. Пролите масло повинне бути негайно прибрано.

Незалежно від стану млина всі його робочі частини і механізми повинні ретельно оглядатися не рідше за 3-4 рази на рік а в перші шість місяців роботи після пуску оглядатися не рідше ніж один раз на місяць. Затягування ж болтів перевіряти щонеділі. При обтягуванні болтів фланцевого з'єднання корпусу барабана з цапфами керуватися інструкцією. При цьому всі відмічені дефекти і неполадки в роботі повинні негайно усуватися (табл. 4.2).

Перед пуском млина центр тяжіння рудного завантаження може займати положення, несприятливе для пуску млина. В цьому випадку рекомендується допоміжним приводом повернути барабан у зворотному напрямі на величину дуги по зовнішній поверхні барабана, рівній 3 м. Виконання цієї операції дозволить змістити центр тяжіння рудного завантаження від осі барабана в протилежну сторону установки приводної шестерні і тим самим полегшити пуск млина від основного електродвигуна. При виробництві ремонтних робіт переставляти барабан млина з одного робочого місця на інше не рекомендується. У разі неможливості ремонту на місці установки дозволяється переставляти барабан з одного робочого місця на інше за умови виконання наступних технічних вимог:

- разом з барабаном і зубчатим вінцем слід переставити і підшипники з опорними плитами;

- виставити підшипники на новому робочому місці з дотриманням вимог підрозділу "Монтаж барабана і підшипників";

- видалити задирки, напливи і інші нерівності на зубах шестерні і зубчатого вінця напилком або шліфмашинкой, а також прочистити западини зубів до основного металу.

Регулювання зубчатого зачеплення "шестерня-вінець" незалежно від зносу зубів провести відповідно до вимог інструкції.

Радіальний зазор в зачепленні регулювати шляхом пересування опорних плит підшипників спеціально передбаченими для цієї мети віджимними болтами.

Таблиця 4.2. Характерні несправності і методи їх усунення

| Характер неполадок                       | Можлива причина  | Метод усунення  |
|--|--|---|
| 1. Вібрація електродвигуна               | Перевантаження при пуску від злежаного в барабані матеріалу                                      | Прокрутити млин на малих обертах                                      |
|  | Розплавлення підшипників барабана млина  | Замінити корпус підшипника  |
| 2. Стукіт в корпусі барабана             | Потрапив сторонній металевий предмет   | Зупинити млин, видалити сторонній предмет                             |
| 3. Стукіт в зубчатій передачі            | Порушення правильності зачеплення унаслідок великого зносу зубів                                 | Замінити шестерню   |
|  | Спрацювалися підшипники барабана Ослаблення кріплення установки приводної шестерні до фундаменту | Замінити справними корпуси підшипників<br>Затягнути фундаментні болти |
| 4. Надмірний нагрів підшипників барабана | Потрапляння бруду в масло, недостатня кількість мастила на підшипниках                           | Замінити масло, промити підшипники гасом, збільшити подачу масла      |
| 5. Стукіт зубчатої муфти                 | Утворення недостатнього зазору між напівмуфтами, ослаблення шпонок, порушення центрування        | Розібрати муфту, усунути несправність або замінити деталі             |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  | валів, спрацьованість зубів   |   |
| 6. Протікання води через отвори під болти, що кріплять футерування і ліфтери | Розрив болтів, ослаблення затягування болтів в з'єднанні, зносилися ущільнюючі шайби                                    | Зруйновані болти і шайби – замінити, ослаблені – підтягти   |
| 7. Тече масло з підшипників  | Несправні ущільнення, закриті вентиля на зливному трубопроводі, засмітилася зливна труба, подача зайвої кількості масла | Виправити або замінити ущільнення, відкрити вентиля, прочистити або відрегулювати подачу масла  |
| 8. Підплавився підшипник барабана  | Припинилася подача масла на цапфу   | Негайно зупинити млин.<br>Промити підшипник і змінити масло.<br>Зачистити підшипник і змінити масло.<br>Зачистити підшипник і цапфу, відновити бабітову заливку корпусу підшипника і ретельно пришабрить. |
| 9. Нагрів підшипників редуктора  | Пошкодження підшипників.<br>Припинення подачі мастила на підшипники.  | Замінити підшипники.<br>Відрегулювати подачу мастила на підшипники.   |
| 10. Підвищений шум в зубчатих передачах редуктора                            | Знос або вифарбовування зубів   | Замінити зубчаті пари.  |
| 11. Вібрація редуктора   | Знос підшипників редуктора. Порушення центрівки редуктора з млином і електродвигуном.                                   | Замінити підшипники.<br>Відцентрувати редуктор з млином і електродвигуном.  |
| 12. Витікання масла по роз'єму редуктора                                     | Підвищився тиск пари масла. Засмітилася віддушина   | Прочистити віддушину.   |

## 4.2 Млин мокрого самоподрібнення ММС-90-30А

### 4.2.1. Призначення, область застосування і принцип роботи млина

Млин ММС-90-30А призначений для мокрого самоподрібнення руд чорних і кольорових металів, а також інших матеріалів, при якому як тіла, що дроблять, використовуються крупні шматки того ж матеріалу.

Робота млина здійснюється при безперервній подачі в порожнину обертаючого барабана шматків руди різних розмірів і води.

Матеріал, що поступив в барабан, захоплюється ліфтерами і піднімається вгору до тих пір, поки радіальна складова сили тяжіння не перевищить відцентрову силу, після чого шматки послідовно скачуються і падають вниз.

Таким чином, встановлюється постійне перемішування матеріалу, під час якого відбувається його подрібнення шляхом розколювання, розчавлювання і стирання.

Подрібнений матеріал, крупність якого стає менше розміру щілини розвантажувальних ґрат, разом з водою проходить через щілини і вивантажується з млина за допомогою спеціальних підйомників підґратчастого футерування.

Продуктивність млина визначається при експлуатації і залежить: від величини початкового живлення, тонкості кінцевого продукту, фізичних властивостей руди, густини пульпи і інших чинників.

Технічна характеристика млина подана в табл. 4.3. Перший вітчизняний досвідно-промисловий зразок млина самоподрібнення діаметром 9 м (МБ-90-30) був виготовлений у 1969 р. (рис. 4.2).

Млин складається із наступних основних складових частин: барабан, підшипник опорний, підшипник опорно-упорний, завантажувальний пристрій, установка приводної шестерні, муфта МЗП19, стопорний пристрій, пристосування для підйому барабана, пристосування для повороту завантажувального пристрою, система мастила млина, система мастила електродвигуна, система гідропідпору підшипників барабана, гідропривод стопорного пристрою, розводка трубопроводів на млині, електроустаткування.

## Технічна характеристика млина

|  |                 |
|--|-----------------|
| Внутрішній діаметр циліндрової частини барабана (без футерувань), мм   | 9100            |
| Внутрішня довжина циліндрової частини барабана (без футерувань), мм  | 3000            |
| Об'єм робочої камери барабана (до решітки), м <sup>3</sup>   | 160             |
| Продуктивність млина, т/год  | 300             |
| Частота обертання барабана, об/хв  | 11,1            |
| Максимальна крупність грудок матеріалу, що завантажується в млин (не більше), мм   | 400             |
| Розрахункова максимальна споживана потужність млинів, приведена до валу електродвигуна при коефіцієнті заповнення барабана 0.45, насипній вазі матеріалу 2,2 т/м <sup>3</sup> , частоті обертання барабана 11,1 об/хв, кВт | 3500            |
| Відкрита зубчата передача  |                 |
| модуль нормальний, мм  | 28              |
| кут нахилу зубів   | 6 26            |
| число зубів вінця, шт.   | 284             |
| число зубів шестерні, шт.  | 42              |
| передавальне число   | 6,76            |
| Електродвигун приводу млина  |                 |
| тип  | СДМЗ-2-24-55-80 |
| потужність, кВт  | 4000            |
| напруга, вольт   | 6000            |
| частота обертання, об/хв   | 75              |
| Габарити млина (не більше), мм   |                 |
| довжина  | 26000           |
| ширина   | 15000           |
| висота   | 11000           |
| Маса млина без електроустаткування, пристосувань, системи мастила, бутари, запасних частин (не більше), кг   | 700000          |

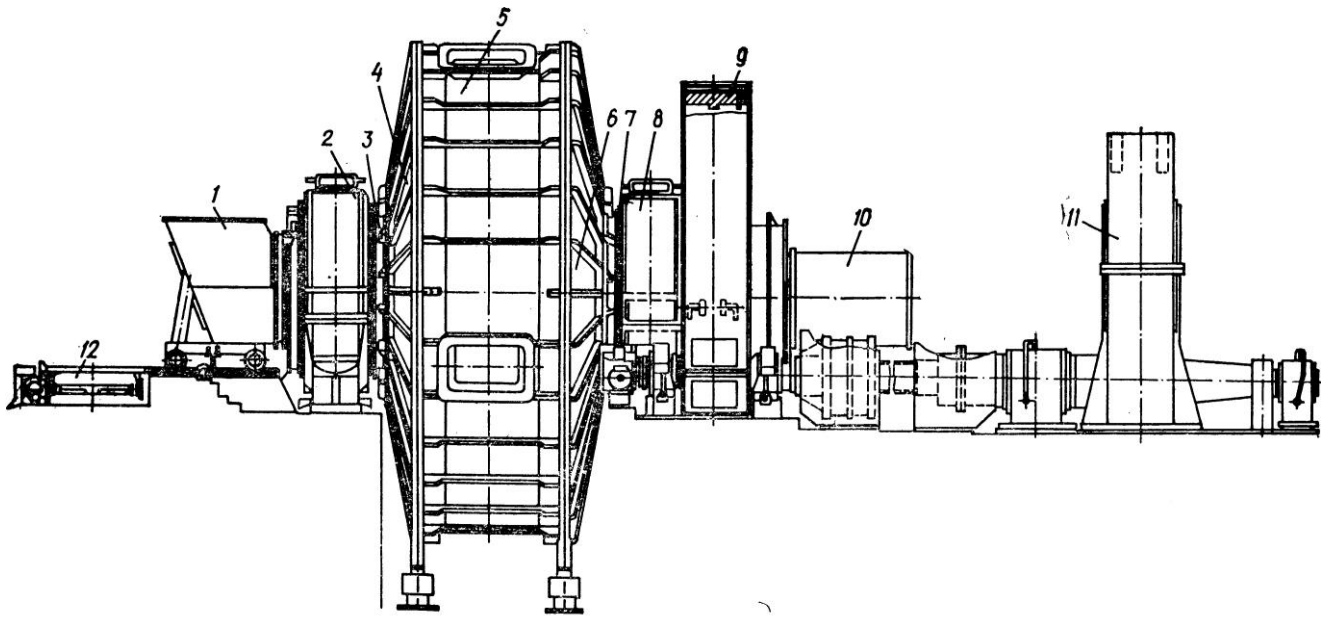


Рис. 4.2. Загальний вид млина самоподрібнення ММС-90-30А: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – корінний підшипник завантаження; 3 – цапфа завантажувальна; 4 – кришка торцева завантажувальна; 5 – циліндрична частина барабана; 6 – кришка торцева розвантажувальна; 7 – цапфа розвантажувальна; 8 – корінний підшипник розвантаження; 9 – вінець зубчатий; 10 – бутара; 11 – електродвигун; 12 – візок відкатувальний.

#### 4.2.2. Конструкція основних вузлів млина

**Барабан.** Барабан є головною і найбільш важкою складовою частиною млина. Він складається з корпусу барабана, порожнистих цапф, втулок цапф, бутари, футерувань, ліфтерів і ґрат.

Корпус барабана має зварну конструкцію, розділену поперечними діаметральними площинами на чотири симетричні частини. Ці частини з'єднуються між собою за допомогою болтів, після чого зварюються при монтажі.

Цапфами (завантажувальна і розвантажувальна) є монолітні сталеві відливання. Вони приєднуються до корпусу барабана фланцевим болтовим з'єднанням. Болти мають спеціальну конструкцію і виготовляються з легованої сталі.

Втулка завантажувальної цапфи має спіралі, сприяючі прискоренню живлення млина.

Втулка розвантажувальної цапфи має спіралі, сприяючі розвантаженню пульпи. Вхідний кінець розвантажувальної втулки введений всередину барабана і є приймальною частиною з ребрами, розташованими в такому порядку, що разом з підрешітними



футеруваннями, що виконують також і роль підйомників, забезпечують направлений потік пульпи в розвантажувальну цапфу.

Внутрішні поверхні барабана мають змінне облицювання, що складається з футерувань, ліфтерів і ґрат. Кріплення футеровок і ліфтерів здійснюється болтами з потайними головками. Для ущільнення отворів під болти є кільця з технічної гуми, а також спеціальні шайби. Для оберігання внутрішньої поверхні барабана від абразивного зносу і зменшення шуму, під футерування укладається листова гума.

У розвантажувальну частину входять також ґрати, ліфтери і підрешіткові футерування-елеватори. Радіальні стики ґрат мають похилі скоси для сполучення з ліфтерами, що забезпечують кріплення ґрат і що виконують також роль відбивачів. Щілина в ґратах виконана клиноподібної форми.

Підґратчасті футерування (розвантажувальні елеватори) окрім захисної ролі, забезпечують вивантаження з млина подрібненого матеріалу безперервним потоком. Ці футерування мають ребра, які утворюють кишені, які перешкоджають поверненню пульпи до барабана.

**Корінні підшипники.** Опорами барабана, що обертається, служать два корінні підшипники. Підшипник, розташований у зубчатого вінця, сприймає не тільки радіальні зусилля, але і осьові, завдяки наявності буртів на цапфі розвантажувальної частини. Інший підшипник сприймає тільки радикальні зусилля. У обох підшипників є сталеві знімні вкладиші, які мають бабітову заливку; вкладиші встановлюються в чавунні корпуси.

Нижня опорна частина корпусів підшипників має сферичну поверхню, що дозволяє компенсувати неточності монтажу і рівномірно розподілити навантаження на робочу поверхню підшипників. Сферична поверхня корпусів підшипників змащується універсальним середньо-плавким мастилом УС-1 ГОСТ 1033-79 за допомогою ручного шприца, для чого на сферичній поверхні опорних плит передбачені канали для підведення мастила.

У бабітовій заливці підшипників і в корпусах є кишені з отворами для підведення мастила під тиском від спеціальної насосної установки. У корпусах підшипників є канали для відведення відпрацьованого масла. Вкладиші підшипників виконані з кутом 120°. Вкладиші кріпляться до корпусів за допомогою клинів. Роз'єм кришок підшипників виконаний по осьовій лінії. Кришки кріпляться до корпусів підшипників через проміжні підставки. Для спостереження за надходженням масла на кришці підшипника встановлений ліхтар з підсвічуванням.

Контроль подачі мастила ведеться за допомогою приладів. Для контролю температури в корпусі кожного підшипника розміщено два термометри опору. Ущільнення підшипників виконані повстяними. Для скидання масла цапфи мають маслоскидаючі гребінці.

*Завантажувальний пристрій.* Подача руди в млин здійснюється через завантажувальний пристрій, який є патрубком зварної конструкції.

Для забезпечення вільного доступу всередину млина, завантажувальний пристрій виконаний пересувним. Привод завантажувального пристрою здійснюється від мотор-редуктора через черв'ячний редуктор, в якому передбачена можливість здійснення ручного приводу за допомогою спеціальної рукоятки.

Для оберігання від зносу патрубків усередині футерований броньовими листами. Вихідна частина патрубка зроблена знімною.

*Привод.* Привод призначений для обертання барабана з робочим числом обертів під навантаженням, а також для повільного повороту і гальмування барабана при виконанні ремонтних робіт. Ця операція здійснюється головним електродвигуном із застосуванням групового перетворювача частоти.

Привод млина складається з циліндрового косозубого вінця, змонтованого на фланці розвантажувальної цапфи; приводної шестерні, напресованої на вал і встановленої на роликівих сферичних підшипниках; проміжного валу з муфтами, що сполучають вал приводної шестерні з валом синхронного електродвигуна.

Вал приводної шестерні має вихід своїх кінців на обидві сторони. З боку протилежному електродвигуну на вал приводної шестерні насаджується зірочка стопорного пристрою.

Зубчатий вінець, приводна шестерня, проміжний вал з муфтами, зірочка стопорного пристрою мають огорожі.

*Стопорний пристрій.* Стопорний пристрій служить для стопорення барабана млина із навантаженням при проведенні ремонтних робіт. Стопорний пристрій складається з корпусу, двох гідравлічних циліндрів, двох важелів з тягою, зірочки, 4-х кінцевих вимикачів і насосної установки.

Стопорення здійснюється двома важелями, що замикають вал приводної шестерні через уступи в зірочці, в наступній послідовності:

- електродвигун головного приводу включається вручну в режимі гальмування;

- вимикається вручну електродвигун насоса. Після підходу стопорних зубів з радіальним зазором 3-5 мм до западини зірочки /обидва поршня в цей час знаходиться в циліндрах в крайніх

положеннях/ головний електродвигун і електродвигун насоса автоматично відключається.

Ростопорення проводиться після закінчення ремонтних або монтажних робіт в наступній послідовності:

- електродвигун головного приводу включається уручну в режим гальмування;

- включається вручну електродвигун насоса, стопорні зуби відходять від зірочки в початкові положення;

- включається головний електродвигун для роботи на повільних або робочих числах обертів.

**Пристосування для підйому барабана.** Пристосування служить для підйому барабана млина з рудним завантаженням при проведенні ремонтних робіт (заміні корпусів або вкладишів підшипників). Пристосування складається з 2-х опор зварної конструкції, чотирьох гідравлічних домкратів, вантажопідйомністю по 3000 тс кожен і насосної установки.

При підйомі повинні працювати одночасно тільки два домкрати. Спочатку працюють два домкрати, розташовані з боку розвантаження. Після підйому барабана на 5-7 мм поршні домкратів фіксуються стопорними гайками. Потім працюють домкрати, розташовані з боку завантаження.

Після підйому барабана на 5-7 мм поршні домкратів також фіксуються стопорними гайками. Потім знову працює перша пара домкратів і так далі до досягнення необхідної висоти підйому барабана.

Управління черговою роботою домкратів здійснюється за допомогою вентилів, розташованих на насосній установці. Найбільша висота підйому барабана 30 мм.

**Пристосування для повороту завантажувального пристрою.** Пристосування призначене для повороту на 90° завантажувального пристрою, висунутого із завантажувальної втулки млина.

Пристосування для повороту завантажувального пристрою складається з поворотного круга, який обертається на підшипниках навколо центральної осі.

На поверхневий круг встановлюються рейки для пересування завантажувального пристрою. Спирається поворотний круг на ролики, рівномірно розташовані по колу.

Поворот завантажувального пристрою здійснюється уручну. Після повороту поворотний круг закріплюється планками, відкатується завантажувальний пристрій по рейках перпендикулярно осі обертання млина і тим самим забезпечується вільний підхід у внутрішню порожнину барабана при проведенні ремонтних робіт.

### 4.2.3. Система мащення млина

Для мащення млина застосовано два види мастила: рідке циркуляційне, яке забезпечує маслом корінні підшипники, підшипники приводної шестерні і підшипники електричних машин; густе автоматичне, яке забезпечує маслом зубчате зачеплення приводу млина.

Змащення корінних підшипників млина і підшипників приводної шестерні – групове на 3 млини від станції рідкого мастила продуктивністю 300 л/хв. У систему мащення підшипників входять: станція рідкого мастила, трубопровід з арматурою і контрольно-вимірювальною апаратурою.

У кожного підшипника встановлені вентилі, якими регулюється кількість мастила, що подається, і реле потоку РП, які контролюють наявність масла в трубопроводі. При зменшенні кількості масла реле потоку подає імпульс на відключення електродвигуна млина. Для спостереження за подачею масла до підшипників млина встановлені покажчики протікання масла. Злив відпрацьованого масла у відстійник із змащуваних точок проводиться по зливній магістралі самопливом з похилом 1:40.

Для зниження втрат на тертя в підшипниках млина у момент пуску і зупинки передбачена система гідропідпору. Це досягається за рахунок подачі масла під тиском в робочу зону підшипника. Включення в роботу системи гідропідпору повинне проводитися після пуску станції рідкого мастила.

Подача масла до кишень підшипників барабана здійснюється радіально поршневыми насосами типу Н-451 продуктивністю 3 л/хв і тиском 300 кгс/см<sup>2</sup>. подача масла цими насосами проводиться з нагнітального трубопроводу станції рідкого мастила. Пуск і зупинка млина повинні проводитися при працюючій системі гідропідпору.

Дозвіл на включення насоса системи гідропідпору дає реле потоку. Пуск двигуна відбувається автоматично по досягненню необхідного тиску в кишнях підшипників. Відключення гідропідпору відбувається після досягнення барабаном млина розрахункового числа обертів. Інтервал часу, необхідний для цього, встановлюється в процесі експлуатації.

Мащення підшипників електричних машин здійснюється від станції рідкого мастила продуктивністю 35 л/хв. У систему мащення входять: станція рідкого мастила і трубопровід. Система густого автоматичного мастила забезпечує мащення зубчатого зачеплення приводу млина від установки станції густого мастила типу 060-П-1-1 ТУ 14-2-849-89. У систему мащення входять: установка станції густого мастила, чотириходові розподільники РЧЕ-П, форсунки, трубопровід,

прилади. При включенні двигуна станції густого мастила графітне мастило насосом нагнітається в трубопровід. Досягши тиску в системі, рівного приблизно  $30-40 \text{ кгс/см}^2$ , манометр електроконтакту, який встановлений на центральній магістралі, дає дозвіл на переміщення золотника розподільника РЧЕ-II. Величина тиску уточнюється при пуско-налагоджувальних роботах. Тривалість розпилення форсункою 20-30 сек. Повторне включення в роботу – через 1,5-2 години. В процесі експлуатації цей час необхідно уточнити. Тиск повітря в мережі повинен бути не менше  $5 \text{ кгс/см}^2$ .

#### 4.2.4. Електроустаткування млина

Електроустаткування млина ММС-90-30А забезпечує автоматизований пуск, контроль її роботи, зупинку і управління під час проведення ремонтних робіт.

У електроустаткування млина входять наступні складові частини:

- а) електроустаткування головного приводу;
- б) електроустаткування стопорного пристрою;
- в) електроустаткування станції рідкого мастила;
- г) електроустаткування станції густого мастила;
- г) електроустаткування завантажувального пристрою;
- д) електроустаткування установки для підйому барабана;
- е) електроустаткування контролю температури підшипників млина;
- ж) електроустаткування гідропідпору підшипників млина;
- з) електроустаткування контролю температури масла станцій рідкого мастила.

Докладний опис роботи електричних схем і технічні характеристики електроустаткування викладені у відповідних технічних описах.

Окрім цього до складу електроустаткування входить груповий перетворювач частоти, призначений для управління головним двигуном при ремонтах млина. Порядок монтажу, характерні несправності і технічне обслуговування млина ММС-90-30 аналогічні млину ММС-70-23 і детально описані в попередньому розділі.

## 5.СТВОРЕННЯ ДЕЗІНТЕГРАТОРІВ ВІДЦЕНТРОВОГО ТИПУ

### 5.1. Деякі теоретичні аспекти роботи відцентрових дезінтеграторів

У більшості традиційних апаратів при дезінтеграції (дробленні і подрібненні) мінеральної сировини руйнування матеріалу відбувається в результаті його роздавлювання або тертя.

Перспективним способом дезінтеграції твердого матеріалу представляється його руйнування вільним ударом в полі відцентрових сил, що дозволяє зменшити питому витрату електроенергії і забезпечує селективне розкриття корисного компоненту.

Спосіб руйнування матеріалу ударом в полі відцентрових сил реалізується в апаратах відцентрового типу – відцентрових дезінтеграторах. Створення таких апаратів вимагає нових теоретичних підходів до процесу руйнування матеріалу (рис. 5.1).

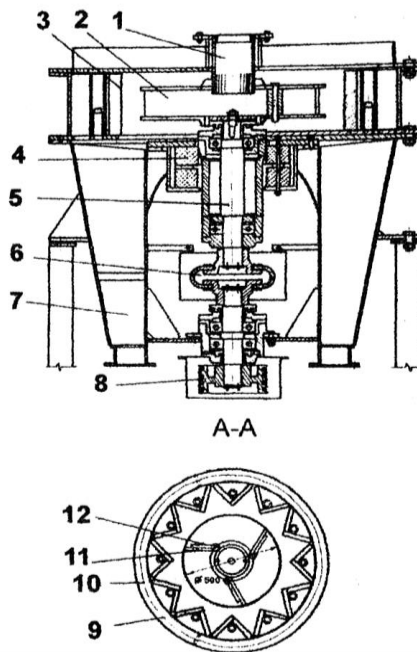


Рис. 5.1. Особливості конструкції і принцип роботи дезінтегратора відцентрового типу: 1 – завантажувальний пристрій, 2 – розгінний ротор, 3 – відбійні плити, 4 – підвіска, 5 – вал ротора, 6 – муфта, 7 – розвантажувальний лоток, 8 – шків приводу ротора, 9 – обичайка, 10 – відбійні плити вугільної форми, 11 – розгінні ребра, 12 – зносостійка пластина.

Для теоретичної інтерпретації процесу дроблення у відцентровому полі пропонується гіпотеза, згідно з якою процес дроблення зерна матеріалу об'ємом  $V$  можна представити рядом визначеної геометричної прогресії. Наприклад, у результаті експериментів дослідним шляхом встановлено, що зерно матеріалу об'ємом  $V$ , отримавши певне прискорення на робочому органі відцентрового дезінтегратора, летить в полі відцентрових сил і при ударі об жорстку перешкоду (відбійні плити дезінтегратора) руйнується на  $n$  грудок. При цьому отримуємо одне зерно об'ємом  $\frac{1}{2}V$ , друге об'ємом  $\frac{1}{4}V$ , третє об'ємом  $\frac{1}{8}V$  і т.д.

Таким чином, у даному випадку знаменник ряду дорівнює 2, 4, 8, 16... $2^k$  а сам ряд, а отже, і схема руйнування вихідного зерна об'ємом  $V$  може бути описана геометричною прогресією виле:

$$V = \frac{V}{2} + \frac{V}{4} + \frac{V}{8} + \frac{V}{16} + \dots + \frac{2V}{2^K} \quad (5.1)$$

У цьому ряді останній член має коефіцієнт 2, так як, передбачається, що найменша частка подрібненого матеріалу не може бути менше двох об'ємів молекул, так як механічним шляхом зруйнувати речовину до молекулярного рівня неможливо.

За інших умов експерименту (об'єм зерна, міцність, швидкість) матеріал може руйнуватися за наступною схемою:

$$V = \frac{2}{3}V + \frac{2}{9}V + \frac{2}{27}V + \dots + \frac{2}{3^{K-1}}V + \frac{2V}{3^K} \quad (5.2)$$

Для різних умов можливі й інші схеми руйнування матеріалу, але всі вони в загальному випадку описуються геометричною прогресією виле:

$$V = \frac{n-1}{n}V + \frac{n-1}{n^2}V + \frac{n-1}{n^3}V + \dots + \frac{n-1}{n^{k-1}}V + \frac{n}{n^k}V \quad (5.3)$$

Показник степені в цих рівняннях визначається з формул:

$$\begin{aligned} \frac{V}{n^K} &\geq V_{\text{МОЛ}}; \\ V_{\text{МОЛ}} &= \frac{M}{\rho \cdot N_A}; \\ \ell_q V - k \ell_q n &\geq \ell_q V_{\text{МОЛ}}; \\ k &\leq \frac{\ell_q V - \ell_q V_{\text{МОЛ}}}{\ell_q n}; \end{aligned} \quad (5.4)$$

де  $V_{\text{МОЛ}}$  – об'єм молекули,  $V$  – об'єм зерна матеріалу,  $M$  – маса граммолекули речовини;  $\rho$  – дійсна густина;  $N_A$  – число Авогадро для грам-молекули речовини ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ )

У тому випадку, коли зерно вихідного матеріалу має об'єм  $1\text{ м}^3$ , наведені вище ряди будуть мати вигляд:

$$1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots + \frac{1}{2^{k-1}} + \frac{2}{2^k} \quad (5.5)$$

$$1 = \frac{2}{3} + \frac{2}{9} + \frac{2}{27} + \dots + \frac{2}{3^{k-1}} + \frac{2}{3^k} \quad (5.6)$$

$$1 = \frac{n-1}{n} + \frac{n-1}{n^2} + \frac{n-1}{n^3} + \dots + \frac{n-1}{n^{k-1}} + \frac{n}{n^k} \quad (5.7)$$

Таким чином, ґрунтуючись на запропонованому підході та уявленні дроблення зерна вихідного матеріалу рядом геометричної прогресії зазначеного вище виду, ми можемо прогнозувати кількість і розміри всього спектру отриманих з початкового зерна осколків. Далі розглянемо механізм руйнування зерна матеріалу, що летить в полі відцентрових сил, при ударі його об жорстку перешкоду. Приймаються вихідні умови: поперечний розмір зерна менше товщини твердої перешкоди (броні), тобто  $\delta_{\text{зп}} \geq \delta_{\text{к}}$ ; час проходження звуку через броню більше, ніж через зерно матеріалу  $t_{3.в.бр.} \geq t_{3.в.к.}$ ; межа пружності на стиск зерна (G) менше відношення сили що діє на нього, до площі зерна  $\frac{F_{\text{к}}}{S_{\text{к}}}$ ; зерно матеріалу має овальну форму, близьку до форми кулі діаметром  $d$  (або радіусом  $r$ ). Зерно матеріалу розганяється до швидкості  $V$  робочим органом відцентрового дезінтегратора – розгінним ротором і рухається в полі відцентрових сил до зустрічі з жорсткою перепоною – відбійними плитами (футеровкою) дезінтегратора. Удар прямий, центральний, тобто під кутом  $90^\circ$ , перпендикулярно плиті. Тоді найбільша площа поперечного перерізу зерна матеріалу:

$$S = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Згідно з другим законом Ньютона, сила, з якою зерновдаряється об плиту дорівнює:

$$F = m \cdot a$$

де  $m$  – маса зерна руди, кг;  $a$  – прискорення зерна, що отримується при зупинці (погашення швидкості до нуля);  $F$  – сила, що діє на зерно, кг. Маса матеріалу дорівнює:

$$m = \rho \cdot V_0 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = \rho \frac{\pi d^3}{6}$$

де  $\rho$  – густина матеріалу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $V_0$  – об'єм зерна матеріалу,  $\text{м}^3$ .

Тоді сила, що діє при ударі, дорівнює:



$$F = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot a \quad (5.8)$$

За час удару прискорення складе

$$a = \frac{v}{t} \quad (5.9)$$

де  $v$  – швидкість при ударі;  $t$  – час дії сили.

Виходячи з припущення про те, що час дії сили відповідає часу розповсюдження пружних хвиль у зерні матеріалу при вільному ударі, запишемо

$$t = \frac{d}{u} \quad (5.10)$$

де  $u$  – швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі (швидкість звуку).

З урахуванням формул (5.9) і (5.10) визначимо силу, що діє при вільному ударі:

$$F = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v \cdot u}{6d} \quad (5.11)$$

Умова міцності зерна матеріалу має вигляд:

$$\frac{F}{S} \leq [G], \quad (5.12)$$

де  $[G]$  – допустима напруга руйнування даного матеріалу;  $S$  – площа поперечного перерізу зерна матеріалу,

$$S = \frac{\pi d^3}{4} \quad (5.13)$$

З урахуванням виразів (5.11) і (5.13) умова міцності зерна буде мати вигляд:

$$\frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v \cdot u}{\frac{6d}{\frac{\pi d^2}{4}}} \leq [G] \quad (5.14)$$

Після простих перетворень одержимо:

$$\frac{2}{3} \rho \cdot v \cdot u \leq [G] \quad (5.15)$$

Тоді умова міцності отримуємо у вигляді

$$v < \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u} \quad (5.16)$$

Звідси, очевидно, умова руйнування матеріалу при вільному прямому ударі в полі відцентрових сил

$$v \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u} \quad (5.17)$$

При визначенні руйнівної швидкості при непрямому ударі необхідно враховувати величину кута зустрічі зерна матеріалу з жорсткою перешкодою (відбійними плитами відцентрового дезінтегратора)

$$v \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u \cdot \text{Sin}\lambda} \quad (5.18)$$

Чим менше  $\text{Sin}\lambda$ , а значить і кут зустрічі, тим більше повинна бути гранична швидкість вильоту частинки. Наприклад для  $\lambda = 30^\circ$  вона зростає в два рази в порівнянні з граничною швидкістю при куті зустрічі  $\lambda = 90^\circ$ . Можна припустити, що розрахована за формулою (5.18)  $v_{\text{гран}}$  – гранична мінімальна швидкість, при якій зерно матеріалу починає руйнуватися – забезпечує його мінімальне руйнування і призводить до зменшення його поперечного розміру в 2 рази, (тобто ступінь скорочення шматка дорівнює 2). При необхідності зменшення крупності вихідного матеріалу в 3 рази швидкість повинна бути збільшена в 1,5 рази, для зменшення крупності в 4 рази, швидкість вильоту має бути збільшена 2 рази і т.д. Таким чином, для забезпечення необхідного ступеня скорочення матеріалу  $n$ , в отримані формули необхідно ввести коефіцієнти, рівний  $n/2$ . Тоді, необхідну швидкість вильоту матеріалу з робочого барабана відцентрового дезінтегратора для забезпечення необхідного ступеня скорочення можна розрахувати за такою формулою:

$$v = \frac{2}{3} \cdot \frac{[G]}{\rho u^4} \cdot \frac{n}{2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{G \cdot n}{\rho \cdot u} \quad (5.19)$$

Залежність дана для дезінтегратора, що забезпечує своєю конструкцією максимальний кут зустрічі  $\lambda = 90^\circ$  роздрібнюваного матеріалу з відбійними плитами.

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot n}{\rho \cdot u \cdot \text{Sin} \lambda} \quad (5.20)$$

(при куті  $\lambda$  зустрічі матеріалу з відбійними плитами).

Величина  $\rho u$ , що стоїть в знаменнику виведених формул, являє собою акустичну жорсткість матеріалу. Таким чином, виходячи з наведених аналітичних залежностей, акустична жорсткість є одним з критеріїв інтенсивності при руйнуванні матеріалу вільним ударом. Введемо для неї загальноприйняте позначення:

$$A = \rho \cdot u \quad (5.21)$$

і отримаємо остаточну формулу для визначення швидкості вильоту матеріалу з розгінного ротора дезінтегратора, що забезпечує необхідне руйнування матеріалу.

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot n}{A \cdot \text{Sin} \lambda} \quad (5.22)$$

Запропонований новий теоретичний підхід до процесу руйнування матеріалу вільним ударом в полі відцентрових сил рекомендується використовувати як для опису якісної картини руйнування матеріалу в відцентровому дезінтеграторі, так і для розрахунку швидкісних режимів роботи при проектуванні відцентрових дезінтеграторів.

## 5.2. Розрахунок продуктивності і потужності відцентрового дезінтегратора

Продуктивність розгінного ротора дезінтегратора слід розглядати як кількість матеріалу, захоплюваного розгінними ребрами дезінтегратора в одиницю часу з урахуванням висоти ребер і крупності матеріалу, що переробляється.

Для розрахунку продуктивності дезінтегратора по живленню отримана залежність:

$$Q = [2\pi R_0 - (B + K_\phi d)n] h v_p \gamma, \quad (5.23)$$

де:  $n, h, R_0$  – відповідно число, висота і початковий радіус розгінних елементів;  $d, K_\phi$  – розмір і коефіцієнт форми шматків вихідного матеріалу;  $\gamma$  – насипна густина матеріалу;  $v_p$  – радіальна швидкість матеріалу при вході на розгінні елементи.

Потужність, що витрачається на розгін частинок матеріалу до швидкості вильоту розраховується за формулою:

$$N_1 = Qf(R_1 - R_0) \left( g + \frac{\omega^2(R_1 - R_0) - 2gf}{\sqrt{1 + f^2} + f} \right) \quad (5.24)$$

де:  $R_1$  – радіус вильоту;  $f$  – коефіцієнт тертя дробленого матеріалу об розгінний елемент;  $g$  – прискорення вільного падіння.

При високій продуктивності, коли необхідно врахувати також дисипативні втрати потужності при розгоні матеріалу в шарі, можна використовувати залежність:

$$N_2 = \frac{QK_c K^2 \phi d^2 v^4 s(\sqrt{1 + f^2} + f_1)}{4 \cdot \omega^4 \left( R_1 - \frac{gf}{\omega^2} \right)^4 - \left( R_0 - \frac{gf}{\omega^2} \right)^4} \quad (5.25)$$

де:  $K_c$  – питомий коефіцієнт в'язких опорів;  $v_s$  – відносна швидкість при вильоті;  $f$  – коефіцієнт внутрішнього тертя в матеріалі;  $\omega$  – частота обертання розгінного ротора.

Потужність, що витрачається на вентиляцію:

$$N_3 = c\rho F(\omega \cdot \bar{R})^3 \quad (5.26)$$

де:  $c$  – коефіцієнт опору;  $\rho$  – густина повітря;  $F$  – площа ребра;  $\bar{R}$  – середній радіус обертання ребер.

Загальна споживана потужність:

$$N = \eta(N_1 + N_2 + N_3) \quad (5.27)$$

Розроблена математична модель і методика розрахунку робочого органу що базується на визначенні математичних параметрів матеріалу при розгоні по розгінних поверхнях ротора. Запропонований алгоритм розрахунку блок-схема алгоритму і програмне забезпечення математичної моделі, що реалізовується на ПЕОМ.

### 5.3. Демпфуюча підвіска розгінного ротора відцентрового дезінтегратора

Широке впровадження у виробництво способу руйнування матеріалу вільним ударом в полі відцентрових сил стримувалося низькою надійністю і працездатністю апаратів, що реалізують цей прогресивний спосіб.

Але створення надійних і працездатних апаратів для реалізації цього принципу вимагало вирішення двох складних науково-технічних проблем – розробки способів компенсації великих дисбалансів швидкообертового ротора відцентрового дезінтегратора і зведення до мінімуму катастрофічного абразивного зносу розгінного ротора. Основними причинами дисбалансу ротора є нерівномірний знос диска і розгінних ребер і завантаження матеріалу з широким діапазоном крупності частинок. При цьому на діаметрально протилежних частинах розгінного диска знаходяться шматки різних мас (що інколи відрізняються в десятки разів), що приводить до виникнення дисбалансу  $D$ :

$$D = (m_1 - m_2)(r_1 - r_2) \quad (5.28)$$

де:  $(m_1 - m_2)$  – різниця мас матеріалу кг;  $(r_1 - r_2)$  – різниця відстаней центрів цих мас від осі обертання, м.

Так як сили інерції рівні:

$$P = D \cdot \omega^2, \quad (5.29)$$

то при високих частотах обертання розгінного ротора (1000-5000 хв<sup>-1</sup>), виникають великі сили інерції, що приводять до виникнення коливань із значною амплітудою:

$$A = \frac{D}{m_p + m_1 + m_2} = \frac{P}{\omega^2 (m_p + m_1 + m_2)}, \quad \text{мм} \quad (5.30)$$

Ці коливання створювали великі динамічні навантаження на основні вузли відцентрового дезінтегратора що знижувало його працездатність і зрештою приводило до руйнування підшипників приводного валу і розгінного ротора апарату.

Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є зменшення до мінімальних значень зносового і технологічного дисбалансу і створення демпфуючої підвіски розгінного ротора, що дозволяє ефективно компенсувати шкідливі впливи дисбалансу і вібрації.

На підставі результатів аналітичних і експериментальних досліджень параметрів вібрації основних вузлів дезінтегратора розроблено декілька типів оригінальних і високоефективних систем підвісок розгінного ротора відцентрового дезінтегратора: гідростатична підвіска, магнітна подушка, підвіски на механічних і еластомерних демпфуючих елементах. Створені конструкції демпфуючих підвісок пройшли комплексні випробування в лабораторіях, напівпромислових і промислових умовах і підтвердили свою високу ефективність.

У даній роботі зроблена спроба побудови нелінійної моделі магнітної підвіски роторів відцентрового дезінтегратора з урахуванням експериментальних даних.

Схема магнітної підвіски представлена на рис. 5.2.

На цьому рисунку зліва показаний позитивний напрям швидкості  $v$  переміщення підвішеного тіла 1, суміщеного з постійним магнітом. На обмотку електромагніта 2 подається напруга  $U$ , струм, що протікає через обмотку, позначений через  $i$ . Відстань між підвішуваним тілом і електромагнітом позначено через  $S$ .

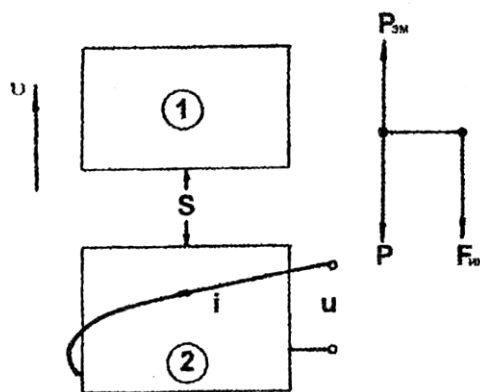


Рис. 5.2. Схема електромагнітного підвісу і схема сил, що діють на зважене тіло

Справа на рис. 5.2 наведена схема сил, що діють на підвішене тіло:  $P_{EM}$  – електрична сила створювана електромагнітом 2;  $P$  – вага зважуваного тіла;  $F_{ин}$  – сила інерції підвішеного тіла.

На експериментальній установці магнітної підвіски ротора дезінтегратора, виготовленого в інституті Механобрчормет (м. Кривий Ріг) отримані залежності сили підйому (відштовхування) від величини струму в обмотці (рис. 5.3) і питомої сили від величини відстані між електромагнітом і вивішуваним тілом (рис. 5.4).

З цих даних витікає, що величина підйомної сили прямо пропорційна квадрату сили струму в обмотці і зворотно пропорційна відстані між підвішуваним тілом і електромагнітом.

З урахуванням цього рівняння механічних сил матиме вигляд:

$$\sin g(i)\beta \frac{i}{S} - P - m \frac{dv}{dt} = 0, \quad (5.31)$$

де:  $m$  – маса;  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності.

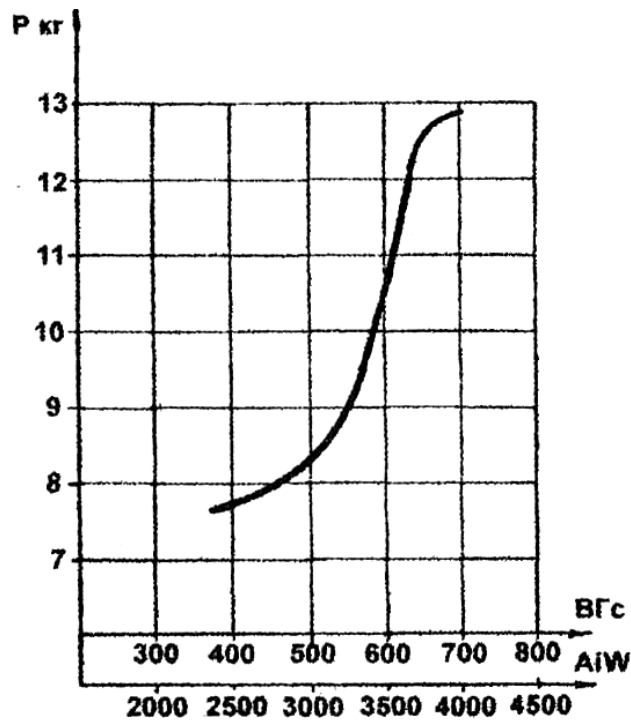


Рис. 5.3. Залежність сили відштовхування від магнітної індукції на поверхні полюса при постійному повітряному зазорі

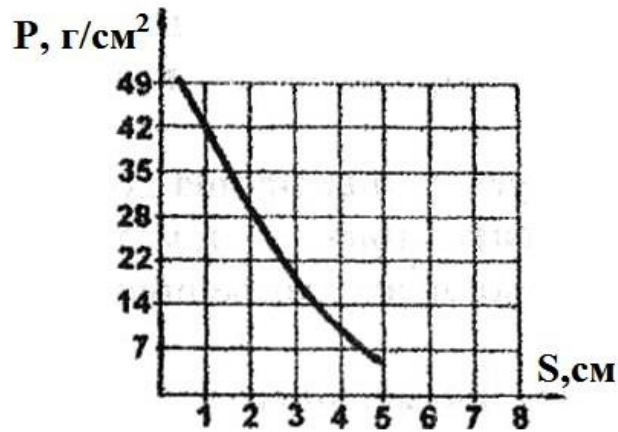


Рис. 5.4. Залежність питомої сили від повітряного зазору при  $iW = const$

Функція  $\sin g(i)$  враховує зміну знаку  $P_{EM}$  при зміні напрямку струму в обмотці.

У електричній частині системи діють наступні величини: е.р.с. самоіндукції, падіння напруги на активному опорі обмотки, прикладена

напруга і е.р.с, що наводиться в обмотці при русі зважуваного тіла. Остання прямо пропорційна струму в обмотці і зворотно пропорційна відстані  $S$ . Таким чином, рівняння електромагнітної частини системи має вигляд:

$$L \frac{di}{dt} = -Ri + U - C \frac{i}{S} v, \quad (5.32)$$

де:  $L$  – індуктивність обмотки;  $R$  – активний опір;  $C$  – коефіцієнт пропорційності.

Рівняння (6.31) приймає вигляд:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\beta}{m} \cdot \frac{i^2}{S} \cdot \sin g(i) - g, \quad (5.33)$$

де:  $g$  – прискорення вільного падіння.

Визначимо параметри одного електромагніту експериментальної установки виходячи з таких величин:

- індукція 600 Гс;
- площа перетину електромагніту  $f = 54 \text{ см}^2$ ;
- кількість витків обмотки  $W = 7000$ ;
- величина магніторушійної сили (м.р.с.)  $4000 \cdot i \cdot W$  ;
- опір обмотки постійному струму при робочій температурі  $R = 385 \text{ ом}$ ;
- струм в обмотці 0,571 А;
- сила тяги одного електромагніту 1,5 кг

Маса підвішеного тіла:

$$m = \frac{P}{g} = 0,153 \text{ кг.}$$

Всі параметри (окрім індуктивності) розраховуватимемо, приймаючи за основу не м.р.с, а величину струму.

Величину  $\beta$  визначимо з рівняння (5.33) без урахування знаку:

$$P_t = \beta \frac{i^2}{S} = 1,5 \text{ кг}$$

При розрахунковому струмі 0,571 А і відстані між магнітом і тілом 2 см:

$\beta = 9,2$ ;  $K_0 = 60,14$  індуктивність:

$$L = \frac{Bt}{iW} = 0,69 \text{ Гн.}$$

Електромагнітна постійна часу:



$$T_{EM} = \frac{L}{R} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ c. i } K_1 = \frac{R}{L} = 558$$

Коефіцієнт  $C$ , що визначає величину е.р.с.  $E$ , наведену підвішеним тілом, що переміщається, в обмотці визначимо з рівняння:

$$E = C \frac{i}{S} v = \frac{\Delta B [\Gamma c] t [cm^2]}{\Delta t [c]}.$$

На підставі отриманих даних визначаємо приріст індукції на 1 см за 1 сек. при середній відстані  $S=2$  см і струмі 0,571 А.

$$E = \frac{100 \cdot 54}{1c} = 5400 \text{ В}$$

Звідки:

$$C = E \frac{S}{i} v = 5400 \frac{2,1}{0,571} = 18900$$

$$K_2 = \frac{C}{L} = \frac{18900}{0,63} = 27391, B = \frac{1}{L} = 1,45$$

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (5.31), (5.32), (5.33) представимо у вигляді системи:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= v \\ \frac{ds}{dt} &= K_0 \frac{i^2}{S} \sin g(i) - g \end{aligned} \tag{5.34}$$

$$\frac{di}{dt} = -K_1 i - K_2 \frac{i}{S} v + bU$$

Відзначимо наявність особливої точки  $S=0$ . Поблизу цієї точки необхідне уточнення математичної моделі підвісу. Фізично це аварійний режим, коли може відбутися зіткнення зважуваного тіла і електромагніту. Для усунення такої можливості необхідно передбачити спеціальні заходи.

Для переходу від безперервної моделі до дискретної необхідно знайти зв'язок між сусідніми значеннями величин через заданий інтервал дискретності  $\theta$ . Для першого рівняння системи (5.34):

$$S[n+1] = e^{\alpha\theta} S[n] + e^{\alpha\theta} \int_0^0 e^{-\alpha\tau} v(r) dr$$

У випадку, якщо значення підінтегральної функції є постійним на інтервалі  $(\alpha, \theta)$ , отримаємо:

$$S[n+1] = S[n] + \nu[n] \cdot \theta$$

Діючи аналогічним чином відносно рівнянь системи (5.34), що залишилися, приходимо до системи різницевих рівнянь:

$$\begin{aligned} S[n+1] &= S[n] + \nu[n] \cdot \theta \\ \nu[n+1] &= \nu[n] + \left( H_0 \frac{i^2[n]}{S[n]} \sin g(i)[n] - g \right) \theta \\ i[n+1] &= H_1 i[n] - H_2 \frac{i[n]}{S[n]} \nu[n] + H_3 U[n], \end{aligned} \quad (5.35)$$

$$\text{де: } H_0 = K_0, \quad H_1 = e^{-K_1 \theta}, \quad H_2 = \frac{(1 - H_1) K_2}{K_1}, \quad H_3 = \frac{(1 - H_1) b}{K_1}.$$

Вказані параметри при  $\theta = 0,005$  для експериментальної установки склали:

$$H_0 = 60,14 \quad H_1 = 0,061 \quad H_2 = 46,1 \quad H_3 = 0,00244$$

Були вибрані наступні одиниці вимірювання:

$$\begin{aligned} [\theta] &= [c], \quad S = [cm], \quad [\nu] = \left[ \frac{cm}{c} \right], \\ [i] &= [A], \quad [U] = [B] \end{aligned}$$

Для практичного використання запропонованої математичної моделі при розрахунках відцентрових дезінтеграторів розроблений алгоритм розрахунку і програмне забезпечення моделі, що реалізовується на ЕОМ.

Таким чином розроблені наукові основи створення принципово нових апаратів відцентрового типу з демпфуючою підвіскою розгінного ротора для наддрібного дроблення мінеральної сировини і промислових відходів, які знаходять практичну реалізацію при вирішенні конкретних питань при створенні цих апаратів.

#### 5.4. Розробка нових конструкцій відцентрових дезінтеграторів

З використанням створеної наукової бази і нових технічних рішень по конструкції демпфуючих підвісок і робочих органів відцентрових дезінтеграторів, розроблена конструкція дезінтегратора з підвіскою робочого органу на магнітній подушці (рис. 5.5).

Розробки реалізовані в діючій моделі дезінтегратора, яка пройшла комплексні випробування в інституті Механобрчормет. Доведена можливість створення відцентрових дезінтеграторів на магнітній подушці і висока ефективність запропонованого технічного рішення. Розроблена технічна документація на відцентровий дезінтегратор на магнітній подушці, продуктивністю 10 т/год. Розроблені варіанти магнітних подушок з електромагнітними і магнітними полями.

Науково-технічні розробки по гідростатичній підвісці розгінного ротора реалізовані при створенні відцентрового дезінтегратора продуктивністю 5-10 т/год (ЦД-0,5; ЦД-10) для дроблення мінеральної сировини крупністю 100-0 мм до крупності 10-0 мм.

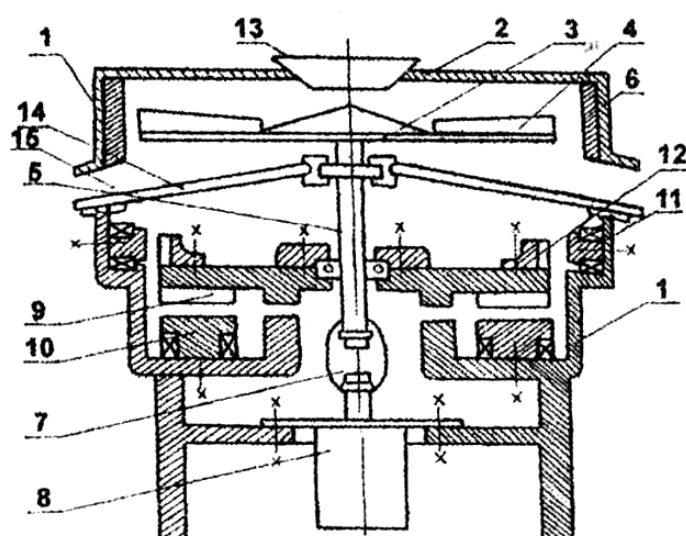


Рис. 5.5. Відцентровий дезінтегратор на магнітній подушці: 1 – корпус, 2- кришки, 3- ротор, 4 – розгінні ребра, 5- вал ротора, 6 – відбійні плити, 7 – муфта, 8 – двигун, 9-10 – постійні магніти і електромагніти магнітної подушки вертикального підйому, 11-12 – магніти, що створюють магнітну подушку горизонтальної стабілізації, 13 – завантаження, 14 – кожух, 15 – розвантаження.

Особливістю даної конструкції є гідростатичний вузол підвіски ротора (гідростатична подушка) завдяки чому осьові і радіальні сили, що виникають при роботі від нерівномірного завантаження ротора врівноважуються моментом імпульсу і процесіальним моментом ротора (ас. 1424189, а.с. 1683197).

У приводі дробарки застосований асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором. Регулювання частоти обертання проводиться за допомогою тиристорного перетворювача частоти.

Експериментальний зразок дезінтегратора виготовлений на механічному заводі інституту Механобрчормет і пройшов комплексні ви-

пробування на дослідній збагачувальній фабриці в циклі дрібного дроблення залізняку, керамічних магнітів і будівельних матеріалів (рис. 5.6.).

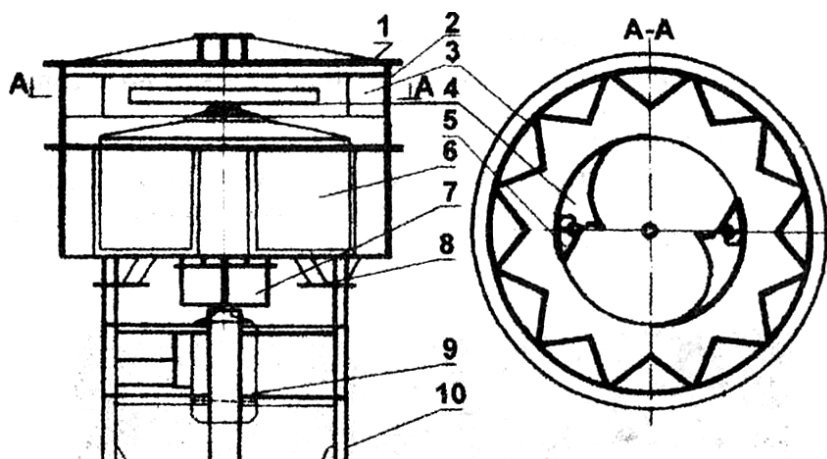


Рис. 5.6. Відцентровий дезінтегратор ЦД-10 з гідростатичною підвіскою розгінного ротора (а.с. 1683197): 1 – кришка, 2 – корпус, 3 – відбійні плити, 4 – ротор, 5 – розгінні ребра, 6 – поплавець, 7 – гідростатик, 8 – муфта, 9 – електродвигун, 10 – опорні колони.

### 5.5. Технологічні випробування нової конструкції дезінтегратора

В процесі випробувань дробленню підлягали магнетитові кварцити Південного родовища величиною 100-0 мм і 50-0 мм з коефіцієнтом міцності 16-20 за шкалою професора Н.М. Протодьяконова і керамічні феритові магнітні плити (ферит барію) розміром 84x64x16 мм.

Випробуваннями по дробленню магнетитових кварцитів встановлено, що при частоті обертання ротора  $1500 \text{ хв}^{-1}$  і крупності початкового живлення 100-0 мм крупність роздробленого продукту складає 91% класу мінус 10 мм і 77 % класу мінус 5 мм. Ступінь дроблення склав 10,0, середньозважена крупність 4,0 мм.

За величиною живлення 50,0 мм масова частка класу мінус 10 мм в роздробленому продукті складає 90%, класу мінус 5 мм – 73 %, а ступінь дроблення складає 4,0 при питомій витраті електроенергії 3,0-4,3 кВт·год/т.

Встановлені основні залежності показників роботи дробарки від конструктивних і технологічних параметрів.

При дробленні феритових магнітів в одну стадію масова частка класу мінус 10 мм в готовому продукті складає 90%, класу мінус 5 мм – 79%, середньозважена крупність 4,4 мм, при цьому ступінь дроблення рівний 12,0. При дробленні цього матеріалу в дві стадії ці показники

відповідно 96%, 92%, 2,4 мм і 2,0, при питомій витраті електроенергії 1.88 кВт·год./т.

Таким чином, встановлена висока технологічна ефективність параметрів відцентрової дробарки для дроблення магнетитових кварцитів різної крупності і плиток феритових магнітів.

Проведені комплексні дослідження по застосуванню відцентрових дезінтеграторів для дроблення різних будівельних матеріалів (клінкеру пісковика вапняку, піску) .

При дробленні клінкеру крупністю 100-0 мм крупність дробленого продукту склала 93-95% класу мінус 5 мм і 98-99% класу мінус 10 мм, при питомій витраті електроенергії 2,6 кВт·год./т.

Випробуваннями по дробленню пісковика встановлено, що при крупності початкового живлення 100-0 мм крупність дробленого продукту складає 80-90% класу мінус 5 мм і 91-97% класу мінус 10 мм.

При дробленні вапняку такої ж вихідної крупності дроблений продукт склав 100% класу мінус 5 мм, а при дробленні крейди – 99,2% класу мінус 5,0 і 88% класу мінус 0,5 мм.

Дроблення суміші вапняку і пісковика дозволяє отримати рівномірну суміш цих матеріалів величиною 98% класу мінус 5 мм і 99% класу мінус 10 мм. Високі показники отримані також при дробленні шлаку, кварцу, цементу та інших матеріалів.

Таким чином, дезінтегратори відцентрового типу рекомендуються до застосування в будівельній індустрії як високоефективні апарати для дроблення будівельних матеріалів до крупності 5-10 мм, а при спеціальному виконанні і до меншої крупності (на вимогу замовника).

У процесі тривалих випробувань відцентрового дезінтегратора при різних режимах роботи встановлена висока надійність демпфуючої підвіски розгінного ротора що забезпечує ефективну компенсацію конструктивних і технологічних дисбалансів ротора.

Виходячи з позитивних результатів випробувань розробленої конструкції дезінтеграторів, він рекомендований в промислове виробництво і в 90-х роках механічний завод інституту Механобрчормет випускав дезінтегратори ЦД-10 на замовлення підприємств будівельної та інших галузей промисловості. Зокрема, вони успішно впроваджені на багатьох підприємствах промисловості будівельних матеріалів .

## 5.6. Відцентровий дезінтегратор ЦД-50 продуктивністю 50-100 т/год

### 5.6.1 Особливості конструкції дезінтегратора

З використанням наукової бази, що ґрунтується на результатах аналітичних і експериментальних досліджень, розроблена конструкція відцентрового дезінтегратора продуктивністю 50-100 т/год. (ЦД-50) для застосування в стадіях дрібного дроблення магнетитових руд і іншої мінеральної сировини.

У його конструкції реалізований принцип демпфуючих елементів і упродовжений ротор напівзакритого типу з швидкозмінними самофутеруючими розгінними ребрами криволінійної форми (а.с. 1673212, а.с. 1683193).

Окрім цього застосований гідропривод розгінного ротора що дозволило проводити плавне регулювання частоти обертання ротора в широкому діапазоні (100-1000 хв<sup>-1</sup>) Загальний вид дезінтегратора показаний на рис. 5.7.

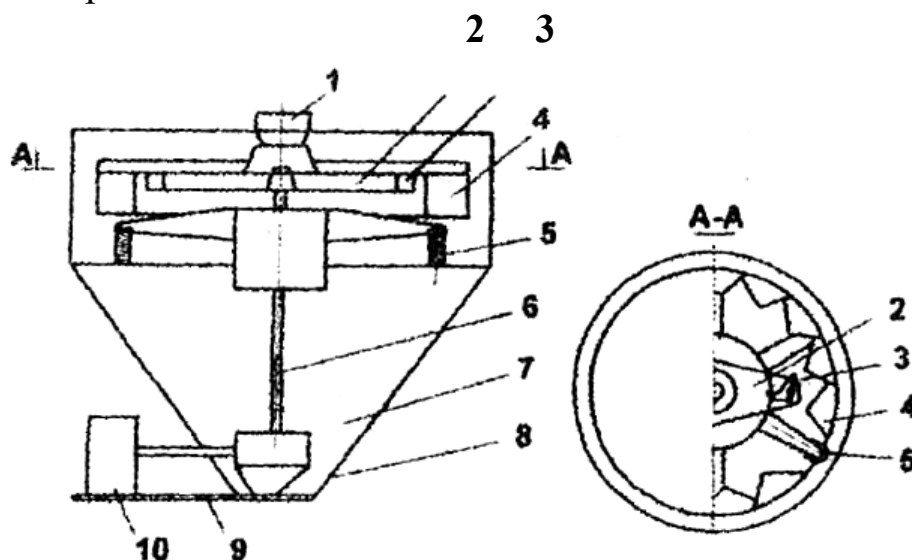


Рис. 5.7. Експериментальний зразок відцентрового дезінтегратора ЦД-50:1 – завантажувальна точка, 2 – ротор, 3 – розгінні ребра, 4 – відбійні плити, 5 – демпфер, 6 – карданний вал, 7 – розвантажувальний лоток, 8 – гідростатична муфта, 9 – карданний вал, 10 – електродвигун.

Основні технічні дані: продуктивність 50-100 т/год, крупність початкового живлення 100-0 мм, діаметр вильоту розгінних ребер 2200 мм, частота обертання ротора до 1000 хв<sup>-1</sup>, швидкість вильоту матеріалу до 135 м/с, потужність привода 125 кВт, маса 15 т.

Дезінтегратор виготовлений на механічному заводі інституту Механобрчормет.

## 5.6.2. Дослідження технологічних параметрів роботи дезінтегратора

Перший етап випробувань і досліджень роботи дезінтегратора проведений на дослідній фабриці інституту Механобрчормет. Дробленню піддавалися залістисті кварцити Південного родовища величиною 100-0 мм (при цьому 53 % кл. плюс 50), міцністю 14-18 од. за шкалою проф. М.Протодьяконова.

Випробуваннями встановлено, що при проектній частоті обертання ротора  $1000 \text{ хв}^{-1}$ , масова частка класів мінус 1мм, 5 мм і 10 мм склала 40%, 86% і 96% відповідно. Ступінь дроблення при цьому склав 18, а середньозважена крупність дробленого продукту 3,1 мм. Встановлено, що технологічні параметри роботи дезінтегратора визначаються частотою обертання розгінного ротора і швидкістю вильоту частинок з нього.

Дослідженнями параметрів механічних коливань вузла підвіски розгінного ротора дробарки, встановлено, що величина віброзміщень корпуса дробарки в робочому режимі склала 127-130 мкм. Величина поперечних віброзміщень системи підвіски розгінного ротора склала 130-140 мкм. У пусковому режимі амплітуда коливань досягає значень 480-500 мкм, а в режимі механічного резонансу – 600-810 мкм.

Таким чином, конструкція відцентрового дезінтегратора з механічною демпфуючою підвіскою розгінного ротора забезпечує отримання високих технологічних показників, ефективну компенсацію дисбалансу розгінного ротора і відповідає вимогам надійності і екологічної безпеки.

Другий етап випробувань дезінтегратора ЦД-50 був проведений в промислових умовах дробильної фабрики (ДФ-1) ПівніГЗК. Дезінтегратор був встановлений в технологічному ланцюжку ДФ-1 після дробарки КСД-22 00 на настановному місці дробарки КМДТ.

Дробленню піддавалися залістисті кварцити Анновського родовища величиною 100-0 мм, міцністю 12-16 од. за шкалою проф. Протодьяконова. Проводилися детальні дослідження технологічних, електричних і надійних параметрів дезінтегратора при різних режимах його роботи. В процесі випробувань досягнута продуктивність по початковому живленню 60-85 т/год (при проектній 50 т/год).

Встановлено, що при частоті обертання розгінного ротора  $1000 \text{ хв}^{-1}$  масова частка класів мінус 1мм, 5 мм, і 10 мм в дробленому продукті склала 40%, 75%, і 91% відповідно. Ступінь скорочення матеріалу при цьому склав 6-7, а середньозважена крупність 3,5-4,0 мм. Досліджувалася і встановлена залежність технологічних показників дроблення магнетитових кварцитів від режиму роботи дезінтегратора (рис. 5.8).

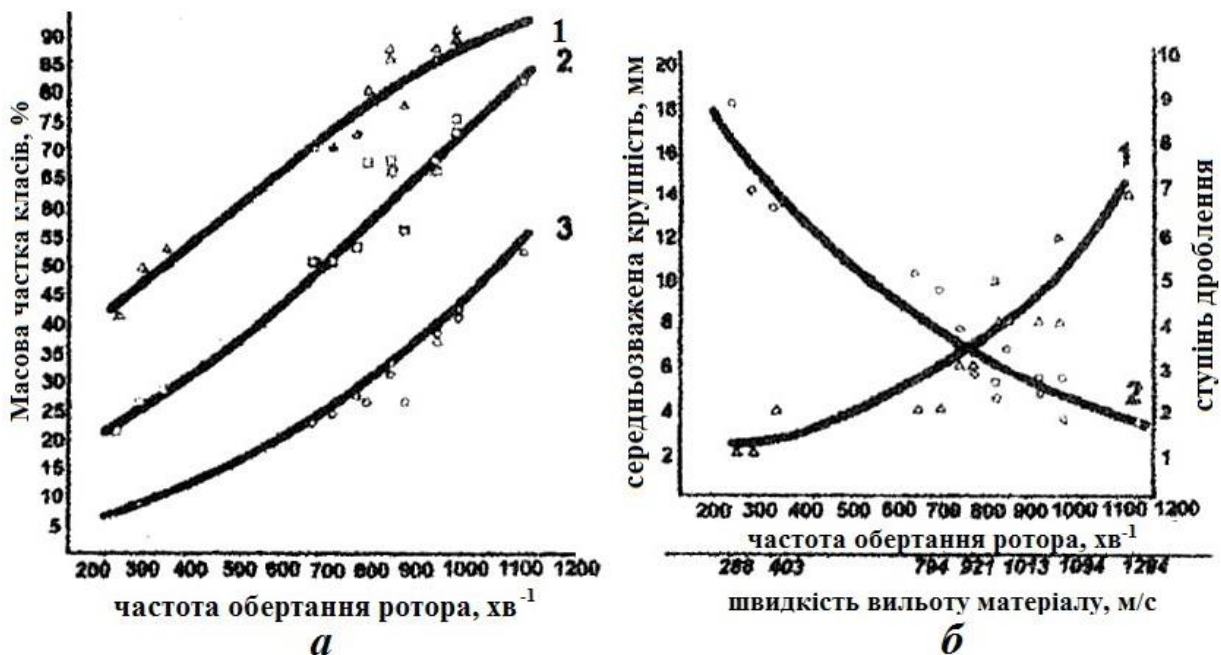


Рис. 5.8. Залежність технологічних показників від режиму роботи дезінтегратора: а – масової частки готових класів (графіки 1,2,3 – класи 10 мм, 5 мм і 1 мм відповідно); б – ступеня дроблення (1) і середньозваженої крупності (2).

Як впливає з приведених графіків, із збільшенням частоти обертання розгінного ротора і швидкості вильоту матеріалу з нього збільшується ступінь дроблення і масова частка класів мінус 1 мм, 5 мм і 10 мм в продуктах дроблення і тому зміною цих параметрів можна регулювати крупність готового продукту. Це послужило основою створення способів автоматичного регулювання роботи дезінтеграторів.

### 5.6.3. Енергетичні параметри роботи дезінтегратора

Детально досліджувалися і встановлені закономірності енергоспоживання відцентрових дезінтеграторів і залежності їх енергетичних характеристик від режимів роботи апарату (рис. 5.9).

Як впливає зі встановлених залежностей максимальна потужність холостого ходу склала 40 кВт, під навантаженням – 100 кВт, питома витрата електроенергії – 1,3-1,4 кВт год./т. Встановлено, що холостий хід складає 40% потужності під навантаженням, що пояснюється великими втратами на вентиляційний ефект (близько 30%), а також на гідропривод.

Детально досліджені і встановлені розподіли і втрати потужності у всіх ланках приводного ланцюга відцентрового дезінтегратора, побудовані відповідні залежності.

Результати цих досліджень послужили науковою основою для створення конструкцій дезінтеграторів з мінімізацією по критерію питомої витрати електроенергії. Розроблені і упроваджені оригінальні



конструкції розгінних роторів дезінтеграторів напівзакритого типу з колосниковими розгінними ребрами, що дозволяють в півтора рази зменшити «вентиляційний ефект» дезінтегратора і, відповідно питомі витрати електроенергії.

Дезінтегратор з такою конструкцією розгінного ротора успішно упроваджений у виробництво.

Випробуваннями в промислових умовах доведена достатня надійність демпфуючої підвіски ротора – відмов дезінтегратора по її провіні не зафіксовано.

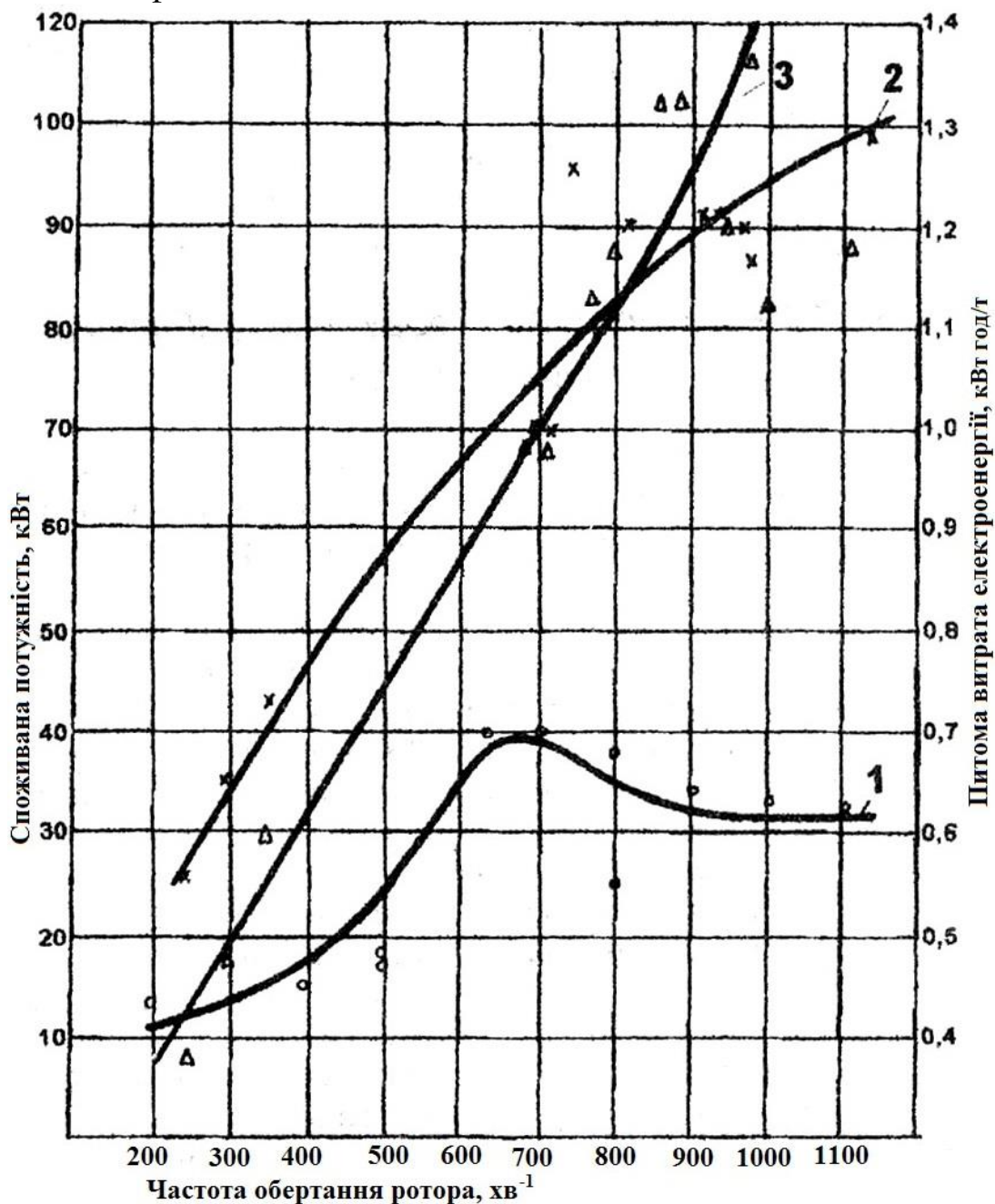


Рис. 5.9. Залежність енергетичних параметрів від режимів роботи дезінтегратора; 1 – потужність, споживана приводом при холостому ході; 2 – потужність, споживана під навантаженням; 3 – питома витрата електроенергії.

Встановлено, що розроблена конструкція розгінного ротора напівза-критого типу з самофутеруючими розгінними ребрами є працездатною і надійною і володіє високою ремонтпридатністю. Дослідженнями закономірностей зносу встановлено, що питомий знос розгінних ребер склав – 7,5 г/т, термін служби ротора – 360 год., час заміни ребер – 2 год.

### 5.7. Вплив способу дроблення на показники збагачувального переділу

Дроблення магнетитових руд і іншої мінеральної сировини у відцентрових дезінтеграторах забезпечує більш селективне руйнування матеріалу що істотно впливає на подальші процеси збагачення.

Для визначення впливу нового способу дроблення в полі відцентрових сил на подальший збагачувальний переділ були проведені порівняльні дослідження на подрібнюваність і збагачуваність продуктів дроблення в дробарці ЦД-50 і КМДТ-2200. Встановлено, що при однаковій величині початкового живлення (-100-0 мм) в продуктах дроблення ЦД-50 масові частки класу мінус 10; 5; 1 і 0,074 мм на 30,3%; 42,4%; 31,8% і 13,4% відповідно більше, ніж в продуктах дроблення КМДТ-2200. Подрібнюваність матеріалу після ЦД-50 вище в порівнянні на 10%, а збагачуваність на 3,3%, ніж після КМДТ-2200 за рахунок кращого розкриття матеріалів (рис. 5.10 а і б відповідно).

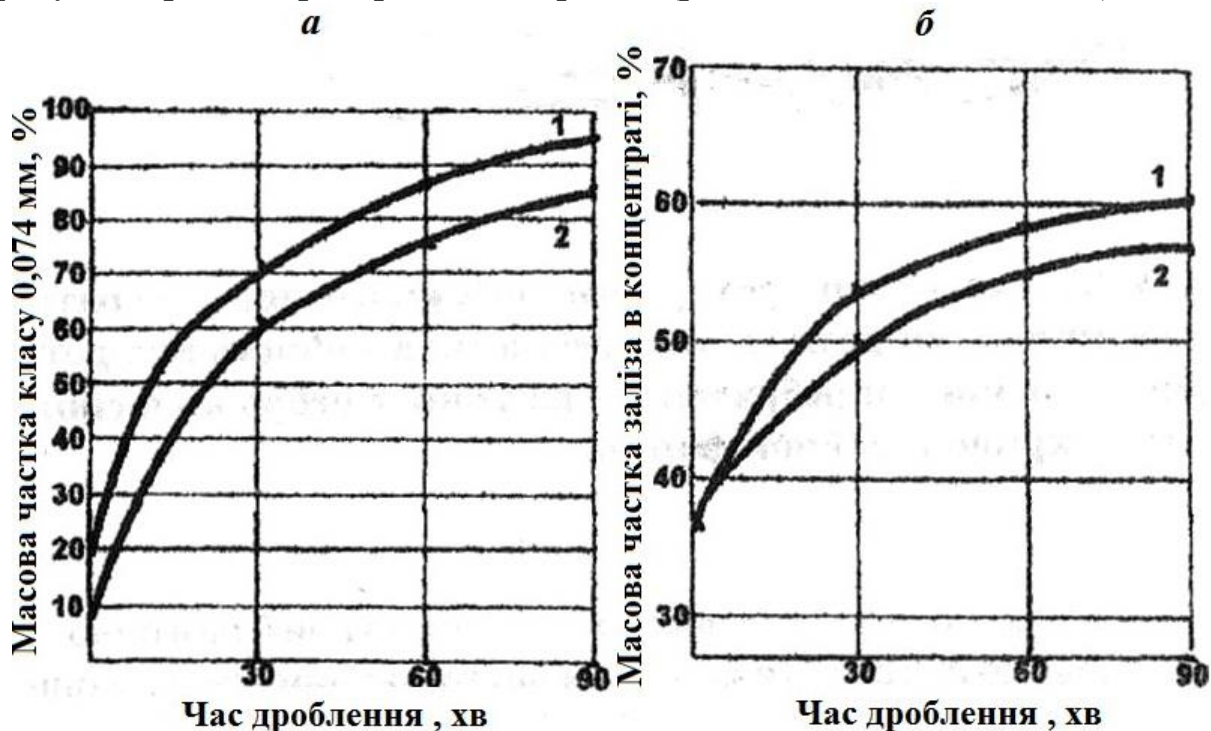


Рис. 5.10. Вплив способу дроблення на технологічні показники збагачувального переділу: 1 – дроблення в дезінтеграторі відцентрового типу; 2 – дроблення в конусній дробарці КМДТ-2200 (а – масова частка готового класу в продуктах подрібнення, б – масова частка заліза в концентраті).

Встановлена можливість виділення з продуктів дроблення ЦД-50 сухих магнітних хвостів з масовою часткою заліза загального 12,9%.

Таким чином, розроблена конструкція відцентрового дезінтегратора довела високу ефективність при застосуванні її в стадіях дрібного дроблення. Економічний ефект від впровадження дробарок відцентрового типу по розрахунках інституту Механобрчормет складає 177,6 тис. крб. в рік на одну дробарку .

### 5.8. Науково-технічні основи створення нових конструкцій відцентрових дезінтеграторів

Проведені аналітичні і експериментальні дослідження можуть служити науковою базою для розробки нових конструкцій відцентрових дезінтеграторів.

Результати детальних досліджень відцентрових дезінтеграторів в напівпромислових і промислових умовах систематизовані і оброблені на ЕОМ за спеціальною програмою, що дозволило отримати систему рівнянь регресії, що відображає взаємозв'язок і залежність технологічних показників роботи дезінтеграторів від їх конструктивних і режимних параметрів.

Отримані наступні кореляційні залежності:

$$Q = 91,70461 - 1,33204v + 0,26607P + 0,0106vP \quad (5.36)$$

$$P = -66,11072 + 0,61645Q + 0,00342v + 1,2696\beta_{-10,0} \quad (5.37)$$

$$d_c = 17,40926 + 0,5958Q - 0,093v - 0,07411P_c \quad (5.38)$$

$$\beta_{-1,0} = -10,92132 + 0,0934Q + 0,27621v + 2,63806 \quad (5.39)$$

$$\beta_{-5,0} = 17,76811 + 0,17184Q + 0,48333v + 2,5633i \quad (5.40)$$

$$\beta_{-10,0} = 43,04408 + 0,17182Q + 0,47515v + 0,92948 \quad (5.41)$$

$$i = -2,12162 + 0,01992Q + 0,04784v \quad (5.42)$$

$$N_{\text{пит}} = 0,10176 - 0,00463Q + 0,01206v + 0,32523i - 0,00291v \quad (5.43)$$

де:  $Q$  – продуктивність дезінтегратора, т/год.;  $v$  – швидкість вильоту частинок з ротора м/с;  $P$  – споживана потужність, кВт/год.;  $N_{\text{пит}}$  – питома витрата електроенергії, кВт·год./т.;  $i$  – ступінь дроблення,  $\beta$  – масова частка класу.

З використанням результатів експериментальних досліджень і встановлених залежностей побудовані номограми, що дозволяють оперативно визначати необхідні параметри дезінтегратора за заданих початкових умов (рис. 5.11, 5.12).

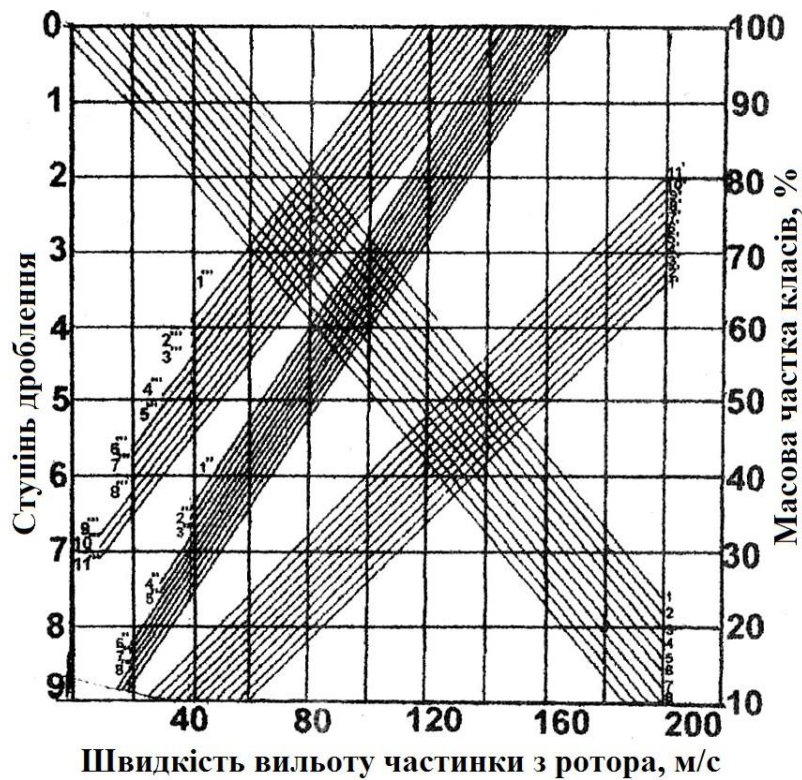


Рис. 5.11. Номограма для визначення конструктивних і технологічних параметрів дезінтегратора; 1'-11 – ступінь дроблення, 1'-11" – масова частка класу –1,0 мм, 1"-11" – масова частка класу –5,0 мм, 1'''-11''' – масова частка класу –10,0 мм при продуктивності 1-110 т/год відповідно.

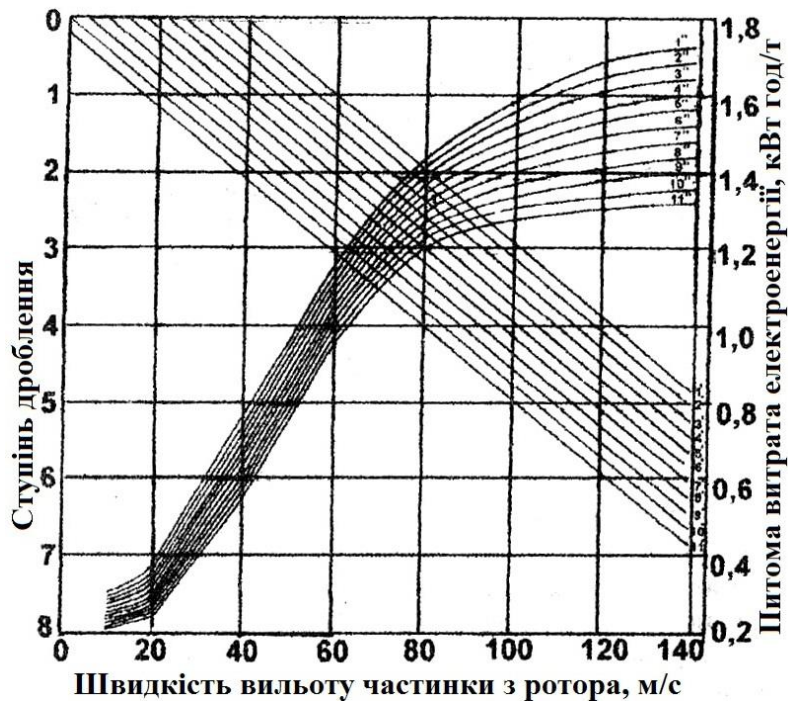


Рис. 5.12. Номограма для визначення технологічних і електричних параметрів дезінтегратора: 1'-11' – ступінь дроблення, 1"-П" – питома витрата електроенергії при продуктивності 1-110 т/год відповідно

Водночас, визначення технологічних і електричних параметрів дезінтегратора можна здійснювати оперативно на комп'ютері користуючись рівняннями 5.36-5.43.

Створена наукова база дозволила підготувати початкові дані і розробити технічні завдання на дослідно-промислові зразки відцентрових дезінтеграторів продуктивністю 100 т/год і 300 т/год, а також технічне завдання на типорозмірний ряд відцентрових дезінтеграторів продуктивністю 1.5; 10; 50; 100; і 200 т/год. (ТЗ шифр 1.1-535-87001 ГТЗ, 11.К-21091-ТЗ).

Розроблені технічні проекти дезінтеграторів ЦД-100 і ЦД-300 для застосування їх в стадіях дрібного дроблення залізняку і іншої мінеральної сировини (рис. 5.13).

Виготовлені дослідно-промислові зразки дезінтеграторів ЦД-100 за замовленням ЗЖРК, планується організація їх промислового виробництва. Дезінтегратори ЦД-100 встановлені в новій технологічній лінії по переробці залізородного концентрату (Запорізький залізородний комбінат, м. Дніпрорудний).

Для потреб будівельної промисловості розроблена спеціальна конструкція малогабаритного дезінтегратора ЦД-1 продуктивністю 1-2 т/год (рис. 9.14).

Дезінтегратор ЦД-1 серійного виготовлення механічного заводу інституту Механобрчормет експлуатується на підприємствах України, Уралу, Кольського півострова і використовується для переробки будівельних матеріалів, кварцу, апатиту цеоліту, піролізату і інших матеріалів.

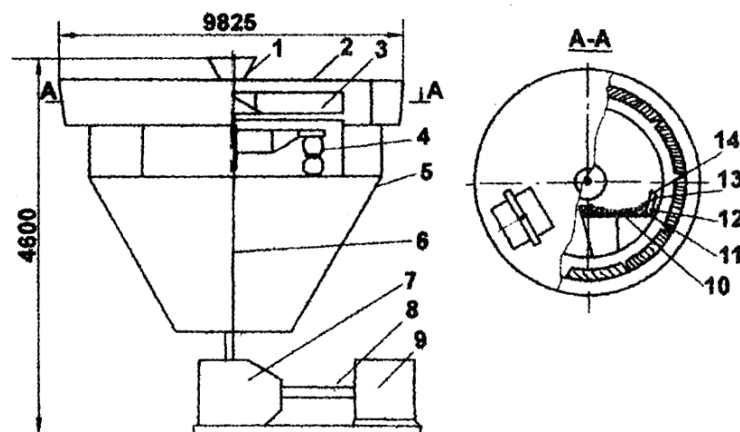


Рис. 5.13. Відцентровий дезінтегратор ЦД-300 продуктивністю 300 т/год: 1 – завантаження, 2 – кришка, 3 – ротор, 4 – еластомерні демпфери, 5 – корпус, 6 – вал, 7 – редуктор, 8 – кардан, 9 – електродвигун, 10 – розгінне ребро, 11 – самофутеровка, 12 – плита, 13 – швидкознімна вставка, 14 – зносостійка вставка.

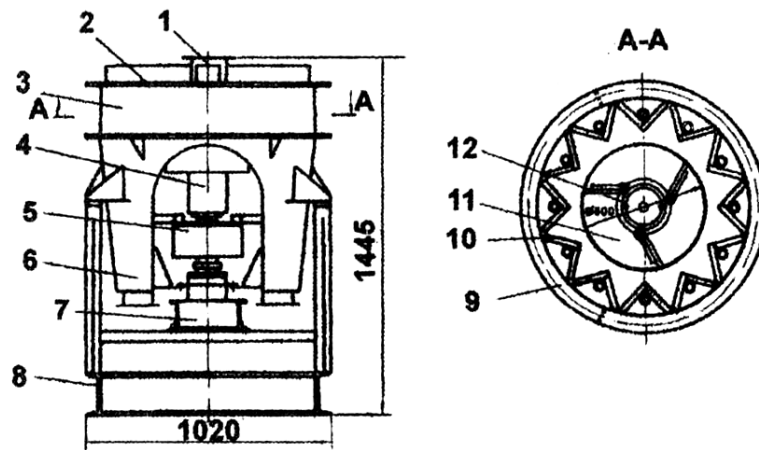


Рис. 5.14. Відцентровий дезінтегратор ЦД-1:

1 – завантажувальний лоток, 2 – кришка, 3 – корпус, 4 – вал ротора, 5 – муфта, 6 – розвантажувальний лоток, 7 – клинопасова передача, 8 – рама, 9 – фланець, 10 – відбійні плити, 11 – ротор, 12 – розгінні ребра ротора.

Таким чином, результати проведених аналітичних і експериментальних досліджень послужили науково-технічною основою для створення ряду типорозмірів відцентрових дезінтеграторів для різних галузей промисловості. Вони можуть бути використані як наукова база для розробки і вдосконалення конструкцій цього перспективного виду устаткування.

На механічному заводі інституту Механобрчормет було організовано серійне виробництво дезінтеграторів ЦД-1 і ЦД-10 для різних галузей народного господарства.

### 5.9. Основні результати, досягнуті при створенні відцентрових дезінтеграторів

1. Розроблені науково-теоретичні основи роботи, математичні моделі і методика розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів відцентрових дезінтеграторів із швидкістю розгону подрібнюваного матеріалу на робочому органі до 150 м/с; науково обґрунтована і експериментально підтверджена ефективність застосування демпфуючих підвісок розгінного ротора – гідростатичної, механічної і магнітної подушки, що забезпечують ефективну компенсацію дисбалансу ротора і що не має аналогів в СНД і за кордоном.

2. Створені експериментальні зразки відцентрових дезінтеграторів на магнітній подушці, дослідження яких підтвердили правомірність

теоретичних передумов і можливість реалізації розробленого технічного рішення при розробці деяких типоразмерів дезінтеграторів.

Таблиця 4.4

Технічні дані типорозмірного ряду відцентрових дезінтеграторів:

| № з/п | Тип ЦД                                      | ЦД-1  | ЦД-10       | ЦД-50       | ЦД-100      | ЦД-300            |
|-------|---|---|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 1.    | Призначення                                 | Для дроблення руд чорних та кольорових металів, будівельних матеріалів і гірничохімічної сировини |             |             |             |                   |
| 2.    | Крупність вихідного живлення, мм            | 25-30   | 100-0       | 100-0       | 100-0       | 150-0             |
| 3.    | Крупність дроб. матеріалу, мм               | 5-0, 10-0   | 10-0        | 5-10        | 5-10        | 10(15)-0          |
| 4.    | Продуктивність т/год                        | 1,0   | 10,0        | 50(100)     | 100         | 300               |
| 5.    | Діаметр ротора, мм                          | 500   | 1400        | 2000        | 1820        | 2240              |
| 6.    | Кількість ребер, шт                         | 3   | 2           | 2(3)        | 3           | 3                 |
| 7.    | Електродвигун:<br>Тип                       | 2ПБ200<br>асинхронний   | асинхронний | асинхронний | асинхронний | з фазовим ротором |
|       | напруга, В                                  | 220   | 380         | 380         | 380         | 6000              |
|       | потужність, кВт                             | 15  | 40-50       | 125         | 2x75=150    | 630               |
|       | частота обертання ротора, хв <sup>-1</sup>  | 2360  | 1500        | 1000        | 1000        | 950               |
| 8.    | Клинопасова передача передаткове відношення | 1,06  | 1,0         | 1,0         | 1,0         | 1,0 – 1,1         |
| 9.    | Габаритні розміри:                          |   |             |             |             |                   |
|       | висота, мм                                  | 1445  | 3215        | 4213        | 2500        | 4600              |
|       | довжина, мм                                 | 1752  | 2600        | 4240        | 4700        | 5830              |
|       | ширина, мм                                  | 1020  | 2600        | 4159        | 3000        | 3900              |
| 10.   | Маса загальна, кг                           | 1500  | 6780        | 15759       | 30000       | 38000             |

3. Розроблена і реалізована в промисловість оригінальна конструкція відцентрових дезінтеграторів з гідростатичною підвіскою розгінного ротора продуктивністю 10 т/год (ЦД-10), тривала експлуатація яких в промислових умовах підтвердила високу надійність і працездатність створеної конструкції гідростатичної підвіски ротора (а.с. 1683197).

Випробуваннями по дробленню різних матеріалів встановлена висока ефективність застосування дезінтеграторів ЦД-10 для дроблення руди, будівельних матеріалів і промислових відходів початковою величиною 100-0 мм до величини 5-10 мм; організовано промислове виробництво дезінтеграторів ЦД-10 і їх впровадження в промисловість; ліцензія на виробництво ЦД-10 продана Росії.

4. Створена конструкція дезінтеграторів на механічній демпфуючій підвісці продуктивністю 50 т/год (ЦД-50) з самофутеруючими розгінними ребрами і гідравлічним приводом (а.с. 1694210, а.с. 1673212).

Випробуваннями в промислових умовах встановлено, що при дробленні магнетитових кварцитів крупністю 100-0 мм крупність роздробленого продукту складала 5-10 мм, ступінь скорочення 7-10, середньозважена крупність 3-5 мм, питома витрата електроенергії 1,2-1,6 кВт·год./т; встановлено поліпшення подрібнюваності і збагачуваності промпродуктів, підготовлених у відцентровому дезінтеграторі в порівнянні з конусною дробаркою; дезінтегратор ЦД-50 рекомендований до застосування як дробарка дрібного дроблення в 3-4-ій стадіях дроблення.

5. Розроблені початкові дані, технічне завдання і технічні рішення по конструкції основних вузлів і ескізний проект дослідного зразка відцентрової дробарки продуктивністю 300 т/год (ЦД-300) для дроблення магнетитових кварцитів величиною 100-0 мм до величини 10-0 мм в стадіях дрібного дроблення руди; виготовлено дві дробарки ЦД-100 за замовленням ЗЖРК.

6. Розроблені науково технічні основи для створення типорозмірного ряду промислових дезінтеграторів для дроблення різної мінеральної сировини і промислових відходів продуктивністю 10 т/год, 50 т/год, 100 т/год, організовано промислове виробництво дезінтеграторів ЦД-1, ЦД-10, ЦД-100.

7. Відцентрова дробарка ЦД-300 закладена в новий проект збагачення окислених руд Криворізького гірничо-збагачувального комбінату окислених руд (КрГЗКу), розроблений Механобрчорметом, що дозволяє застосувати одностадійну схему подрібнення, скоротити технологічний ланцюжок, зменшити кількість устаткування і підвищити техніко-економічні показники збагачення окислених руд



(кресл. 22400-2220-ТХ), а також в проект підземного ГЗКу (кресл. 2824951Х) і рекомендується як перспективне устаткування для проектування гірничо-збагачувальних комбінатів.

8. Для широкого впровадження відцентрових дезінтеграторів в гірничорудну і будівельну промисловість України необхідно продовжити науково-дослідні і конструкторські роботи в напрямі підвищенні надійності і зносостійкості робочих органів, і організації промислового виробництва апаратів великої одиничної потужності.

## 6. ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ КОРИСНИХ КОПАЛИН ДО ЗБАГАЧЕННЯ

### 6.1 Технологія дроблення

#### 6.1.1 Схеми дроблення при підготовці руд до подрібнення

Операції дроблення на збагачувальних фабриках застосовуються: при крупному вкрапленні мінералів – для підготовки корисних копалин до операцій збагачення, при дрібному і тонкому вкрапленні – для підготовки до операцій подрібнення. На дробильно-сортувальних фабриках операції дроблення мають самостійне значення.

Операція дроблення й операції попереднього та перевірного грохочення складають *стадію дроблення*, а сукупність стадій дроблення – *схему дроблення*. Залежно від наявності і призначення операцій грохочення в схемах дроблення розрізняють п'ять різновидів стадій (одностадійних схем) дроблення (рис. 6.1).

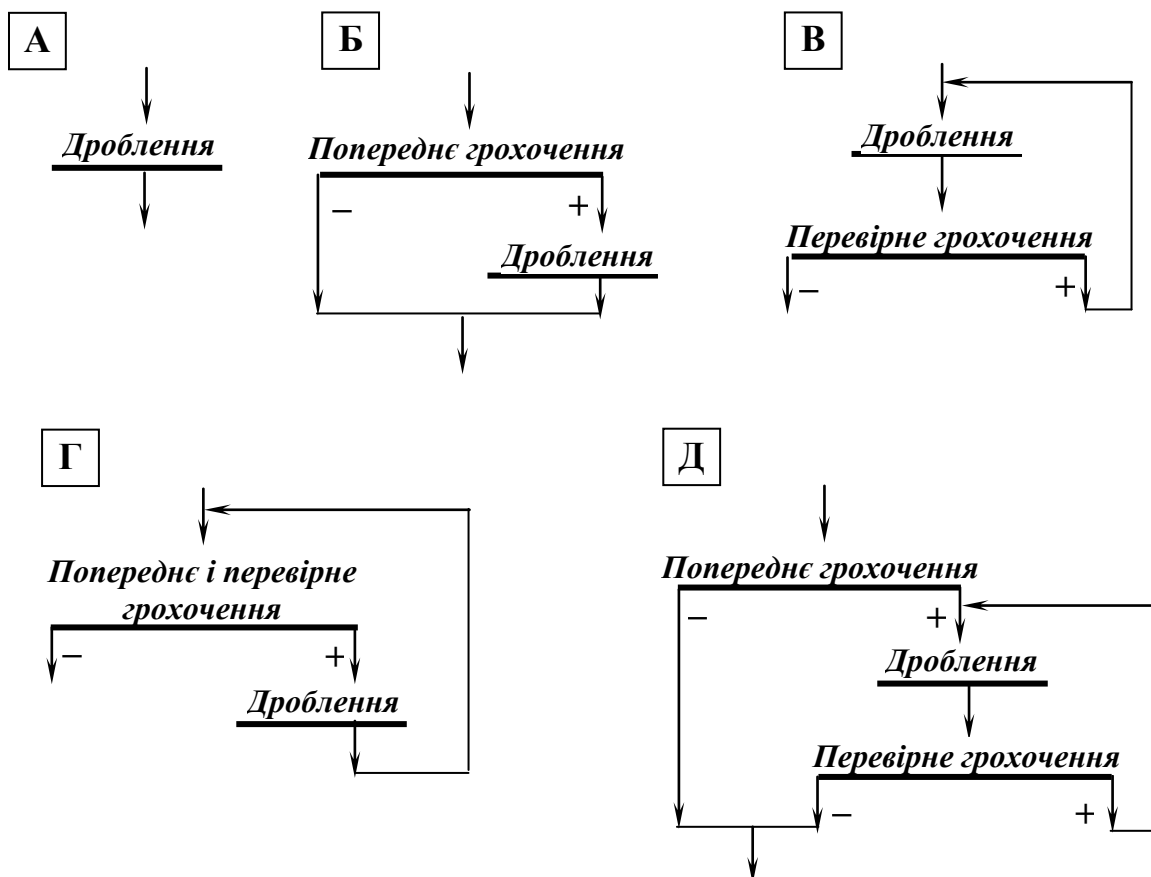


Рис. 6.1 – Різновиди стадій дроблення.

Різновиди стадій, які використовуються в схемах дроблення такі: стадія *А* – відкрита; стадія *Б* – відкрита з попереднім грохоченням; ста-

дія *B* – замкнута з перевірним (контрольним) грохоченням; стадія *Г* – замкнута з поєднанням попереднього і перевірного грохочення; стадія *Д* – замкнута з роздільними попереднім і перевірним грохоченням.

Схема підготовчих операцій визначається виходячи з речовинного складу і фізичних властивостей корисної копалини, а також крупності матеріалу, прийнятої в схемі збагачення.

При збагаченні корисних копалин, у яких корисні і породні мінерали розкриваються при крупному дробленні, схеми підготовчих операцій можуть обмежитися крупним (середнім) дробленням і грохоченням.

При наявності в корисних копалинах крупновкраплених корисних мінералів або агрегатів мінералів з контрастними фізико-хімічними властивостями, що використовується при їх розділенні, схема підготовчих операцій може розширятися з включенням операції попередньої концентрації, що дозволяє виділити частину збагаченого матеріалу, відвальних відходів, або розділити корисну копалину на продукти, що надалі переробляються за різними схемами.

На збагачувальних фабриках, що переробляють дрібно- і тонковкраплені руди кольорових, рідкісних і чорних металів, схеми рудопідготовки включають операції дроблення і подрібнення з операціями грохочення і класифікації.

При виборі раціональної схеми дроблення необхідно вирішити два основних питання:

- про число стадій дроблення,
- про необхідність операцій грохочення в окремих стадіях.

*Число стадій дроблення* визначається початковою і кінцевою крупностями матеріалу, що дробиться. Максимальна крупність грудок у вихідному матеріалі, що надходить на дроблення, залежить від продуктивності гірничодобувного підприємства і системи гірничих робіт. Найбільш крупна руда (до 1200 мм) одержується при відкритих роботах і великій продуктивності кар'єру, найбільш дрібна (до 300 мм) – при підземних гірничих роботах і малій продуктивності шахти. Оптимальна крупність дробленого продукту, який подається в стержневі млини повинна складати 15–25 мм, у кульові – 10–15 мм. Критерієм, який враховує співвідношення між максимальними розмірами зерен матеріалу, що подається на дроблення, і дробленого, служить *загальний ступінь дроблення*.

$$S_{\text{заг}} = D_{\text{вих}} / d_{\text{др}}, \quad (6.1)$$

де  $D_{\text{вих}}$  – розмір максимальної грудки матеріалу, що подається на дроблення, мм;  $d_{\text{др}}$  – розмір максимальної грудки дробленого матеріалу, мм.

На великих збагачувальних фабриках загальний ступінь дроблення може досягати 100 і більше. Одержати такий ступінь дроблення за один

прийом неможливо, він коливається звичайно в межах 4 – 6. Тому найчастіше зустрічаються схеми дроблення, що складаються з трьох стадій – крупного, середнього і дрібного дроблення. Число стадій дроблення вибирають виходячи з загального ступеня дроблення, що дорівнює добутку ступенів дроблення в окремих стадіях.

$$S_{заг} = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n, \quad (6.2)$$

де  $S_i$  – ступені дроблення в окремих стадіях.

З огляду на сказане, **перше правило вибору схеми дроблення** говорить: **число стадій дроблення при підготовці руд до подрібнення повинно дорівнювати двом або трьом.**

Виняток з цього правила може бути зроблено:

- у випадку використання інерційних, молоткових і роторних дробарок, що мають високі ступені дроблення (20 – 40);
- для фабрик дуже малої продуктивності (до 100 т/добу), де з метою спрощення схеми дроблення вона приймається одностадійною і при цьому допускається підвищена крупність грудок у живленні млинів;
- для фабрик дуже великої продуктивності (понад 40000 т/добу), що переробляють тверді руди плитнякової будови (типу криворізьких магнетитових кварцитів), приймається чотиристадійна схема дроблення.

*Операції попереднього грохочення* в схемах дроблення застосовують для зменшення кількості матеріалу, що надходить в операцію дроблення, а також для збільшення рухливості матеріалу в робочій зоні дробарки, що особливо важливо при дробленні в конусних дробарках середнього і дрібного дроблення, схильних до забивання рудним дріб'язком. У той же час застосування операцій попереднього грохочення викликає збільшення капітальних витрат і приводить до ускладнення цеху дроблення. Тому попереднє грохочення варто застосовувати при досить високому вмісті підрешітного класу у вихідному матеріалі (не менше 15%), а також при високій вологості цього класу, що приводить до зниження продуктивності дробарки.

Звичайно на першій стадії дроблення попереднє грохочення встановлюють при необхідності збільшення пропускнує спроможності дробарки.

На другій стадії дроблення в більшості випадків передбачають попереднє грохочення. Однак якщо дробарки середнього дроблення мають великий запас продуктивності в порівнянні з дробарками дрібного дроблення, зв'язаними з ними, то попереднє грохочення не передбачається. Але в цьому випадку варто врахувати властивості корисної копалини (вміст глини, шламу) і її вологість. При несприятливому співвідношенні

зазначених параметрів використання попереднього грохочення є необхідним, тому що без попереднього відсіву дріб'язку можлива підпресовка дробарки.

На третій стадії дроблення при малих розмірах розвантажувальних щілин (6 – 7 мм) попереднє грохочення застосовують завжди.

Звідси випливає **друге правило вибору схеми дроблення:**

- попереднє грохочення перед першою стадією застосовується рідко, його застосування повинно бути обґрунтоване;

- попереднє грохочення перед другою стадією, як правило, передбачається, відмова від нього повинна бути обґрунтована;

- попереднє грохочення перед третьою стадією передбачається завжди.

*Операції перевірного грохочення* застосовують для повернення в дробарку надрешітного продукту. Вміст надрешітного продукту в дробленому може досягати 60 %, при цьому розмір грудок надрешітного продукту може в 2 – 3 рази перевищувати розмір розвантажувальної щілини дробарки. Отже, при наявності перевірного грохочення в останній стадії крупність кінцевого продукту може бути зменшена в 2 – 3 рази і тим самим підвищені показники роботи цеху. Однак введення в схему перевірного грохочення приводить до ускладнення конструктивного оформлення цеху, збільшення капітальних витрат, погіршення санітарних умов праці.

З викладеного випливає **третьє правило вибору схеми дроблення: в останній стадії дроблення повинна бути операція перевірного грохочення.**

Три правила вибору схеми дроблення задовольняють при дрібному вихідному матеріалі схеми **АБ, ББ, БГ** і **БД**, при крупному вихідному матеріалі – схеми **АББ, БББ, АБГ, ББГ, АБД** і **ББД**. Операція грохочення на першій стадії не обов'язкова. Схеми **АБ, ББ, АББ** і **БББ** дозволяють одержати дроблений продукт крупністю до 25 мм, схеми **БГ, БД, АБГ, ББГ, АБД** і **ББД** – крупністю до 10 - 20 мм.

Ці схеми і застосовують у більшості випадків на збагачувальних фабриках при підготовці корисних копалин до подрібнення.

На збагачувальних фабриках дуже великої продуктивності, що переробляють міцні руди, які дають при дробленні куски плоскої форми, застосовують чотирістадійну схему дроблення **ААББ**.

### **6.1.2 Схеми дроблення при підготовці руд до самоподрібнення**

Схеми само- і напівсамоподрібнення використовують на збагачувальних фабриках великої і дуже великої продуктивності у випадку одержання технологічних переваг при заміні молоткових тіл рудою або у

випадках, коли фізичні властивості руди (вологість, глинястість) не дозволяють її дрібно дробити.

Застосовуване на збагачувальних фабриках самоподрібнення може бути чотирьох різновидів:

– *рудне самоподрібнення*, що здійснюється при крупності живлення до 350 мм (іноді до 500 мм);

– *напівсамоподрібнення*, що здійснюється на матеріалі тієї ж крупності, але в цьому випадку в млин додають сталеві кулі в кількості 5 – 10 % від його об'єму ;

– *грубе рудногалькове подрібнення (первинне)* дозволяє подрібнювати руду крупністю 15 – 25 мм; подрібнюване середовище (руда) подається разом з живленням і повинно мати крупність 100 – 300 мм;

– *тонке рудногалькове подрібнення (вторинне)* призначене для переробки руд крупністю 3 – 5 мм при крупності подрібнюваного середовища 25 – 100 мм.

Рудне самоподрібнення здійснюється в млинах сухого подрібнення типу «Аерофол» або в млинах мокрого подрібнення типу «Каскад». Оскільки сухе подрібнення вимагає складних пристроїв для пиловловлення, пневмокласифікації, регулювання вологості, то для фабрик, що використовують мокрі процеси, сухе подрібнення менш вигідне, ніж мокре.

При рудному самоподрібненні руда підлягає тільки крупному дробленню, при рудногальковому самоподрібненні схеми дроблення аналогічні схемам підготовки руди до подрібнення в стержневих і кульових млинах. Відмінність цих схем полягає лише в тім, що з продуктів дроблення потрібно грохоченням виділити певні класи крупності, які використовуються як подрібнювальне середовище.

Застосування процесу самоподрібнення приводить до підвищення продуктивності праці, значного спрощення схеми дроблення, зниження капітальних і експлуатаційних витрат, зменшення ошламлювання руди, що подрібнюється, а також забруднення продуктів подрібнення залізом. Однак процес самоподрібнення не універсальний – він не застосовний для м'яких, а також дуже твердих (неміцних, а також дуже міцних) руд, вимагає регулювання гранулометричного складу руди. Крім того, при рудногальковому самоподрібненні необхідно виділяти подрібнювальне середовище, що ускладнює схему дроблення і транспортно-складське господарство цеху.

При несприятливому гранулометричному складі руди, що надходить у млин рудного самоподрібнення, в ній накопичуються грудки критичної крупності, при великій кількості яких продуктивність млина знижується. Для регулювання гранулометричного складу руди застосовується кілька способів.

*Перший спосіб.* Дроблену до 200 – 350 мм руду розділяють на два-три класи, які складують в окремих бункерах. Перед самоподрібненням її шихтують у співвідношенні, яке відповідає «середній» руді, що дозволяє зменшити коливання в гранулометричному складі живлення млинів, але гранулометричний склад при цьому не змінюється. Тому цей спосіб застосовується при «сприятливому» гранулометричному складі руди, при «несприятливому» – виділені два-три класи шихтують в оптимальному співвідношенні, а надлишкову руду направляють на середнє або дрібне дроблення.

*Другий спосіб.* Виведені з циклу самоподрібнення грудки критичної крупності після додроблення подрібнюють в окремому кульовому млині.

*Третій спосіб.* Для виділення грудок критичної крупності в решітках млина роблять кілька вікон розміром, який дорівнює максимальному розміру грудок, які підлягають видаленню. Зі зливу млина зерна критичної крупності видаляють на грохоті з розміром отворів сита, який дорівнює їхньому мінімальному розміру. Грудки критичної крупності, які видаляють з млина, можуть бути використані як подрібнювальне середовище при рудногальковому самоподрібненні або після додроблення повернуті в млин.

*Четвертий спосіб.* У млин рудного самоподрібнення додають сталеві кулі діаметром 125 – 150 мм у кількості 5 – 10% від об'єму. Кулі виготовляють з якісної сталі, щоб уникнути їхнього розколювання при роботі млина і зменшення їхнього зносу.

Найбільш ефективними є другий, третій і четвертий способи, які дозволяють змінювати гранулометричний склад корисної копалини, тоді як перший дозволяє лише усереднити його.

Найпростіша схема дроблення і подрібнення має місце при четвертому способі. Схема дроблення буде також простою, якщо клас критичної крупності, що видаляється за третім способом, використовувати як подрібнювальне середовище при рудногальковому самоподрібненні. Вибір одного зі способів регулювання гранулометричного складу проводиться на основі результатів технологічних випробовувань і наступного техніко-економічного порівняння.

При грубому і тонкому рудногальковому самоподрібненні подрібнювальне середовище, залежно від необхідної крупності, виділяють після першої, другої або третьої стадії дроблення.

Необхідність виділення подрібнювального середовища для рудногалькового самоподрібнення ускладнює схему дроблення в порівнянні зі схемою дроблення перед подрібненням у стержневих і кульових млинах. Крім того, ефективність роботи млинів самоподрібнення в 1,2 – 1,4 рази нижча в порівнянні з кульовими внаслідок меншої в порівнянні зі сталлю

густини руди. З цих причин капітальні витрати на будівництво збагачувальних фабрик з рудногальковим самоподрібненням вищі, ніж зі звичайним, однак ці витрати швидко окупаються економією при експлуатації.

### 6.1.3 Вибір варіанта схеми дроблення

При підготовці руд до подрібнення вибір схеми дроблення залежить від способу і схеми наступного подрібнення, типу руди і її фізичних властивостей (міцності, грудкуватості, злежуваності, змерзлості, грохоченості та ін.). Вибір схеми дроблення здійснюється з урахуванням досвіду роботи підприємств-аналогів, що переробляють подібні руди, і шляхом порівняння сумарних капітальних та експлуатаційних витрат конкуруючих варіантів.

Якщо руда міцна або середньої міцності і відносно суха, з'ясовується можливість дроблення її за раціональними схемами до 10 ÷ 20 мм і уточнюється застосовність процесу самоподрібнення. У цьому випадку можливі варіанти:

- одностадійне дроблення руди до 300 мм за схемами *A* або *B* і наступне рудне самоподрібнення;
- тристадійне дроблення руди до 10 – 15 мм за схемою *АБГ* і наступне одностадійне подрібнення в кульових млинах;
- тристадійне дроблення руди до 20 – 25 мм за схемою *АБГ* і наступне двостадійне подрібнення в стержневих і кульових млинах.

Для фабрик малої продуктивності застосування самоподрібнення, як можливий варіант, не розглядається, для них розглядається можливість використання двостадійних схем дроблення *АГ* з наступним одностадійним (у кульових млинах) або двостадійним (у стержневих і кульових млинах) подрібненням.

Якщо руди вологі і глинисті, то в схеми дроблення включають операції грохочення для відокремлення найбільш вологого дрібного класу, що направляється безпосередньо в млини.

Залежно від конкретних умов дріб'язок виділяється з руди після крупного або середнього дроблення. При високому вмісті глини і вологи передбачають промивання руди і дроблення виконують з подачею води в робочу зону дробарки.

Порівняння варіантів здійснюється за такими показниками: числом машин і їхньою сумарною масою, загальною встановленою потужністю електродвигунів, загальною вартістю основного обладнання, сумарними експлуатаційними витратами на дроблення і подрібнення, технологічною надійністю, можливістю і надійністю автоматичного регулювання технологічних процесів, санітарними умовами праці.



#### 6.1.4 Схеми дроблення при підготовці руд до збагачення

Результати збагачення залежать від ступеня розкриття корисних і породних мінералів. У кожному конкретному випадку ступінь розкриття мінералів повинен вибиратися шляхом техніко-економічних досліджень, тому що він залежить від речовинного складу корисної копалини, вкращення мінералів, виробничої потужності фабрики, досконалості застосовуваних підготовчих і збагачувальних операцій та інших факторів.

При збагаченні вугілля, а також валунних залізних і крупновкраплених магнетитових руд дроблення виконують до 50-100 мм. Залежно від максимальної крупності сировини дроблення здійснюють за одну або дві стадії з попереднім грохоченням, але, як правило, без перевірного.

Якщо руда крупновкраплена і технологічною схемою передбачається її збагачення відсадкою або у важких суспензіях, то дроблення виконують до крупності 6-30 мм. Схема крупного і середнього дроблення вибирається звичайним способом. Для одержання постійної крупності дробленого продукту бажане застосування перевірного грохочення в останній стадії.

Підготовка до збагачення дрібновкраплених руд рідкісних металів здійснюється дробленням до 6 – 20 мм із наступним подрібненням у стержневих млинах до 0,3 – 2 мм.

#### 6.1.5 Розрахунок схем дроблення

Для розрахунку схеми дроблення необхідно мати наступні *вихідні дані*: продуктивність збагачувальної фабрики по вихідній сировині, характеристики крупності вихідної сировини і продуктів дроблення, задану максимальну крупність дробленого продукту, показники ефективності грохочення в окремих стадіях дроблення.

Характеристики крупності вихідної сировини і продуктів дроблення приймаються за результатами досліджень або за практичними даними роботи фабрик-аналогів. При відсутності дослідних даних можна виконати орієнтовний розрахунок з використанням типових характеристик крупності або аналітичних залежностей (див. розд. 2).

Після вибору й обґрунтування схеми дроблення виконують її розрахунок, послідовно визначаючи:

– *Загальний ступінь дроблення*:

$$S_{\text{заг}} = D_{\text{max}} / d_{\text{max}}, \quad (6.3)$$

де  $D_{\text{max}}$ ,  $d_{\text{max}}$  – максимальна крупність грудок вихідного і дробленого матеріалу.

– *Ступінь дроблення в окремих стадіях (середній ступінь дроблення):*

$$S_{сер} = (S_{заг})^{1/n}, \quad (6.4)$$

де  $n$  – число стадій дроблення.

Ступінь дроблення в стадії залежить від фізико-механічних властивостей руди, циклу дроблення і типу використовуваної дробарки. Оскільки в останній стадії дроблення, як правило, застосовується перевірне грохочення, то для цієї стадії може бути призначено трохи більший, у порівнянні із середнім, ступінь дроблення. Для перших стадій дроблення в цьому випадку ступінь дроблення варто перерахувати:

$$S_{стад} = (S_{заг} / S_{ост})^{1/(n-1)}, \quad (6.5)$$

де  $S_{ост}$  – призначений для останньої стадії ступінь дроблення.

– *Умовну максимальну крупність дроблених продуктів в окремих стадіях:*

$$\begin{aligned} D_1 &= D_{max} / S_1, \\ D_2 &= D_{max} / S_1 \cdot S_2, \\ D_3 &= D_{max} / S_1 \cdot S_2 \cdot S_3. \end{aligned} \quad (6.6)$$

– *Ширину розвантажувальних щілин дробарок в окремих стадіях:*

$$\begin{aligned} i_1 &= D_1 / z_1, \\ i_2 &= D_2 / z_2, \\ i_3 &= D_3 / z_3 \text{ – у відкритому циклі дроблення} \\ i_3 &= (0,8 - 1,0)D_3 \text{ – у замкненому циклі дроблення,} \end{aligned} \quad (6.7)$$

де  $z_1, z_2, z_3$  – максимальна крупність шматків дроблених продуктів у відповідних стадіях дроблення (табл. 6.1).

– *Розмір отворів сит грохотів в окремих стадіях:*

$$\begin{aligned} a_1 &= (i_1 - i_1 z_1), \\ a_2 &= (i_2 - i_2 z_2), \\ a_3 &= (i_3 - i_3 z_3) \text{ – у відкритому циклі дроблення,} \\ a_3 &= (1,0 - 1,2)D_3 \text{ – у замкненому циклі дроблення.} \end{aligned} \quad (6.8)$$


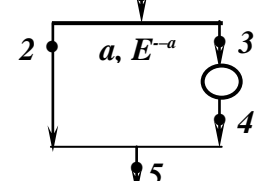
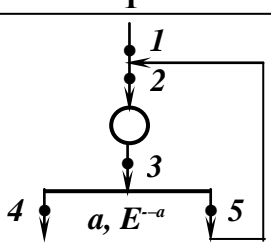
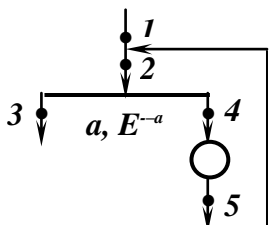
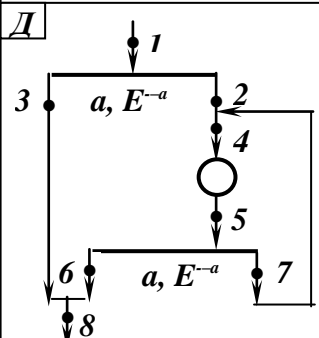
– *Ефективність грохочення, що залежить від типу використовуваного в операції грохоту і крупності грохочення: для нерухомих колосникових грохотів, використовуваних, як правило, у першій стадії дроблен-*

ня, вона приймається  $E^{-a} = 60 - 70 \%$ , для вібраційних грохотів, застосовуваних у наступних стадіях дроблення, ефективність вища –  $E^{-a} = 80 - 85 \%$ .

– *Розрахунок мас продуктів* схеми дроблення здійснюється поетапно з урахуванням обраного варіанта стадії, гранулометричного складу продуктів і ефективності використовуваного в стадії процесу грохочення.

Формули для розрахунку схем дроблення наведені в табл. 6.1.

**Таблиця 6.1 – Формули для розрахунку схем дроблення**

| Схема   | Розрахункові формули   |
|---|--|
| <p><b>А</b></p>    | $Q_1 = Q_2$  |
| <p><b>Б</b></p>   | $Q_2 = Q_1 b_1^{-a} E^{-a}$<br>$Q_3 = Q_4 = Q_1 - Q_2$<br>$Q_5 = Q_2 + Q_4 = Q_1$  |
| <p><b>В</b></p>  | $Q_4 = Q_1$<br>$Q_3 = Q_1(1/E^{-a} + b_1^{+a} b_3^{+a} / b_3^{-a})$<br>$Q_2 = Q_3$<br>$Q_5 = Q_3 - Q_4$  |
| <p><b>Г</b></p>  | $Q_3 = Q_1$<br>$Q_3 = Q_1(1/E^{-a} + b_1^{+a} / b_5^{-a})$<br>$Q_4 = Q_5 = Q_2 - Q_1$  |
| <p><b>Д</b></p>  | $Q_8 = Q_1$<br>$Q_3 = Q_1 b_1^{-a} E^{-a}$<br>$Q_2 = Q_6 = Q_1 - Q_3$<br>$Q_7 = Q_2(1 - b_5^{-a} E^{-a}) / b_5^{-a} E^{-a}$<br>$Q_4 = Q_5 = Q_2 + Q_7$ |

Методика розрахунку схеми дроблення і вибір до неї обладнання наведено у додатку Д.

### 6.1.6 Вибір обладнання до схеми дроблення

#### *Дробарки*

Вибір типу і розміру дробарки визначається міцністю корисної копалини, розмірами кусків вихідного і дробленого продуктів, а також необхідною продуктивністю.

Залежно від крупності вихідного і дробленого продуктів розрізняють три стадії дроблення: крупне, середнє і дрібне (табл. 2.1).

*Крупне, середнє і дрібне дроблення порід великої і середньої міцності* доцільно виконувати в дробарках, які працюють за принципом роздавлювання (щоккових, конусних і валкових із гладкими валками); *середнє і дрібне дроблення порід великої міцності і в'язких* – у дробарках, які працюють за принципом роздавлювання за участю стирання (конусних і значно рідше валкових дробарках із гладкими валками).

*Щоклові дробарки* устанавлюють переважно на збагачувальних фабриках невеликої продуктивності. Вони в порівнянні з конусними дробарками більш пристосовані для дроблення глинистих і вологих руд, займають менше місця у висоту, простіші конструктивно, але менш пристосовані для дроблення матеріалів пластинчастої форми.

*Конусні дробарки* переважніше встановлювати на збагачувальних фабриках великої продуктивності.

Обрана дробарка повинна забезпечити необхідну продуктивність при запроектованій крупності дробленого продукту. Ширина приймального отвору дробарки повинна бути на 15 % більшою від розміру максимального куску у вихідному матеріалі.

Продуктивність щоккових і конусних дробарок звичайно визначають за даними каталогів з урахуванням поправок на дробимість ( $k_{dp}$ ), насипну густину ( $k_{\delta}$ ) і крупність матеріалу, що дробиться, ( $k_d$ ):

$$Q = Q_k k_{dp} k_{\delta} k_d, \text{ т/год}, \quad (6.9)$$

де  $Q_k$  – продуктивність дробарки за каталогом, т/год;  $k_{dp}$ ,  $k_{\delta}$ ,  $k_d$  – поправочні коефіцієнти.

Якщо дробарка працює в замкненому циклі, то її продуктивність на 30 – 40 % вища, ніж у відкритому.

На збагачувальних фабриках щоклові дробарки використовують для крупного дроблення, а конусні відповідно до призначення – для

крупного, середнього і дрібного дроблення гранітів, базальтів, кварцитів, вапняків, руд і інших гірських порід, що мають підвищену міцність.

Конусні дробарки крупного дроблення ККД-1200, ККД-1500 можуть працювати «під завалом».

Щокові дробарки і конусні дробарки крупного дроблення звичайно працюють при ступенях дроблення 3 – 4, конусні дробарки середнього і дрібного дроблення – при ступенях дроблення 4 – 7.

Для дрібного дроблення гірських порід, вогнетривів і інших матеріалів середньої і високої міцності застосовують *конусні інерційні дробарки*, які забезпечують високий ступінь дроблення (10 – 15) з одержанням дрібного дробленого матеріалу.

*Валкові дробарки з гладкими валками* застосовують для середнього і дрібного дроблення руд, коли неприпустиме переподрібнення цінного крихкого мінералу (марганцеві, каситеритові, вольфрамітові руди, калійні солі), іноді їх застосовують для середнього дроблення вугілля й коксу.

При виборі дробарок із гладкими валками треба дотримуватися умови захоплення валками куска матеріалу, що дробиться:

$$D_g = (15 \div 20) D_{max}, \quad (6.10)$$

де  $D_g$  – діаметр валків;  $D_{max}$  – максимальний розмір кусків матеріалу, що дробиться.

На збагачувальних фабриках дробарки з гладкими валками звичайно використовують при ступені дроблення 3 – 4, їхня продуктивність визначається за формулою:

$$Q = n \pi D L s \delta k, \text{ т/год}, \quad (6.11)$$

де  $n$  – частота обертання валків,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $D, L$  – діаметр і довжина хитка, м;  $s$  – ширина щілини між валками, м;  $\delta$  – густина матеріалу, що дробиться,  $\text{т/м}^3$ ;  $k$  – коефіцієнт розпушення дробленого продукту в момент розвантаження ( $k = 0,1 - 0,3$ ).

Крупне дроблення порід малої міцності і крихких виконують у дробарках, які працюють переважно за принципом розколювання (зубчатих, голчастих і пікових), а середнє і дрібне дроблення – у дробарках ударної дії (молоткових, роторних і дробарках вибіркового дроблення).

*Зубчаті дробарки* призначені для крупного і середнього дроблення вугілля, антрацитів і сланців при необхідності одержати кусковий дроблений продукт з невеликим вмістом дріб'язку. Зубчаті дробарки працюють при ступенях дроблення 4 – 6. Продуктивність зубчатих дробарок розраховують за формулою (6.11).

Для зубчатих дробарок також повинна виконуватися умова захоплення куска матеріалу, що дробиться:

$$D_e = (1,5 \div 3,5) D_{max}, \quad (6.12)$$

де  $D_e$  і  $D_{max}$  - діаметр валків і максимальний розмір кусків матеріалу, що дробиться, мм.

Валкові дробарки мають багато переваг: простота конструкції, компактність, надійність в експлуатації і невеликий вміст дріб'язку в готовому продукті. Однак вони мають низьку продуктивність і велику питому витрату електроенергії.

*Дробарки ударної дії (молоткові і роторні)* використовуються для дроблення матеріалів не тільки низької і середньої, але й підвищеної міцності. Переваги дробарок ударної дії – простота конструкції, надійність, компактність, велика продуктивність, високий ступінь дроблення (20 і більше) і порівняно невелика питома витрата електроенергії. Тому вони широко застосовуються для дроблення кам'яного вугілля, коксової шихти, вапняку, руд чорних, кольорових, рідкісних і благородних металів, калійних солей, баритових, флюоритових і азбестових руд, будівельних матеріалів.

Дробарки ударної дії виготовляються одно- і двороторними, з колосниковими решітками і без них, з реверсивними і неревверсивними роторами.

Двороторні дробарки в порівнянні з однороторними менше забиваються і звичайно застосовуються для дроблення більш вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, також вони дозволяють завантажувати матеріал більшої крупності. Ширину щілини колосникових решіток і відстань між ними і кінцем бил (молотків) вибирають залежно від необхідної крупності дробленого продукту і вологості матеріалу, що дробиться. При дробленні глинистих вологих руд, щоб уникнути забивання колосникових решіток, відстань між колосниками збільшують. У важких випадках дробарки працюють без колосникових решіток.

Продуктивність дробарок ударної дії визначають за ефективністю дроблення:

$$Q = N \eta e_{em} k_{dp} k_d, \quad (6.13)$$

де  $N$  – установлена потужність електродвигуна, кВт;  $\eta$  – коефіцієнт використання потужності електродвигуна ( $\eta = 0,8 - 0,95$ );  $e_{em}$  – ефективність дроблення еталонної дробарки, т/кВт·год;  $k_{dp}$  – поправковий кое-

фіцієнт на дробимість руди;  $k_d$  – поправочний коефіцієнт на крупність руди.

Роторні дробарки випускають двох типів: ДРК – для крупного дроблення і ДРС – для середнього і дрібного.

У роторних дробарок співвідношення між діаметром ротора ( $D_p$ ) і максимальним розміром куска в живленні ( $D_{max}$ ) становить:

– для дробарок ДРК:

$$D_p = (1,7 \dots 2) D_{max}, \quad (6.14)$$

– для дробарок ДРС:

$$D_p = 3,3 D_{max}. \quad (6.15)$$

### Грохоти

У циклі підготовчих операцій за технологічним призначенням розрізняють попереднє, перевірне, підготовче грохочення і знешламлювання. Для цих цілей застосовують нерухомі і рухливі грохоти різних типів. Вибір типу грохота залежить від розміру кусків вихідного матеріалу, крупності розділення, необхідної ефективності грохочення і фізичних властивостей корисної копалини, з яких основна роль належить густині.

*Нерухомі колосникові грохоти* встановлюють на першій стадії дроблення при наявності у вихідному матеріалі понад 15 % дріб'язку (за масою) або при відсутності достатнього запасу продуктивності у дробарки крупного дроблення. При подачі корисної копалини з вагоноперекладача ширина грохота має дорівнювати довжині вагона, при завантаженні пластинчастим живильником – ширині живильника. Щоб уникнути зависання грудок матеріалу між бічними стінками грохота, мінімальна його ширина приймається: при великому вмісті великих грудок у вихідному  $B = 3D_{max}$ , при незначному вмісті –  $B = 2D_{max} + 100$  ( $D_{max}$  – розмір максимальної грудки у вихідному, мм).

Довжина грохота звичайно береться в 2 рази більшою від ширини.

Кут нахилу робочої поверхні колосникового грохота при грохоченні вугілля беруть 30 – 35°, при грохоченні руд – 40 – 45°, при грохоченні вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, кут нахилу збільшують до 55°.

Необхідну площу грохочення розраховують за формулою:

$$F = Q / (q_o a \delta k), \text{ м}^2, \quad (6.16)$$

де  $Q$  – необхідна продуктивність, т/год.;  $q_o$  – питома об'ємна продуктивність ( $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ) на 1 мм щілині;  $a$  – розмір щілини сита грохота, мм;  $\delta$  –

насипна густина живлення,  $t/m^3$ ;  $k$  – коефіцієнт, що враховує ефективність грохочення ( $k = 1$  при  $E = 65 - 70 \%$  і  $k = 2$  при  $E = 50 - 60 \%$ ).

*Барабанні (циліндричні) грохоти* застосовують в операціях попереднього грохочення вугілля, промивання легко- і середньопромивних руд, промивання і сортування щебеню, для вловлювання скрапу і крупних кусків руди зі зливу млинів.

Об'ємну продуктивність барабанних (циліндричних) грохотів визначають за формулою:

$$Q = q_o a \varphi, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (6.17)$$

де  $q_o$  – питома об'ємна продуктивність ( $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ) на 1 мм щілині;  $a$  – розмір щілини, мм;  $F$  – площа сита,  $\text{м}^2$ ;  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення грохота ( $\varphi = 0,15 - 0,25$ ).

*Інерційні грохоти* на збагачувальних фабриках використовують для попереднього і перевірного просіювання, зневоднення і знешламування, тонкої сухої і мокрої класифікації, промивання, виділення суспензії і відмивання обважнювача, розділення концентрату на товарні продукти.

Залежно від насипної густини вихідного матеріалу інерційні грохоти підрозділяються на 3 типи:

- легкого типу **Л** – для грохочення матеріалів з насипною густиною до  $1,4 \text{ т/м}^3$ ;
- середнього типу **С** – для грохочення матеріалів з насипною густиною до  $1,8 \text{ т/м}^3$ ;
- важкого типу **Т** – для грохочення матеріалів з насипною густиною  $2,8 \text{ т/м}^3$ .

З урахуванням траєкторії коливань грохоти мають такі виконання: **I** – інерційні з круговими або близькими до них коливаннями (ГІЛ, ГІС, ГІТ); **С** – самобалансні з прямолінійними коливаннями (ГІСЛ, ГІСС, ГІСТ); **ІС** – інерційні з самосинхронізовуваними віброзбуджувачами (інерційно-самобалансні) з коливаннями, близькими до прямолінійних (ГІСЛ, ГІСТ).

Продуктивність інерційних грохотів може бути розрахована за спрощеними формулами:

$$Q = q F, \text{ т/год}, \quad (6.18)$$

або

$$Q = q_o \delta F, \text{ т/год}, \quad (6.19)$$

де  $q$  – питома продуктивність грохота,  $\text{т/год} \cdot \text{м}^2$ ;  $q_o$  – питома об'ємна продуктивність грохота,  $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ ;  $\delta$  – насипна густина вихідного матеріалу,  $\text{т/м}^3$ ;  $F$  – площа сита грохота,  $\text{м}^2$ .



Питома продуктивність визначається за даними табл. 1.8 або табл. 6.2 залежно від вихідного матеріалу і розміру отворів сит грохота.

**Таблиця 6.2 – Питома продуктивність інерційних грохотів при сухому грохоченні**

| Корисна копалина | Од. вимір.           | Питома продуктивність при розмірі отворів сит, мм |     |      |      |      |    |      |      |    |     |     |     |
|------------------|----------------------|---|-----|------|------|------|----|------|------|----|-----|-----|-----|
|                  |                      | 6   | 10  | 13   | 20   | 25   | 30 | 40   | 50   | 75 | 100 | 125 | 150 |
| Кам'яне вугілля  | т/год·м <sup>2</sup> | 6   | 9   | 13   | 17   | 20   | 22 | 26   | 30   | 40 | 56  | 68  | 80  |
| Антрацит         | т/год·м <sup>2</sup> | 7,5   | 11  | 14,5 | 20   | 24   | 25 | 26   | 27,5 | 50 | 70  | 85  | 100 |
| Сланець          | т/год·м <sup>2</sup> | 4   | 7,5 | 10   | 14,5 | 18   | 20 | 24,5 | 29   | 39 | 50  | 63  | 75  |
| Руда             | т/год·м <sup>2</sup> | 6   | 11  | 13,5 | 20   | 23,5 | 27 | 31   | 35   | 43 | 49  | 52  | 56  |

*Примітка.* При мокрому грохоченні на ситах 6; 10; 13; 20 і 25 мм питому продуктивність необхідно збільшити відповідно в 2,8; 2,5; 2,0; 1,8 і 1,5 рази.

*Дугові і конічні грохоти* застосовують для мокрого грохочення дрібного і тонкого матеріалу, для зневоднення і знешламлювання, для відділення кондиційної суспензії від продуктів збагачення у важкосередовищних гідроциклонах, для рівномірного розділення матеріалу за шириною решета відсаджувальної машини при одночасному знешламлюванні.

Об'ємна продуктивність грохотів, які працюють під тиском, визначається за формулою:

$$Q = 160 F_{ж} v, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (6.20)$$

де  $F_{ж}$  – площа живого перетину сита (коефіцієнт живого перетину щілинних сит дорівнює 0,3 – 0,4), м<sup>2</sup>;  $v$  – швидкість пульпи на вході в апарат ( $v = 3 – 8$  м/с).

### 6.1.7 Компонувальні рішення корпусів крупного дроблення

У більшості випадків корпуси крупного дроблення поєднують із приймальними пристроями сировини. Для руди, що містить куски роз-

міром більш 400 – 500 мм, приймальних бункерів великої місткості звичайно не споруджують (великі капітальні витрати). Руду в дробарку завантажують або безпосередньо з вагонів (дробарки ККД-1500/180) і автосамоскидів (дробарки ККД-1200/150), або живильником важкого типу з бункера невеликої місткості (дробарки типів ЩДП і ЩДС).

При виборі способу завантаження крупногрудкової руди в дробарки першої стадії дроблення необхідно враховувати, що:

- при використанні бункера і живильника усувається тимчасове перевантаження і недовантаження дробарки і поліпшуються умови її експлуатації. У цьому випадку дроблена руда і підрешітний продукт попереднього грохочення можуть завантажуватися безпосередньо на загальний стрічковий конвеєр;

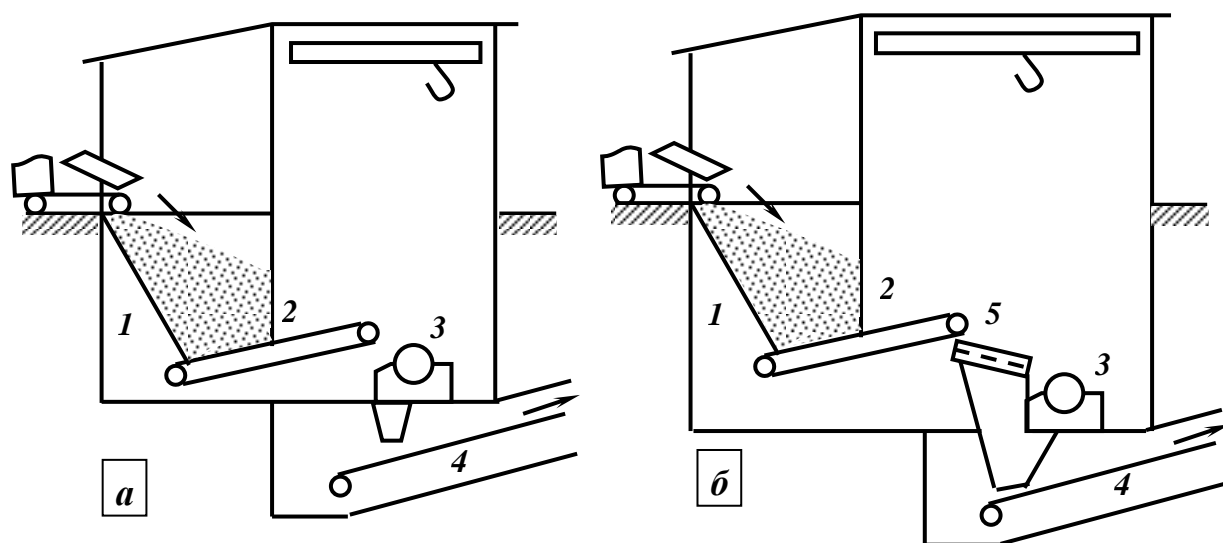
- при завантаженні дробарки «завалом» з вагона або самоскида дроблену руду і підрешітний продукт попереднього грохочення завантажувати безпосередньо на стрічковий конвеєр не можна, тому що в момент перекидання вагона можливе перевантаження. При використанні цього варіанта завантаження дроблена руда і підрешітний продукт повинні направлятися в невеликий бункер, а з нього живильником вивантажуватися на стрічковий конвеєр. Транспортування крупногрудкової руди (до 350 мм) стрічковими конвеєрами з корпусу крупного дроблення при великій продуктивності фабрики викликає швидкий знос стрічок, особливо при міцних абразивних рудах великої густини. Для запобігання зносу стрічки в місцях завантаження руди на конвеєри встановлюють живильники, колосники для підсіву дріб'язку, навішують ланцюги. Щоб уникнути транспортування крупнодробленої руди, іноді поєднують дві стадії дроблення (крупне і середнє) в одному корпусі при приймальних пристроях. У цьому випадку дробарки другої стадії встановлюють безпосередньо під дробарками першої стадії. На багатьох фабриках, які збагачують залізні руди, крупне дроблення здійснюється за два прийоми (первинне дроблення – у дробарках типу ККД, а додроблення – у дробарках типу КРД).

Типові схеми компоновальних рішень корпусів крупного дроблення, обладнаних щоківими і конусними дробарками, наведені на рис. 6.2 – 6.3.

*Корпус крупного дроблення, обладнаний щоківими дробарками* (рис. 6.2), проектується при здійсненні в корпусі однієї стадії дроблення.

Дробарка завантажується похилим пластинчастим живильником. У корпусі дроблення можуть бути встановлені одна-дві (максимально три) паралельно працюючі дробарки. При дробленні глинистих, слабкосипучих і вологих руд, а також руд, що дають при дробленні куски плитоподібної форми, рекомендується у вузлі розвантаження дробарки на

конвеєр установлювати спеціальний завантажувальний конус або живильник. При дробленні руд зі значним вмістом дріб'язку і при великій продуктивності фабрики перед щоквою дробаркою доцільне встановлення грохота (рис. 6.2 б).



**Рис. 6.2 – Схеми компонування корпусу крупного дроблення з щоквовими дробарками без попереднього грохочення (а) і з попереднім грохоченням (б). 1 – бункер; 2 – пластинчастий живильник; 3 – щоква дробарка; 4 – стрічковий конвеєр; 5 – грохот.**

*Корпус крупного дроблення, обладнаний конусними дробарками (рис. 6.3), проектується при здійсненні в корпусі однієї або двох стадій дроблення.*

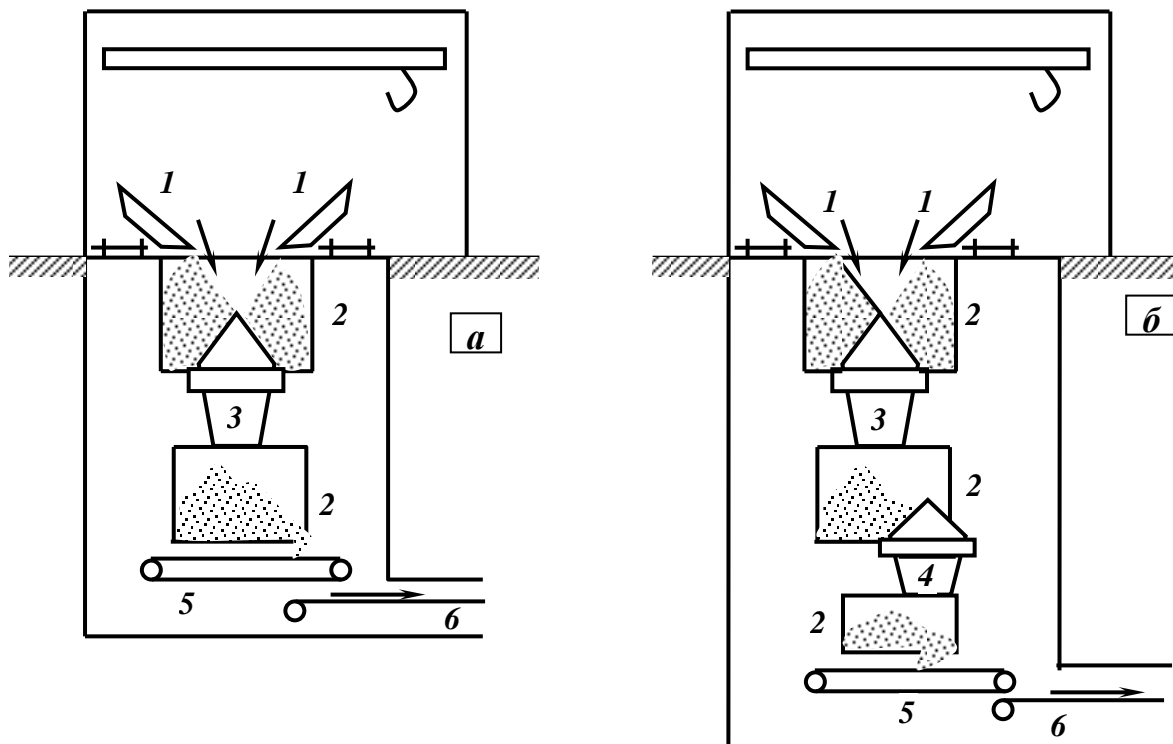
Дробарки ККД-1200/150 і більшого типорозміру завантажуються безпосередньо з транспортних посудин – «завалом», дробарки менших типорозмірів, а також дробарка КРД-700/75 завантажуються живильником з бункера (як щокві).

Схема (рис. 6.3 а) застосовується тільки при використанні конусних дробарок великих типорозмірів, які можуть працювати під «завалом», і переважно при тристадійному дробленні на фабриках великої продуктивності.

Дробарки малих типорозмірів завантажуються живильником, аналогічно схемам (рис. 6.2). Руда в корпус крупного дроблення подається або автосамоскидами, або в залізничних вагонах. Максимальне число секцій (дробарок) – три. Розвантаження і транспортування дробленого продукту (крупність до 500 мм) здійснюється через бункер і живильник стрічковим конвеєром зі спеціальною зносостійкою стрічкою.

При великому вмісті в руді дріб'язку перед крупним дробленням може бути передбачена операція попереднього грохочення на колосникових грохотах. Це дозволяє вивести основну частину дріб'язку, збіль-

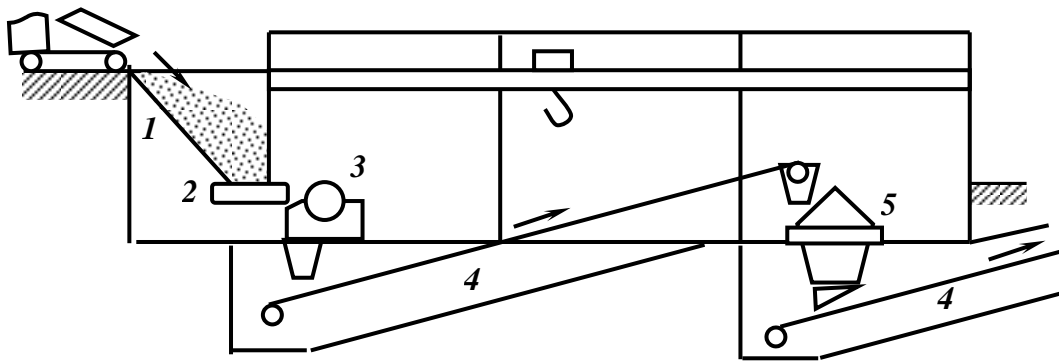
шити продуктивність дробарки, виключити забивання дробарки і підпресовку конуса.



**Рис. 6.3 – Схеми компонування корпусу крупного дроблення руди в один (а) або два заходи (б) з конусними дробарками.  
1 – вагон; 2 – бункер; 3 – конусна дробарка; 4 – редуційна дробарка;  
5 – пластинчастий живильник; 6 – стрічковий конвеєр**

Схема каскадного розташування дробарок (рис. 6.3 б) застосовується переважно при чотиристадійному дробленні твердих кристалічних руд плитоподібної будови на фабриках великої продуктивності. Конусні дробарки першого прийому, як правило, працюють під «завалом», завантаження редуційних дробарок другого прийому – самопливне, в окремих випадках – живильником. Максимальне число секцій – дві.

*Корпус крупного і середнього дроблення* фабрик малої продуктивності (250 – 300 т/год.) показаний на рис. 6.4. Дробильний цех працює в одну зміну з продуктивністю 40 – 50 т/год. Руда подається в бункер місткістю близько 70 т, звідки лотковим живильником завантажується в щоківу дробарку першої стадії дроблення. В другій стадії дроблення встановлена конусна дробарка середнього дроблення. Грохочення перед обома стадіями не застосовується.



**Рис. 6.4 – Схема компоновання корпусу крупного і середнього дроблення збагачувальної фабрики малої продуктивності:**  
**1 – бункер; 2 – лотковий живильник; 3 – щокова дробарка;**  
**4 – стрічковий конвеєр; 5 – конусна дробарка.**

Звичайно на збагачувальних фабриках навіть при продуктивності (2000 – 2500 т/год.) установлюють по одній конусній дробарці великого типорозміру, що обумовлюється експлуатаційною надійністю дробарок, а також їх високою вартістю і великими капітальними витратами по корпусу крупного дроблення в цілому.

### **6.1.8 Компоновальні рішення корпусів середнього і дрібного дроблення**

Компоновання обладнання в цехах середнього і дрібного дроблення залежить від схеми дроблення, продуктивності збагачувальної фабрики, числа дробарок і грохотів в окремих операціях, рельєфу промислової площадки, наявності або відсутності складу (або бункерів) крупнодробленої руди.

Як правило, компоновальні рішення передбачають поєднання відділень середнього і дрібного дроблення з одноярусним розташуванням дробарок. Звичайно при дробленні за три стадії на одну дробарку другої стадії встановлюють не більше двох дробарок третьої стадії. Каскадне розташування дробарок у сучасній практиці застосовується рідко при обґрунтованому виключенні замкненого циклу дроблення, при дробленні з промиванням, при розташуванні середнього і дрібного дроблення безпосередньо при шахті (у цьому випадку крупне дроблення здійснюється під землею) і в інших особливих випадках.

Найчастіше використовують три варіанти компоновальних рішень цехів середнього і дрібного дроблення:

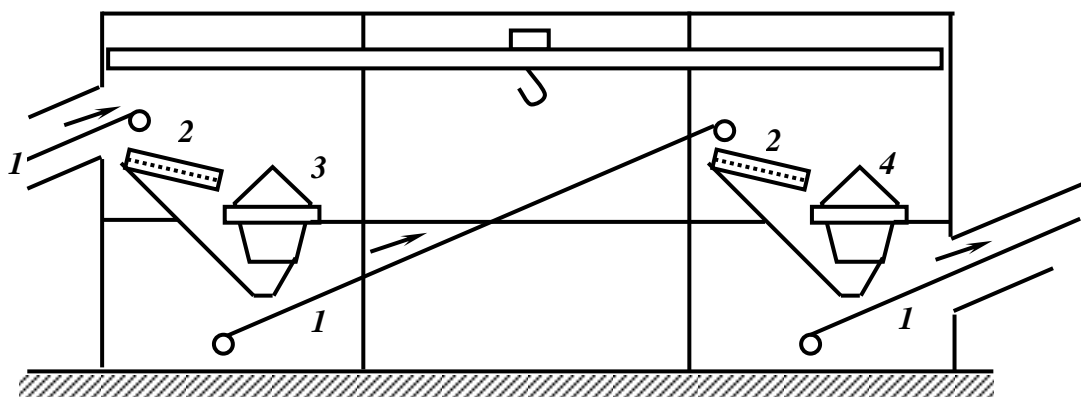
– дробарки групуються в паралельно працюючі агрегати, у кожному з яких на одну дробарку середнього дроблення припадає одна або дві

дробарки дрібного дроблення. Транспортування руди в кожному агрегаті здійснюється стрічковим конвеєром (1-й варіант);

– дробарки групуються в аналогічні агрегати, але в цьому випадку дробарки середнього дроблення зв'язані з дробарками дрібного дроблення через розподільні бункери (2-й варіант);

– дробарки також групуються в агрегати, які працюють паралельно, але руда транспортується жолобами самопливом. Дробарки в цьому випадку розташовуються каскадно (3-й варіант).

На збагачувальних фабриках малої і середньої продуктивності при наявності дозуючого пристрою перед першою стадією дроблення можуть застосовуватися безбункерні варіанти корпусів середнього і дрібного дроблення. На фабриках великої продуктивності, а також при відсутності дозуючого пристрою в корпусі середнього і дрібного дроблення повинні бути передбачені розподільні бункери крупнодробленої руди. Компонувальна схема розташування дробарок, що відповідає першому варіанту наведена на рис. 6.5.



**Рис. 6.5 – Схема компоновального рішення корпусу середнього і дрібного дроблення без проміжних бункерів.**

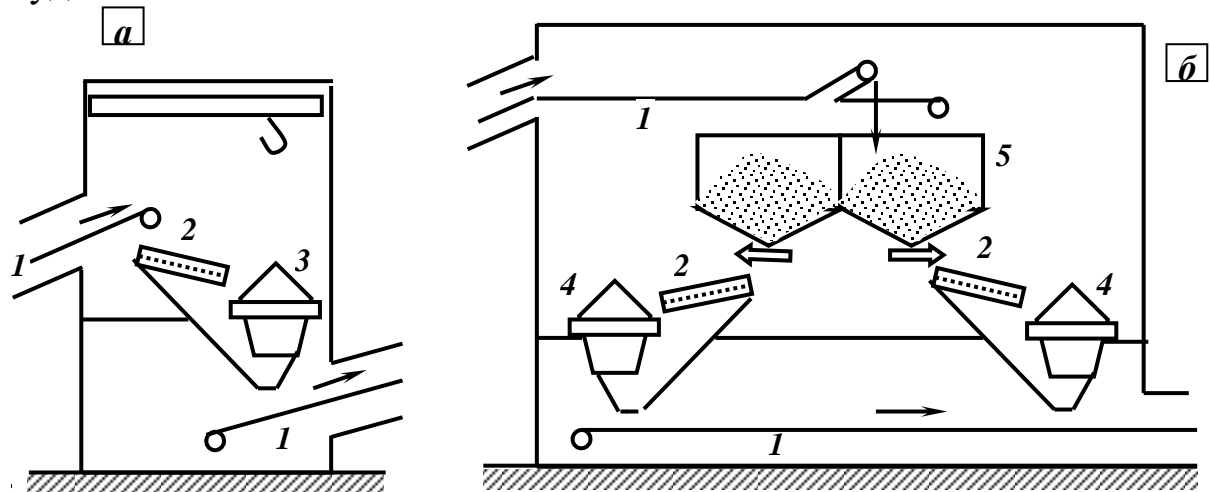
**1 – стрічковий конвеєр; 2 – грохот; 3 – конусна дробарка середнього дроблення; 4 – конусна дробарка дрібного дроблення.**

При компонуванні дробарок за другим варіантом схема виходить більш гнучкою, тому що будь-яка дробарка третьої стадії може працювати з будь-якою дробаркою другої стадії. При розміщенні дробарок середнього і дрібного дроблення в двох будовах, як показано на рис. 6.6, крупнодроблена руда подається рівнобіжними конвеєрами на дробарки середнього дроблення.

Системою конвеєрів середньодроблена руда і підрешітний продукт грохотів подаються в розподільні бункери перед дробарками дрібного дроблення, звідки живильниками видаються на грохоти і дробарки дрібного дроблення.

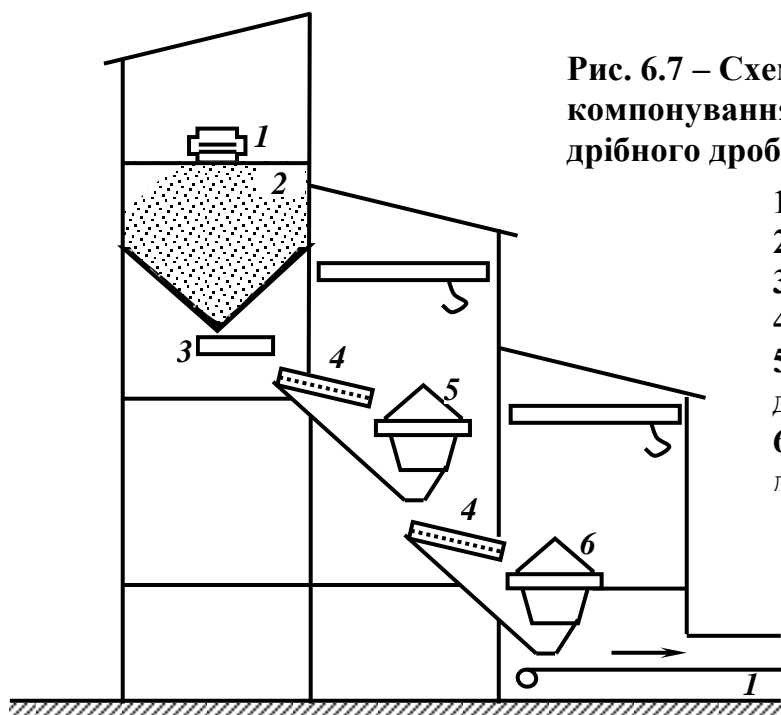
Цей варіант компоновального рішення корпусу середнього і дрібного дроблення компактний, однак робота всіх дробарок дрібного дроблення залежить від конвеєрів, що подають руду в розподільні бункери. Тому для другого варіанта обов'язкове дублювання конвеєрів.

За другим варіантом дробарки можуть бути розміщені і в одній будові.



**Рис. 6.6 – Схема компоновання дробарок середнього і дрібного дроблення у різних будовах: *a* – корпус середнього дроблення; *б* – корпус дрібного дроблення. 1 – стрічковий конвеєр; 2 – грохот; 3 – конусна дробарка середнього дроблення; 4 – конусна дробарка дрібного дроблення; 5 – розподільні бункери.**

Схема компоновання з каскадним розташуванням дробарок середнього і дрібного дроблення наведена на рис. 6.7.



**Рис. 6.7 – Схема каскадного компоновання дробарок середнього і дрібного дроблення:**

- 1 – стрічковий конвеєр;
- 2 – бункер;
- 3 – лотковий живильник;
- 4 – грохот;
- 5 – дробарка середнього дроблення;
- 6 – дробарка дрібного дроблення.

Крупнодроблена руда надходить в розподільні бункери і лотковими живильниками подається на грохоти. Попереднє грохочення перед дробарками виконується на вібраційних грохотах – по одному на дробарку. Транспортування руди в корпусі середнього і дрібного дроблення здійснюється самопливом. Загальний перепад висот для обох стадій дроблення від осі барабана конвеєра, що подає руду в бункери, і до осі барабана конвеєра дрібнодробленої руди становить близько 20 м.

Незалежно від варіанта компоновання корпуси середнього і дрібного дроблення складаються з двох частин: бункерної і дробильної.

За взаємним розташуванням цих частин розрізняють два типи корпусу: зблокований з одnobічним або двостороннім розташуванням бункерів у верхній частині будови і деблокований з розміщенням ємностей в окремій споруді (наземний склад, силосні бункери), з'єднаний з корпусом дроблення транспортними галереями.

## **6.2 Технологія подрібнення**

### **6.2.1 Операції класифікації в схемах подрібнення**

На збагачувальних фабриках при тонкому вкрапленні корисного мінералу подрібнення застосовується для підготовки корисної копалини до операцій збагачення. Схеми подрібнення складаються з однієї або декількох стадій, кожна з яких включає операції подрібнення і класифікації. Операції класифікації застосовуються для відділення готового по крупності продукту або для розвантаження млина. У схемах подрібнення можуть бути присутні операції класифікації: попередня, перевірна в цілком або частково замкненому циклі подрібнення, контрольна зливу або пісків.

*Попередня класифікація* живлення стадії подрібнення застосовується з метою збільшення продуктивності млина, зменшення шламоутворення, виділення в окремий продукт первинних шламів і компонентів корисної копалини, що легко подрібнюються, при необхідності їхнього збагачення в окремому циклі. Перед першою стадією подрібнення попередня класифікація застосовується рідко, доцільність її застосування залежить від максимальної крупності зерен у живленні (не більше 8 мм) і вмісту в ньому готового продукту (не менше 15 %).

*Перевірна класифікація в повністю замкнутому циклі* застосовується для контролю крупності подрібненого продукту, підвищення продуктивності млина і зменшення ошламлювання продукту при подрібненні. При наявності перевірної класифікації продуктивність млина по готовому продукту зростає в зв'язку зі збільшенням у живленні вмісту крупного класу внаслідок повернення некондиційного по крупності



продукту (циркулююче навантаження). На збагачувальних фабриках величина циркулюючого навантаження коливається від 50 до 700 %. При цьому між величиною циркулюючого навантаження і відносною продуктивністю млина існує певна залежність: збільшення циркулюючого навантаження приводить до збільшення відносної продуктивності максимально в два рази. За результатами досліджень для ефективної роботи млинів у цілком замкненому циклі циркулююче навантаження повинно бути не меншим 150 – 200 %, однак збільшення його понад 400 – 500 % недоцільно, оскільки продуктивність практично не збільшується. Тому в двостадійних схемах подрібнення, де млини першої стадії, як правило, не видають кінцевого продукту і можуть працювати у відкритому циклі, необхідно виконувати наступну умову: для ефективної роботи млинів першої стадії у відкритому циклі об'єм млинів другої стадії повинен бути не менш ніж у півтора-два рази більше об'єму млинів першої стадії.

*Перевірна класифікація в частково замкненому циклі* зустрічається лише в багатостадійних схемах подрібнення. Частково замкнений цикл має деякі технологічні особливості, що визначають умови його застосування. По-перше, при використанні частково замкненого циклу навантаження на млини другої стадії передається через піски, а не через злив, як це має місце при цілком замкненому циклі. Це означає, що в схемах з цілком замкненим циклом для повного завантаження млина другої стадії необхідно одержувати досить грубий злив класифікатора першої стадії, що не завжди можливо (наприклад, при подрібненні кристалічних руд). По-друге, при використанні частково замкненого циклу маса продукту, що надходить у другу стадію, постійна і дорівнює різниці між масами живлення млина і зливу класифікатора першої стадії. Ця особливість дозволяє легко регулювати розподіл навантаження між першою і другою стадіями подрібнення. По-третє, при частково замкненому циклі первинні шлами і компоненти корисної копалини, що подрібнюються легко, виділяються в злив класифікатора першої стадії. Відсутність шламів може несприятливо позначитися на класифікації другої стадії, тому що шлами, підвищуючи в'язкість пульпи, сприяють більш спокійній, стабільній і ефективній роботі класифікатора (наприклад, при подрібненні кристалічних руд утворюється незначна кількість вторинних шламів). По-четверте, застосування частково замкненого циклу дозволяє запобігти накопиченню і ошламлюванню самородних металів у млині. Важкі і ковкі металеві включення накопичуються в пісках класифікатора.

*Контрольна класифікація зливу* застосовується при необхідності одержання тонкого кінцевого продукту при одностадійному подрібненні і при необхідності стадіального збагачення корисної копалини. Недо-

ліком схем з контрольною класифікацією зливу є збільшений фронт класифікації і нестабільний режим роботи першого класифікатора.

*Контрольна класифікація пісків* використовується для зниження вмісту готового продукту в пісках. Застосовується вкрай рідко, тому що мало позначається на вилученні готового продукту і продуктивності замкненого циклу (підвищення продуктивності не більше 1,5 %).

### 6.2.2 Схеми подрібнення в стержневих і кульових млинах

*Класифікація схем подрібнення* здійснюється за такими ознаками:

- число стадій подрібнення в схемі (одно-, дво- і багатостадійні);
- вид циклу подрібнення в першій стадії (відкритий, повністю замкнений, частково замкнений);
- місце завантаження вихідного матеріалу (у млин або у класифікатор);
- наявність або відсутність поєднаних операцій попередньої і перевірної класифікації;
- наявність або відсутність операцій контрольної класифікації.

Схеми подрібнення, подібно схемам дроблення, складаються з окремих стадій, що включають операцію подрібнення і супутні їй операції класифікації (рис. 6.8).

Залежно від необхідної крупності подрібнення розрізняють: крупне подрібнення, що дозволяє одержати подрібнений продукт, який містить 50 – 60 % класу – 0,074 мм, середнє подрібнення – 60-85 % класу – 0,074 мм і тонке подрібнення – понад 85 % класу – 0,074 мм.

Різноманітність схем подрібнення обумовлена різноманітністю їхнього використання.

*Одностадійні схеми подрібнення* залежно від характеристики живлення, стадійності подрібнення і необхідної крупності подрібненого продукту використовують за варіантами:

- схеми **А**, **Б** і **Ж** застосовуються тільки в багатостадійних схемах подрібнення, тому що при одностадійному подрібненні вони не ефективні;
- схеми **В** і **Е** застосовуються при крупності вихідної руди понад 10 мм і невеликому вмісті в ній шламів;
- схеми **Г**, **Д**, **Ж** і **З** застосовуються при дрібній руді, що містить не менше 15 % готового по крупності продукту, крім того, схеми **Д** і **З** використовуються лише при необхідності виділення в самостійний продукт первинних шламів і розчинних солей для їх наступної роздільної обробки.

З одностадійних схем найчастіше використовується схема **В**. Звичайно ж одностадійні схеми застосовуються при необхідності под-

рібнення руди до 55 – 60 % класу – 0,074 мм. Але на збагачувальних фабриках малої продуктивності за рахунок зниження навантаження на млини одностадійні схеми застосовують і для більш тонкого подрібнення.

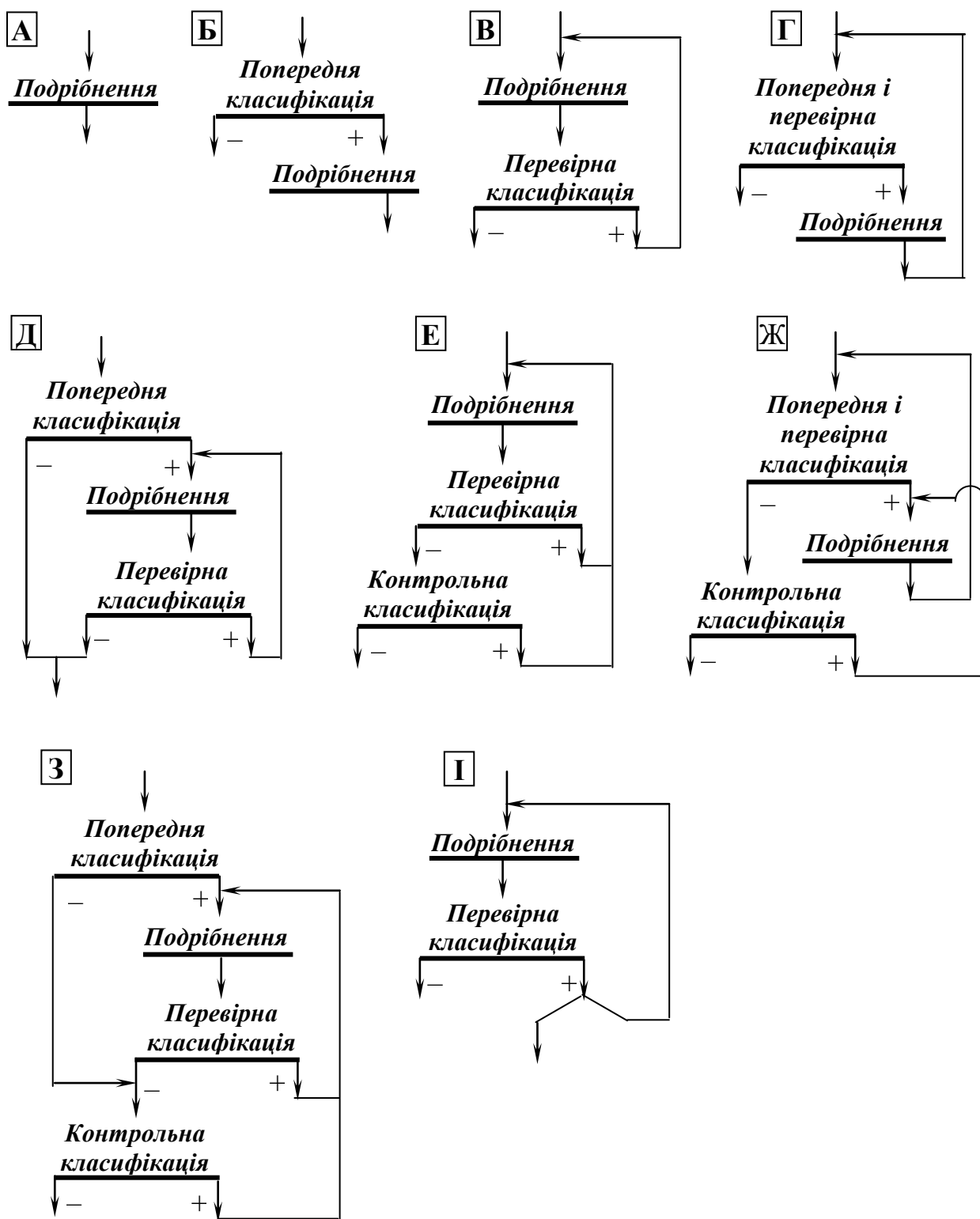


Рис. 6.8 – Одностадійні схеми подрібнення.

Переваги одностадійних схем у порівнянні з двостадійними полягають в їхній меншій матеріалоемності, простоті компонування, обслуговування і ремонту, і, крім того, вони вимагають менших капітальних витрат. Однак при застосуванні одностадійних схем важко одержати тонкий злив класифікатора і здійснити стадійне збагачення руди, виняток становлять схеми **Е, Ж, З**, але в цих схемах дуже великий фронт класифікації.

*Двостадійні схеми подрібнення* підрозділяють на три групи в залежності від виду циклу подрібнення на першій стадії.

До першої групи відносять двостадійні схеми з відкритим циклом у першій стадії подрібнення – **АВ, АГ, АД, АЖ, АЗ**.

Схеми **АВ, АГ, АД** прості в регулюванні, мають невеликий фронт класифікації, але одержання тонкого продукту утруднене. Схема **АВ** застосовується на магнітозбагачувальних, а іноді і на флотаційних фабриках, що переробляють дрібноокраплені руди.

Схеми **АГ** і **АД** застосовують на збагачувальних фабриках великої продуктивності при крупності подрібненого продукту до 55 – 80 % класу – 0,074 мм. Схеми **АЖ** і **АЗ** більш складні в регулюванні, їх супроводжує дуже великий фронт класифікації, але вони дозволяють одержати тонкий кінцевий продукт крупністю до 80 – 95 % класу – 0,074 мм.

Схеми **АЖ** і **АЗ** застосовують при переробці тонковкраплених руд, а також при необхідності здійснити їхнє стадіальне збагачення методом флотації.

Перша стадія подрібнення здійснюється звичайно в стержневих млинах, що дає можливість збільшити крупність живлення до 25 мм.

Друга група представлена двостадійними схемами з цілком замкненим циклом подрібнення в першій стадії – **ВВ, ВГ, ВД, ВЖ, ВЗ**. Ці схеми часто використовуються на збагачувальних фабриках середньої і великої продуктивності при переробці руд різного речовинного складу.

Схеми **ВВ, ВГ, ВД** дозволяють одержати кінцевий продукт крупністю до 80 % класу – 0,074 мм, а схеми **ВЖ** і **ВЗ** – до 95 % цього класу. Перевагою схем другої групи є простота компонування, можливість одержання тонкого кінцевого продукту і здійснення стадійного збагачення руди. Однак у схемах використовується багато класифікаторів і процес важко регулювати.

До третьої групи належать двостадійні схеми з частково замкненим циклом подрібнення в першій стадії – **ІВ, ІЕ**. Ці схеми використовуються при багатостадійному подрібненні. Схема **ІВ** дозволяє одержати кінцевий продукт крупністю 55 - 80 % класу – 0,074 мм, схема **ІЕ** – 80 - 95 % цього класу. Схеми **ІВ** і **ІЕ** відрізняються простотою

регулювання і, крім того, при їхньому використанні самородні метали не накопичуються в циклі подрібнення. Недоліком цих схем є необхідність використання транспортних засобів або жолобів із крутим нахилом для передачі пісків з першої стадії в другу.

*Багатостадійні схеми подрібнення АГГ і АГД* застосовують рідко і, в основному, на збагачувальних фабриках великої потужності, що переробляють дрібновокраплені руди при крупності живлення 25 – 30 мм. Схеми *АГГ* і *АГД* дозволяють виконувати стадійне збагачення руди. Найчастіше перша стадія здійснюється в стержневих млинах.

### **6.2.3 Схеми рудного самоподрібнення**

Схеми само- і напівсамоподрібнення використовуються на фабриках великої і дуже великої продуктивності у випадку одержання технологічних переваг при заміні сталевого подрібнюючого середовища рудним або у випадках, коли фізичні властивості руди (вологість, глинястість) не дозволяють її ефективно подрібнювати. У той же час процес самоподрібнення не універсальний, для самоподрібнення руди повинні мати певні властивості. Вибір процесу самоподрібнення повинен ґрунтуватися на вивченні рудної бази і властивостей руди, а також на результатах промислових випробовувань процесу самоподрібнення. Властивості руди визначають схему самоподрібнення і заходи, які повинні бути передбачені в ній для боротьби зі шматками критичної крупності, а також для інтенсифікації процесу.

Переважає застосування одержали схеми, наведені на рис. 6.9.

Крупність вихідного матеріалу, що надходить у схему само- і напівсамоподрібнення, становить 250 – 350 мм, іноді до 500 мм.

*Схеми 1 і 5* застосовують при багатостадійному рудному само- і напівсамоподрібненні твердих руд. Крупність подрібнення в першій стадії – 50 – 60 % класу – 0,074 мм. Грохочення зливу млина виконують в бутарі або на інерційному грохоті.

Обсяг матеріалу критичної крупності (25 – 75 мм), виведеного на дроблення, становить 25 – 40 % від живлення млина. Частина класу критичної крупності додроблюють в конусній дробарці дрібного дроблення, іншу частину (6 – 8 % від живлення млина) використовують, при необхідності, у млинах рудногалькового подрібнення другої і третьої стадій. Якщо рудна галька не виводиться, схема застосовується як одностадійна.

При напівсамоподрібненні в млин додають сталеві кулі діаметром 125 – 150 мм у кількості 5 – 10 % від об'єму млина.

*Схему 2* застосовують при багатостадійному рудному самоподрібненні міцних і в'язких руд. Крупність подрібнення в першій стадії – до 60 – 85 % класу – 0,074 мм.

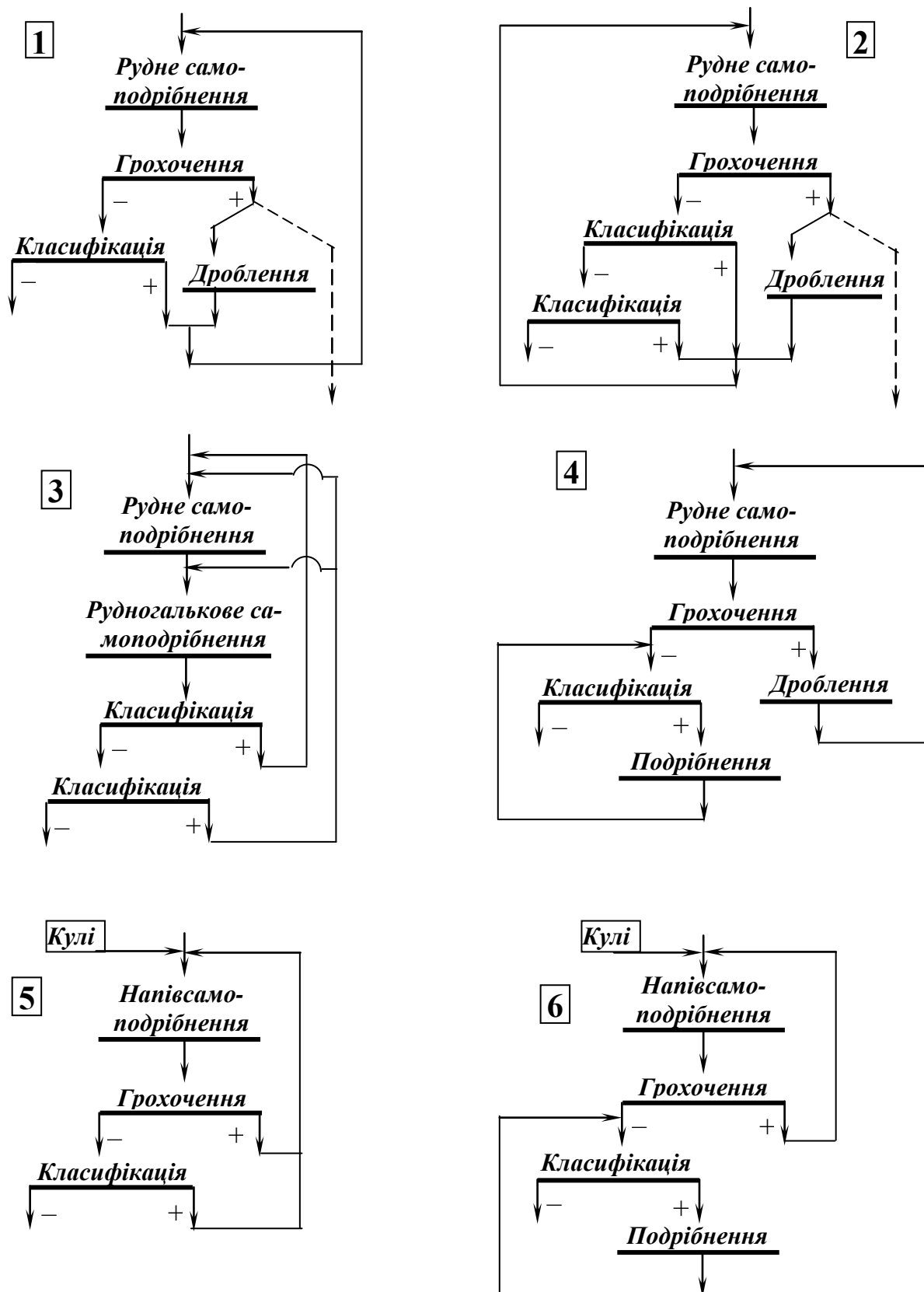


Рис. 6.9 - Схеми само- і напівсамоподрібнення.

Одержання рудної гальки для другої і третьої стадій подрібнення повинне плануватися з дробильного відділення фабрики.

На відміну від схеми *1* для полегшення і нормалізації роботи гідроциклонів при одержанні остаточного зливу між ними і бутарою встановлюють механічний класифікатор. В іншому схема *2* аналогічна схемі *1*.

*Схему 3* використовують при багатостадійному повному рудному самоподрібненні до кінцевої крупності менше 85 % класу – 0,074 мм. Схема застосовна для руд, що не утворюють при рудному самоподрібненні надлишкової маси рудної гальки. Весь клас критичної крупності (25 – 75 мм) використовують як молільне середовище в рудно-галькових млинах другої і третьої стадій.

*Схеми 4 і 6* застосовують для двостадійного подрібнення до кінцевої крупності – 60 – 85 % класу – 0,074 мм. У першій стадії використовується само- або напівсамоподрібнення, у другій – кульове подрібнення. Ці схеми найбільш надійні в експлуатації при переробці руд зі змінним за міцністю і крупністю складом.

#### **6.2.4 Циркуляційне навантаження**

Млини можуть працювати у відкритому, замкненому і частково замкненому циклах. При роботі у відкритому циклі (рис. 6.8, схема *А*, застосовується у першій стадії) матеріал проходить через млин один раз і подрібнений продукт виходить порівняно крупним (до 2 – 3 мм). Стержневі млини, які використовуються у відкритому циклі, працюють ефективно і забезпечують високу продуктивність. Продукти подрібнення стержневих млинів, що працюють у відкритому циклі можуть направлятися на гравітаційне або магнітне збагачення.

При замкненому циклі матеріал, що подрібнюється, з млина надходить у класифікатор, який розділяє його на злив і піски. Злив направляється на збагачення, а піски багаторазово повертаються у млин до тих пір, поки не досягнуть заданої крупності. При сталому режимі замкненого циклу маса оборотних пісків стає постійною – це й є циркуляційне навантаження.

При замкненому циклі, у якому у більшості випадків працюють кульові, рудні і рудногалькові млини, зі збільшенням продуктивності млина по вихідній руді циркуляційне навантаження зростає. Встановлено, що невеликі циркуляційні навантаження (до 500 %) сприяють підвищенню продуктивності млина. Збільшення швидкості проходження матеріалу через млин при збільшенні циркуляційного навантаження сприяє підвищенню ефективності роботи подрібнюючих тіл і зменшенню переподрібнювання матеріалу. Але збільшення циркуляційного навантаження вище його оптимального значення приводить до зниження продуктивності млина.

Циркуляційне навантаження визначають за даними ситового аналізу продуктів класифікації, а також за їхнім розрідженням.

Якщо скласти баланс по твердому і будь-якому класу крупності (по « $d$ ») в операції класифікації (рис. 6.10):

$$\begin{cases} Q_3 = Q_4 + Q_5; \\ Q_3\beta_3 = Q_4\beta_4 + Q_5\beta_5, \end{cases}$$

то у результаті рішення системи рівнянь отримуємо формулу для визначення циркуляційного навантаження:

$$C = \frac{Q_5}{Q_4} = \frac{Q_5}{Q_1} = \frac{\beta_4 - \beta_3}{\beta_3 - \beta_5}, \quad (6.21)$$

де  $C$  – циркуляційне навантаження, частки од.;  $Q_i$  – маса  $i$ -го продукту, кг, т;  $\beta_i$  – вміст розрахункового класу у  $i$ -му продукті, частки од. або %.

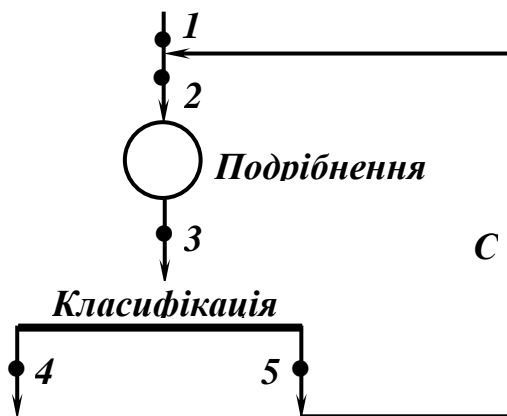


Рис. 6.10 – Схема до розрахунку циркуляційного навантаження.

Маса пісків буде:

$$Q_5 = CQ_1 = Q_1 \frac{\beta_4 - \beta_3}{\beta_3 - \beta_5}. \quad (6.22)$$

Якщо скласти баланс по воді в операції класифікації :

$$\begin{cases} Q_3 = Q_4 + Q_5; \\ Q_3R_3 = Q_4R_4 + Q_5R_5, \end{cases}$$

то у результаті рішення системи рівнянь також отримуємо формулу для визначення циркуляційного навантаження:

$$C = \frac{Q_5}{Q_4} = \frac{Q_5}{Q_1} = \frac{R_4 - R_3}{R_3 - R_5}, \quad (6.23)$$



Маса пісків буде:

$$Q_5 = CQ_1 = Q_1 \frac{R_4 - R_3}{R_3 - R_5}. \quad (6.24)$$

При відомій вологості продуктів необхідно спочатку перейти до розрідженостей і тільки потім використовувати формули (6.23), (6.24).

### 6.2.5 Вибір схеми подрібнення

Схема подрібнення збагачувальної фабрики вибирається звичайно після проведення дослідно-промислових випробовувань подрібнюваності корисної копалини. Вибір схеми подрібнення проектованої фабрики здійснюється залежно від фізичних властивостей корисної копалини, крупності початкового і кінцевого продуктів подрібнення, продуктивності фабрики, необхідності роздільної обробки пісків і шламів, необхідності стадійного збагачення.

*Одностадійні схеми подрібнення без контрольної класифікації зливу застосовують тільки в одностадійних схемах збагачення, при малій продуктивності фабрики і невеликому ступені подрібнення.*

*Двостадійні схеми подрібнення з відкритим циклом у першій стадії* при використанні в ній стержневих млинів може ефективно застосовуватися лише на фабриках великої продуктивності і при підвищеній крупності початкового і кінцевого продуктів.

*Двостадійні схеми подрібнення з цілком замкненим циклом у першій стадії* при використанні в ній кульових млинів застосовують при необхідності тонкого помелу руди або в двостадійних схемах збагачення.

*Двостадійні схеми подрібнення з частково замкненим циклом у першій стадії* застосовують щоб уникнути можливості накопичення корисних компонентів у циклах подрібнення.

*Багатостадійні схеми подрібнення застосовують у багатостадійних схемах збагачення.*

На більшості рудозбагачувальних фабрик підготовка корисної копалини здійснюється в усереднених умовах. Усередненими умовами роботи можна вважати наступні: склад руди дозволяє здійснити її дроблення в сухому вигляді до крупності 10 – 20 мм, кінцева крупність подрібненого продукту перед збагаченням не перевищує 60 – 65 % класу – 0,074 мм, вкраплення і властивості мінералів не вимагають стадіального збагачення. У цьому випадку конкурентоспроможними варіантами рудопідготовки будуть наступні:

– руда дробиться до 10 – 15 мм і подрібнюється за одну стадію у великих кульових млинах (з решітками або з центральним розвантаженням), що працюють у замкненому циклі з гідроциклонами;

– руда дробиться до 20 мм і надходить на двостадійне подрібнення за схемами *АГ* або *АЕ*, у яких перша стадія здійснюється в стержневих млинах, а друга – у кульових (подвійного, у порівнянні зі стержневими, об'єму), що працюють у цілком замкненому циклі з гідроциклонами;

– руда дробиться до 300 мм і направляється на рудне само- або напівсамоподрібнення.

Остаточний вибір варіанта схеми подрібнення здійснюється шляхом експериментальної перевірки і техніко-економічного порівняння конкуруючих варіантів.

### 6.2.6 Розрахунок схем подрібнення

Крупність продуктів подрібнення оцінюють за їх гранулометричним складом. Продукти характеризують умовною максимальною крупністю  $d_n$  і вмістом розрахункового класу крупності  $\beta$ . За розрахунковий найчастіше приймають клас крупністю – 0,074 мм (95 % цього класу відповідають крупності  $d_n = 0,074$  мм).

Для характеристики тонких продуктів розрахунковими класами можуть бути 0,040 і 0,020 мм, а для характеристики грубих продуктів – класи 0,20 і 0,15 мм.

Розрахунок мас продуктів схеми подрібнення виконується послідовно з урахуванням особливостей обраного варіанта стадії і гранулометричного складу продуктів подрібнення.


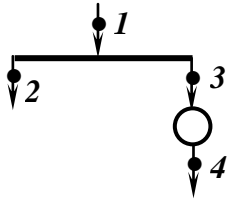
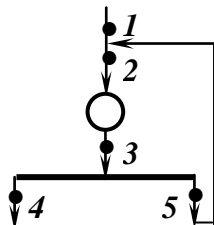
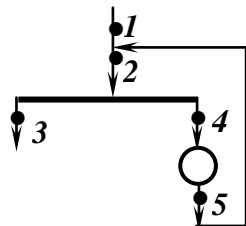
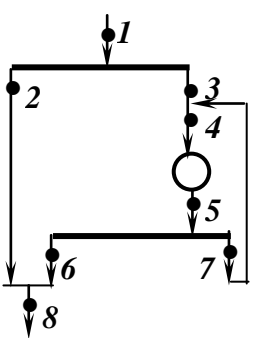
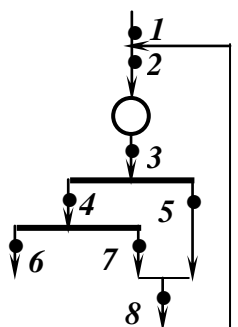
Формули для розрахунку схем подрібнення наведені в табл. 6.3.

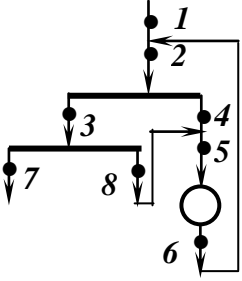
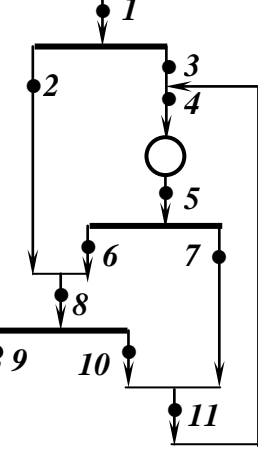
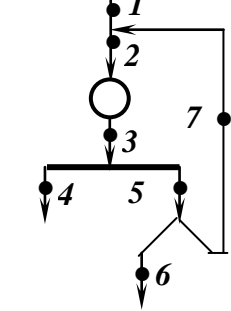
Для подрібнення корисних копалин застосовують головним чином барабанні циліндричні млини таких типів:

- МСЦ – млини стержневі з центральним розвантаженням,
- МШЦ – млини кульові з центральним розвантаженням,
- МШР – млини кульові з розвантаженням через решітки,
- ММС – млини мокрого самоподрібнення з розвантаженням через решітки,
- МРГ – млини рудногалькового подрібнення з центральним розвантаженням.

Тип застосовуваного млина визначається крупністю вихідного матеріалу, необхідним розміром подрібненого продукту, шламоутворенням матеріалу при подрібненні і змочуваністю поверхні зерен після подрібнення.

Таблиця 6.3 – Формули для розрахунку схем подрібнення

| Схема   | Вихідні дані для позначень                                  | Розрахункові формули   |
|---|---|--|
| 1   | 2   | 3  |
| <b>А</b><br>   | $Q_1, \beta_1, \beta_2$                                     | $Q_2 = Q_1$  |
| <b>Б</b><br>   | $Q_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$                   | $Q_3 = Q_1(\beta_2 - \beta_1)/(\beta_2 - \beta_3)$<br>$Q_2 = Q_1 - Q_3$  |
| <b>В</b><br>   | $Q_1, \beta_1, \beta_3, \beta_4, \beta_5$                   | $Q_4 = Q_1$<br>$Q_5 = Q_1(\beta_3 - \beta_5)/(\beta_4 - \beta_3)$<br>$Q_3 = Q_4 + Q_5$<br>$Q_2 = Q_3$<br>$\beta_2 = (Q_1\beta_1 + Q_5\beta_5)/Q_2$   |
| <b>Г</b><br> | $Q_1, \beta_1, \beta_3, \beta_4, \beta_5$                   | $Q_3 = Q_1$<br>$Q_4 = Q_1(\beta_3 - \beta_1)/(\beta_5 - \beta_4)$<br>$Q_5 = Q_4$<br>$Q_2 = Q_1 + Q_5$<br>$\beta_2 = (Q_1\beta_1 + Q_5\beta_5)/Q_2$   |
| <b>Д</b><br> | $Q_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ | $Q_8 = Q_1$<br>$Q_3 = Q_1(\beta_2 - \beta_1)/(\beta_2 - \beta_3)$<br>$Q_2 = Q_1 - Q_3$<br>$Q_6 = Q_1 - Q_2$<br>$Q_7 = Q_6(\beta_5 - \beta_7)/(\beta_6 - \beta_5)$<br>$Q_4 = Q_5 = Q_6 + Q_7$<br>$\beta_4 = (Q_3\beta_3 + Q_7\beta_7)/Q_4$<br>$R_n = (Q_2R_2 + Q_7R_7)/Q_n$ |
| <b>Е</b><br> | $Q_1, \beta_1, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ | $Q_6 = Q_1$<br>$Q_7 = Q_1(\beta_6 - \beta_4)/(\beta_4 - \beta_7)$<br>$Q_4 = Q_6 + Q_7$<br>$Q_5 = Q_4(\beta_4 - \beta_3)/(\beta_3 - \beta_5)$<br>$Q_8 = Q_5 + Q_7$<br>$Q_2 = Q_3 = Q_1 + Q_8$<br>$\beta_2 = (Q_1\beta_1 + Q_5\beta_5 + Q_7\beta_7)/Q_2$                     |

| 1   | 2  | 3   |
|---|--|---|
| <p><b>Ж</b></p>    | $Q_1, \beta_1, \beta_3,$<br>$\beta_4, \beta_6, \beta_7, \beta_8$   | $Q_7 = Q_1$<br>$Q_8 = Q_1(\beta_3 - \beta_8)/(\beta_7 - \beta_3)$<br>$Q_3 = Q_7 + Q_8$<br>$Q_7 = [Q_1(\beta_6 - \beta_1) + Q_3(\beta_3 - \beta_6)]/(\beta_6 - \beta_4)$<br>$Q_2 = Q_3 + Q_4$<br>$Q_5 = Q_6 = Q_4 + Q_8$<br>$\beta_2 = (Q_1\beta_1 + Q_6\beta_6)/Q_2$<br>$\beta_5 = (Q_4\beta_4 + Q_8\beta_8)/Q_5$   |
| <p><b>З</b></p>   | $Q_1, \beta_1,$<br>$\beta_2 = \beta_6 = \beta_8,$<br>$\beta_3, \beta_5, \beta_7, \beta_9,$<br>$\beta_{10}$ | $Q_9 = Q_1$<br>$Q_3 = Q_1(\beta_2 - \beta_1)/(\beta_2 - \beta_3)$<br>$Q_2 = Q_1 - Q_3$<br>$Q_{10} = Q_1(\beta_9 - \beta_8)/(\beta_8 - \beta_{10})$<br>$Q_8 = Q_9 + Q_{10}$<br>$Q_6 = Q_8 - Q_7$<br>$Q_7 = Q_6(\beta_6 - \beta_5)/(\beta_5 - \beta_7)$<br>$Q_4 = Q_5 = Q_6 + Q_7$<br>$Q_{11} = Q_7 + Q_{10}$<br>$\beta_{11} = (Q_7\beta_7 + Q_{10}\beta_{10})/Q_{11}$<br>$\beta_4 = (Q_3\beta_3 + Q_{11}\beta_{11})/Q_4$ |
| <p><b>І</b></p>  | $Q_1, \beta_1, \beta_3, \beta_4$<br>$\beta_5 = \beta_6 = \beta_7,$<br>$n = Q_6/Q_5$                        | $Q_5 = Q_1(\beta_4 - \beta_5)/[n(\beta_4 - \beta_1)]$<br>$Q_6 = nQ_5$<br>$Q_7 = Q_5 - Q_6$<br>$Q_2 = Q_3 = Q_1 + Q_7$<br>$Q_4 = Q_1 - Q_6$<br>$\beta_2 = (Q_1\beta_1 + Q_7\beta_7)/Q_2$   |

Методика розрахунку схеми подрібнення і вибір до неї обладнання наведено у додатку Е.

Вміст ( $\beta$ , %) розрахункових класів крупності в продуктах подрібнення в залежності від максимальної крупності зливів млинів, механічних класифікаторів і гідроциклонів ( $d_H$ , мм) для руд середньої подрібнюваності густиною 2,7 – 3,0 т/м<sup>3</sup> наведено в табл. 6.4.

**Таблиця 6.4 – Вміст ( $\beta$ , %) розрахункових класів крупності в продуктах подрібнення**

| Розрахунковий клас крупності, мм | Максимальна крупність зливів млинів, механічних класифікаторів і гідроциклонів ( $d_H$ , мм) |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
|----------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|                                  | 2,1  | 1,0      | 0,6<br>2 | 0,4<br>3 | 0,3<br>2 | 0,2<br>4 | 0,1<br>8 | 0,1<br>4 | 0,09<br>4 | 0,07<br>4 |
| – 0,2                            | 25,<br>0   | 46,<br>0 | 62,<br>0 | 75,<br>0 | 85,<br>0 | 92,<br>0 | 96,<br>0 | -        | -         | -         |
| – 0,074                          | 10,<br>0   | 20,<br>0 | 30,<br>0 | 40,<br>0 | 50,<br>0 | 60,<br>0 | 70,<br>0 | 80,<br>0 | 90,0      | 95,0      |
| – 0,040                          | 5,6  | 11,<br>3 | 17,<br>3 | 24,<br>0 | 31,<br>5 | 39,<br>5 | 48,<br>0 | 58,<br>0 | 71,5      | 80,5      |
| – 0,020                          | -  | -        | 9,0      | 13,<br>0 | 17,<br>0 | 22,<br>0 | 26,<br>0 | 35,<br>0 | 46,0      | 55,0      |

### 6.2.7 Вибір обладнання до схеми подрібнення

#### *Млини*

*Стержневі млини з центральним розвантаженням (МСЦ)* застосовують для мокрого грубого подрібнення різних матеріалів крупністю до 20 мм (іноді до 40 мм) з одержанням подрібненого продукту з максимальною крупністю 0,5 – 6 мм. Подрібнений продукт виходить одноманітним і рівномірним за крупністю і являє собою ідеальне живлення для кульових млинів. Стержневі млини звичайно працюють у першій стадії багатостадійних схем збагачення при направленні подрібненого продукту першої стадії в цикл збагачення (наприклад, у схемах збагачення магнетитових, олов'яних, вольфрамитових руд). Стержневі млини застосовують також у першій стадії подрібнення поліметалічних руд.

*Кульові млини з центральним розвантаженням (МШЦ)* застосовують для одержання тонкоподрібненого продукту з максимальної крупністю до 0,2 мм. Подрібнений продукт кульових млинів виходить рівномірним за крупністю. Щоб уникнути переподрібнення матеріалу, кульові млини звичайно використовують у замкненому циклі з гідроциклонами. Оптимальним живленням для млинів цього типу є подрібнений продукт стержневих млинів крупністю до 6 мм або інший аналогічний матеріал.

*Кульові млини з розвантаженням через решітки (МШР)* застосовують для одержання продукту з максимальною крупністю частинок до 0,4 мм. Оптимальні результати подрібнення у млинів цього типу одержують при живленні їх вихідним продуктом дробарок дрібного дроблення крупністю до 10 мм. У млини можна завантажувати і більш крупний матеріал (до 40 мм) при відповідному зниженні питомої продуктивності.

Млини типу МШР мають велику питому продуктивність у порівнянні з млинами типу МШЦ, але більш складні в конструктивному відношенні. Млини типу МШР застосовують у схемах переробки середньовкраплених руд і в першій стадії збагачення руд з агрегатним вкрапленням, які збагачують за багатостадійними схемами.

*Млини рудного само- і напівсамоподрібнення (ММС і МРГ)* використовують при переробці залізних, золотовмісних, мідномолібденових, алмазовмісних і інших руд.

При переробці золотовмісних руд з подальшим ціануванням включаються втрати золота з залізним скрапом і крихтою, знижується витрата ціаніду і поліпшуються умови праці на кварцових і силікоzone-безпечних рудах.

При флотації молібденових руд використання млинів цього типу дає приріст показників у зв'язку з меншим «назалізненням» лусочок молібденіту. З цієї причини рудногалькові млини можуть виявитися вигіднішими в циклі розділення колективних поліметалічних концентратів.

Живленням млинів мокрого самоподрібнення (ММС) є продукт дробарок крупного дроблення з розміром кусків до 400-500 мм. Подрібнений продукт залежно від крупності вихідного матеріалу, його фізичних властивостей і питомої продуктивності має крупність 0,2 – 25 мм.

Живленням рудногалькових млинів (МРГ), як правило, служить дроблений продукт млинів ММС. Подрібнений продукт млинів типу МРГ має крупність 0,5 – 0,1 мм і тоншу.

У зв'язку з підвищеною витратою електроенергії, у порівнянні з кульовими млинами, в останні роки знизилася кількість встановлення млинів самоподрібнення і рудногалькових. Млини сухого самоподрібнення на рудному матеріалі практично не застосовуються.

Продуктивність барабанних млинів розраховують за методом подібності, виходячи з практичних даних роботи млинів на подібній сировині при режимах, близьких до оптимального. Розрахунок роблять за *питомою продуктивністю* або за *ефективністю подрібнення*. При розрахунку враховують відмінності в подрібнюваності, крупності вихідного і подрібненого продуктів, розмірах і способі розвантаження млина (див. п. 3.5.2).

### Класифікатори і гідроциклони

На збагачувальних фабриках гідравлічні класифікатори використовують для замикання циклу подрібнення, знешламливання продуктів, розділення вихідного матеріалу перед збагаченням, зневоднення продуктів. З цією метою застосовують головним чином гідроциклони (ГЦ) і класифікатори спіральні з незануреною спіраллю (КСН).

Спіральні класифікатори найчастіше використовують у замкнених циклах подрібнення для одержання готового за крупністю продукту, що направляється на збагачення, рідше їх використовують для відмивання глинистих матеріалів, а також для зневоднення зернистих продуктів.

Продуктивність класифікатора визначається з використанням емпіричних формул:

по зливу:

$$Q_C = 4,56 m k_\beta k_\delta k_c k_\alpha D^{1,768}, \text{ т/ГОД}; \quad (6.25)$$

по пісках:

$$Q_{II} = 5,45 m k_\delta k_\alpha D^3 n, \text{ т/ГОД}, \quad (6.26)$$

де  $m$ ,  $D$ ,  $n$  – число, діаметр (м) і частота обертання спіралей (хв<sup>-1</sup>);  $k_\beta$ ,  $k_\delta$ ,  $k_c$ ,  $k_\alpha$  – коефіцієнти, що враховують відповідно крупність зливу, густину руди, розрідженість зливу і кут нахилу ванни класифікатора.

Коефіцієнт крупності зливу  $k_\beta$ , визначають за даними табл. 6.5.

**Таблиця 6.5 – Коефіцієнт  $k_\beta$ , що враховує крупність зливу**

|  |                   |          |          |          |          |          |          |          |          |      |
|--|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| Номинальна крупність зливу $d_{95}$ , мм |                   | 1,1      | 0,8      | 0,5      | 0,4      | 0,3      | 0,2      | 0,1      | 0,1      | 0,07 |
|  |                   | 7        | 3        | 9        | 2        | 0        | 1        | 5        | 0        | 4    |
| Вміст у зливі класів, %                  | – 0,074 мм        | 17       | 23       | 31       | 41       | 53       | 65       | 78       | 88       | 95   |
|  | – 0,045 мм        | 11       | 15       | 20       | 27       | 36       | 45       | 50       | 72       | 83   |
| Базисна розрідженість                    | $R_{2,7} = P : T$ | 1,3      | 1,5      | 1,6      | 1,8      | 2,0      | 2,3<br>3 | 4,0      | 4,5      | 5,7  |
| Розрідженість зливу                      | % твердого        | 43       | 40       | 38       | 36       | 33       | 30       | 20       | 18       | 16,5 |
| Коефіцієнт $k_\beta$                     |                   | 2,5<br>0 | 2,3<br>7 | 2,1<br>9 | 1,9<br>6 | 1,7<br>0 | 1,4<br>1 | 1,0<br>0 | 0,6<br>7 | 0,46 |

Коефіцієнт густини руди враховує розбіжності в густині базисної руди і руди, яка надходить на класифікацію; він визначається за формулою:

$$k_{\delta} = \delta / 2,7, \quad (6.27)$$

де  $\delta$  – об’ємна густина руди, т/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт розрідженості зливу  $k_c$  враховує розбіжності між заданою розрідженістю ( $R$ ) і базисною ( $R_{2,7}$ ) для даної крупності зливу. Величина коефіцієнта  $k_c$  залежно від густини руди і співвідношення розрідженостей  $R$  і  $R_{2,7}$  наведена в табл. 6.6.

**Таблиця 6.6 – Коефіцієнт, що враховує розрідженість зливу  $k_c$**

| Густина руди $\delta$ ,<br>т/м <sup>3</sup> | Співвідношення $R : R_{2,7}$ |      |      |      |      |      |      |
|---|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 0,4                          | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,5  | 2,0  |
|   | Коефіцієнт $k_c$             |      |      |      |      |      |      |
| 2,7   | 0,60                         | 0,73 | 0,86 | 1,00 | 1,13 | 1,33 | 1,67 |
| 3,0   | 0,63                         | 0,77 | 0,93 | 1,07 | 1,23 | 1,44 | 1,82 |
| 3,3   | 0,66                         | 0,82 | 0,98 | 1,15 | 1,31 | 1,55 | 1,97 |
| 3,5   | 0,68                         | 0,85 | 1,02 | 1,20 | 1,37 | 1,63 | 2,07 |
| 4,0   | 0,73                         | 0,92 | 1,12 | 1,32 | 1,52 | 1,81 | 2,32 |
| 4,5   | 0,78                         | 1,00 | 1,22 | 1,45 | 1,66 | 1,99 | 2,56 |
| 5,0   | 0,83                         | 1,07 | 1,32 | 1,57 | 1,81 | 2,18 | 2,81 |

Коефіцієнт кута нахилу ванни класифікатора  $k_{\alpha}$  визначається за табл. 6.7.

**Таблиця 6.7 – Коефіцієнт кута нахилу ванни класифікатора  $k_{\alpha}$**

|                              |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Кут нахилу $\alpha$ , градус | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
| Коефіцієнт $k_{\alpha}$      | 1,12 | 1,10 | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 0,97 | 0,94 |

Спіральні класифікатори в порівнянні з гідроциклонами менше витрачають електроенергії, можуть класифікувати більш крупний матеріал, мають більш тривалі міжремонтні періоди. Основний їхній недолік – висока вартість, менша питома продуктивність та ефективність, великі габаритні розміри. З цієї причини при проектуванні збагачувальної фабрики для встановлення рекомендуються гідроциклони.

*Гідроциклони* застосовуються для операцій класифікації за крупністю і знешламливання продуктів подрібнення та дрібного вугілля. Вони використовуються також для згущення пульпи і збагачення. На збагачувальних фабриках використовують головним чином циліндроконічні гі-



дроциклони малих типорозмірів з кутом конусності  $10^\circ$  і великі типорозміри з кутом конусності  $20^\circ$ . Гідроциклони малих діаметрів працюють з відносно високим тиском, великих діаметрів – з низьким тиском.

Об’ємна продуктивність гідроциклонів визначається за формулою:

$$Q_o = 3 \cdot 10^4 k_\alpha k d_{жс} d_{зл} p_o^{0,5}, \text{ м}^3/\text{Год}, \quad (6.28)$$

де  $k_\alpha$  – поправка на кут конусності  $\alpha$  гідроциклона (при  $\alpha = 10^\circ$   $k_\alpha=1,15$ ; при  $\alpha = 20^\circ$   $k_\alpha=1,0$ );  $k$  – виправлення на діаметр гідроциклона визначаються за формулою:

$$k = 0,8 + 1,2 / (1 + 10 D), \quad (6.29)$$

де  $D$  – діаметр гідроциклона, м;  $d_{жс}$  – еквівалентний діаметр живильного отвору:

$$d_{жс} = (4bh/\pi)^{0,5}, \text{ м}, \quad (6.30)$$

$d_{зл}$  – діаметр зливного патрубк, м;  $p_o$  – тиск пульпи на вході в гідроциклон, МПа;  $b, h$  – розміри живильного отвору, м.

При виборі гідроциклона його типорозмір визначають виходячи з необхідної продуктивності по живленню, з врахуванням крупності одержуваного зливу. Номінальна крупність частинок зливу  $d_H$  гідроциклонну може бути визначена:

$$d_H = 15 \left\{ D d_{зл} \beta / [k d_n p_o^{0,5} (\delta - 1)] \right\}^{0,5}, \text{ мкм}, \quad (6.31)$$

де  $\beta$  – вміст твердого в живленні гідроциклона, %;  $d_n$  – діаметр піскового патрубк, м;  $\delta$  – об’ємна густина твердої фази, т/м<sup>3</sup>; інші позначення див. вище.

Продуктивність гідроциклона по твердому можна визначити за емпіричною формулою:

$$Q = 200 D^2, \text{ т/Год}. \quad (6.32)$$

Вибираючи гідроциклон, треба прагнути до встановлення мінімального числа апаратів, які забезпечують необхідну крупність частинок зливу.

Обраний гідроциклон повинен бути перевірений на продуктивність по пісках  $Q_n$ . Питома продуктивність гідроциклона по пісках  $q_n$ , що проходять через піскову насадку обраного розміру  $d_n$ , становить:

$$q_n = Q_n / (0,785n d_n^2), \text{ т/год} \cdot \text{м}^2, \quad (6.33)$$

де  $Q_n$  – продуктивність гідроциклонів по пісках, т/год;  $n$  – число обраних в операції гідроциклонів.

Нормована питома продуктивність вибраного гідроциклона повинна складати  $5 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^4$  т/год  $\cdot$  м<sup>2</sup>. Якщо питома продуктивність не входить у зазначений інтервал, необхідно прийняти нову насадку і перевірити номінальну крупність зливу при новому діаметрі насадки  $d_n$ .

Технічні характеристики спіральних класифікаторів з незануреною спіраллю і гідроциклонів наведені у додатку Г.

## 6.2.8 Компонувальні рішення відділень подрібнення

Залежно від схеми подрібнення, типу і числа млинів у секції (стержневі, кульові, рудно-галькові, рудного самоподрібнення), класифікаційного обладнання, грохотів і (в окремих випадках) дробарок, необхідної площі для розміщення збагачувальних апаратів (флотаційних машин, сепараторів і т.п.), а також рельєфу і ґрунтових умов площадки будівництва фабрики може застосовуватися однорядне або дворядне компонування з поперечним, подовжнім або змішаним розташуванням млинів.

Відділення подрібнення, як правило, компонують в одному прольоті шириною 12 – 36 м, обладнаним мостовим краном вантажопідйомністю 30 – 50 т. Оптимальне компонувальне рішення секцій подрібнення і усього відділення подрібнення в цілому приймається на основі техніко-економічного порівняння конкуруючих варіантів.

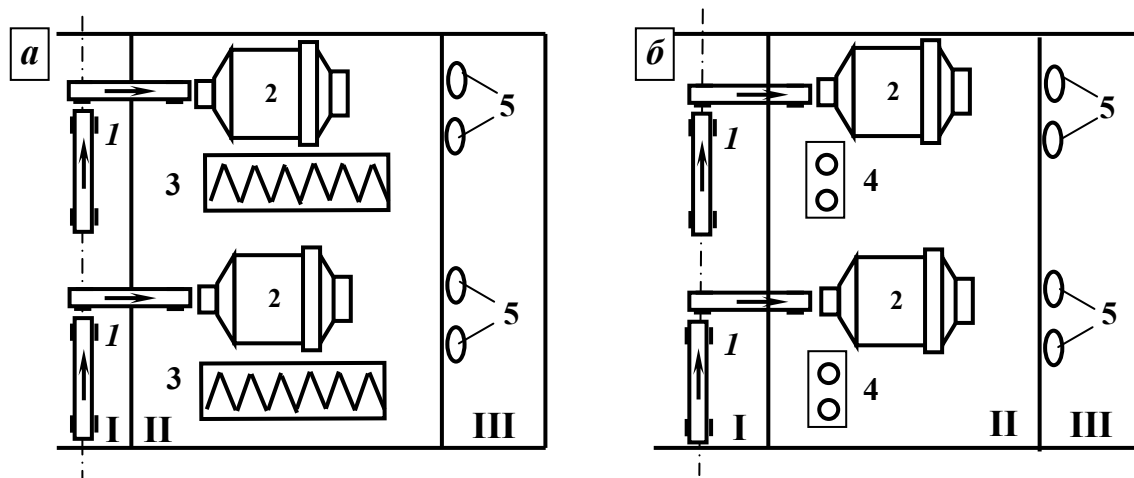
На рис. 6.11 показано схеми однорядного компонування млинів у секціях при одностадійному подрібненні.

При одностадійному подрібненні осі млинів перпендикулярні осі бункера дрібнодробленої руди. Млини працюють у замкненому циклі або зі спіральними класифікаторами (рис. 6.11 *а*), або з гідроциклонами (рис. 6.11 *б*).

На розвантажувальній горловині млинів передбачені бутари для вловлювання скрапу куль і найбільш крупних класів руди. Переваги компонувальних рішень з однорядним розташуванням млинів при одностадійному подрібненні полягають у їхній простоті, невеликій ширині прольоту подрібнення, зручності обслуговування і ремонту.

Однак перевагу варто віддати схемі з застосуванням гідроциклонів, тому що класифікатори громіздкі і займають багато місця в прольоті подрібнення. Схеми зі спіральними класифікаторами сьогодні застосовуються рідко і тільки на фабриках малої й середньої продуктивності.

На збагачувальних фабриках великої продуктивності застосовуються тільки схеми з гідроциклонами.

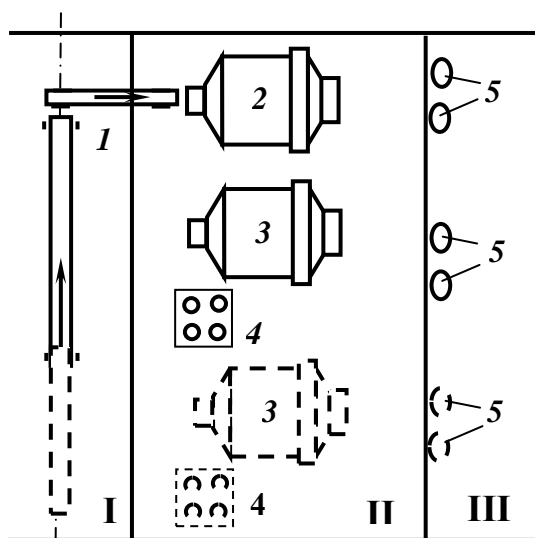


**Рис. 6.11 – Схема однорядного компоунання млинів у секціях при одностадійному подрібненні:**

**I – бункерний прогін; II – відділення подрібнення; III – насосна галерея.  
1 – стрічкові конвеєри; 2 – млини; 3 – спіральні класифікатори;  
4 – гідроциклони; 5 – насоси.**

Схема однорядного компоунання млинів у секціях при двостадійному подрібненні показана на рис. 6.12.

Як і в попередніх схемах однорядного компоунання, у розглянутій схемі осі млинів також перпендикулярні осі розподільного бункера дрібнодробленої руди.



**Рис. 6.12 – Схема однорядного компоунання млинів у секціях при двостадійному подрібненні:**

**I – бункерний прогін; II - відділення подрібнення; III – насосна галерея;  
1 – стрічкові конвеєри; 2 – стержневий млин першої стадії подрібнення;  
3 – кульовий млин другої стадії подрібнення; 4 – гідроциклони;  
5 – насоси.**

При двостадійному подрібненні звичайно в першій стадії застосовується стержневий млин, який працює у відкритому циклі, а в другій стадії – один або два кульових млини, які працюють у замкненому циклі

з гідроциклонами. При подрібненні твердих руд у розвантаженні стержневого млина може виявитися багато крупних класів, у цьому випадку класифікація виконується за два прийоми: на дугових ситах і далі у гідроциклонах.

При двостадійному подрібненні може виявитися раціональним дворядне розташування млинів (рис. 6.13).

*Стержневі млини з центральним розвантаженням (МСЦ)* застосовують для мокрого грубого подрібнення різних матеріалів крупністю до 20 мм (іноді до 40 мм) з одержанням подрібненого продукту з максимальною крупністю 0,5 – 6 мм.

Подрібнений продукт виходить одноманітним і рівномірним за крупністю і являє собою ідеальне живлення для кульових млинів. Стержневі млини звичайно працюють у першій стадії багатостадійних схем збагачення при направленні подрібненого продукту першої стадії в цикл збагачення (наприклад, у схемах збагачення магнетитових, олов'яних, вольфрамітових руд).

Стержневі млини застосовують також у першій стадії подрібнення поліметалічних руд.

У першій схемі (рис. 6.13 *а*) на один стержневий млин першої стадії встановлюють два млини другої стадії. При цьому вісь стержневого млина паралельна осі розподільних бункерів, а осі кульових – перпендикулярні. Схеми застосовуються на багатосекційних збагачувальних фабриках. Перевага цієї схеми – компактність.

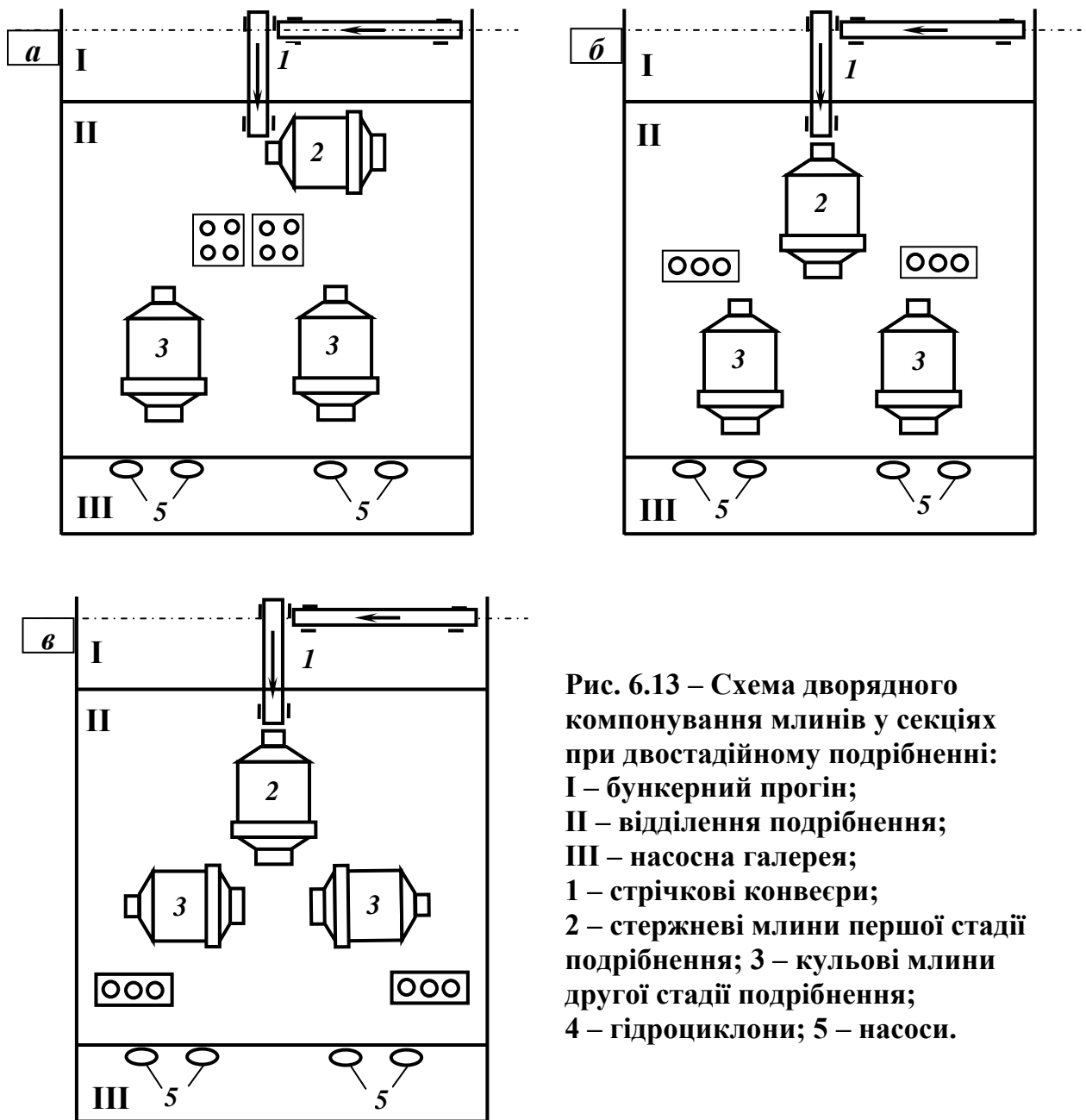
Друга схема (рис. 6.13 *б*) аналогічна попередній, але в цьому випадку осі всіх млинів перпендикулярні осі розподільного бункера. Недолік схеми – великі вільні площі по обидва боки стержневого млина.

У третій схемі (рис. 6.13 *в*) використане Т-подібне компонування млинів: вісь стержневого млина перпендикулярна осі розподільних бункерів, а осі кульових – паралельні.

Розвантаження всіх млинів повернено до центра вузла для зручності збору матеріалу в зумпф насоса і подачі його в гідроциклон. Для збагачувальних фабрик з однією секцією подрібнення Т-подібне компонування визнане найбільш доцільним.

Проектно-компонувальні рішення відділень подрібнення з млинами типу «Каскад» включають вузли класифікації, грохочення, дроблення і, при необхідності, виділення гальки.

Відділення подрібнення з млинами типу «Каскад» при одностадійній схемі подрібнення компонують за однорядною поперечною схемою.

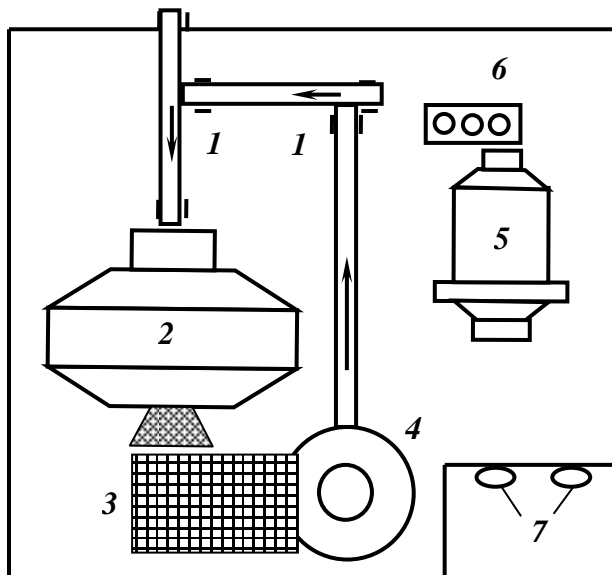


**Рис. 6.13 – Схема дворядного компонування млинів у секціях при двостадійному подрібненні:**  
 I – бункерний прогін;  
 II – відділення подрібнення;  
 III – насосна галерея;  
 1 – стрічкові конвеєри;  
 2 – стержневі млини першої стадії подрібнення; 3 – кульові млини другої стадії подрібнення;  
 4 – гідроциклони; 5 – насоси.

При двостадійній схемі з подрібненням розвантаження млинів першої стадії в кульових млинах (або рудно-галькових) можливо змішане дворядне розташування агрегатів. Найбільш розповсюджений варіант компонування – однорядне розташування млинів обох стадій подрібнення в одному прольоті (рис. 6.14).

Млини самоподрібнення завантажуються крупнодробленою рудою зі складу. Виключення з головного корпусу бункерів дрібнодробленої руди і створення єдиного запасу руди в складі приводить до істотного зниження капітальних витрат на будівництво.

Матеріал, що розвантажується з млина, звичайно піддається грохоченню для виділення кусків крупніших 10 мм. При необхідності з нього виділяється крупна галька, яка використовується як молольне середовище при рудно-гальковому подрібненні.



**Рис. 6.14 – Схема компонування відділення подрібнення з млинами типу «Каскад»:**

**1 – стрічкові конвесри; 2 – млин самоподрібнення з бутарою; 3 – грохот вібраційний; 4 – конусна дробарка; 5 – кульовий млин; 6 – гідроциклони; 7 – насоси.**

Підрешітний продукт грохочення насосами подається на двоступі-нчасту класифікацію в гідроциклонах або на дугових ситах і в гідроцик-лонах. Надрешітний продукт грохочення дробиться в конусній дробарці і повертається в млин.

## 7 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 7.1 Діяння людини на природу

В процесі своєї діяльності людина завжди впливала на природу. В сучасних умовах розвиток галузей промисловості, що пов'язані з добуванням і збагаченням корисних копалин, є основою технічного прогресу. При добуванні корисних копалин людина проникає у надра Землі і тим змінює навколишнє середовище, втручається у природні процеси, що відбуваються на Землі. Сучасна техніка зробила людину такою могутньою, що природа в багатьох випадках поступається їй у здатності змінювати ландшафт і рельєф поверхні. Кар'єри довжиною до 10 км і глибиною до 1000 м, «гори» породних відвалів, терикони біля шахт, басейни-сховища дрібних відходів площею у декілька квадратних кілометрів – все це результат людської діяльності. У процесі сушіння продуктів збагачення, металургійної і хімічної переробки руд і концентратів утворюються димові гази, що містять тверді частинки, оксиди сірки, вуглецю, азоту, тому у атмосферу вони повинні випускатись тільки після очищення.

Внаслідок переміщення великих об'ємів гірничої маси погіршується режим ґрунтових і підземних вод, змінюється поверхневий водостік і структура ґрунту, інтенсифікується ерозійна робота води і вітру, що в деяких випадках спричиняє зміну клімату в районі ведення гірничих робіт.

Значна частка водних запасів держави використовується для технічних потреб. Величезні об'єми водоспоживання висувають проблему збереження якості води у водоймах і раціонального використання водних ресурсів в ряд найбільш актуальних. Збільшення водоспоживання приводить до росту об'єму стічних вод і забруднення водойм. Крім того, на збагачувальних фабриках як реагенти застосовують ксантогенати, ціаніди, нафтопродукти та інші хімічні речовини. Складність і мінливість стічних вод збагачувальних фабрик, їх висока токсичність, переважний вміст розчинених речовин вимагають застосування хімічних, фізико-хімічних і біологічних методів очищення стоків.

Під охороною навколишнього середовища розуміють сукупність державних, адміністративних, правових, економічних, політичних і суспільних заходів, які спрямовані на раціональне використання, відтворення і збереження природних ресурсів землі.

## 7.2 Шкідливі діяння підготовчих процесів на навколишнє середовище

Характерною особливістю збагачувальних фабрик є велика насиченість обладнанням, робота якого супроводжується шумом і вібраціями, викидами газу і пилу, забрудненням прилеглих земель і водних джерел.

*Шум* підвищеного рівня несприятливо діє на організм людини. Ступінь цієї дії залежить від характеристики шуму та індивідуальних особливостей людини. Шум діє не тільки на органи слуху, але й на нервову систему, спричиняє підвищення кров'яного тиску, ослаблення уваги, приводить до зниження продуктивності праці і підвищення рівня травматизму.

Існуючими нормативами передбачається гранично допустимий рівень звуку – 85 дБ. Рівень звукового тиску на частотах 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц не повинен перевищувати відповідно 99, 92, 86, 83, 80, 78,76, 74 дБ. Нормується також *вібраційна швидкість*, яка на частотах 16, 32, 63, 250 Гц повинна відповідати 0,0015, 0,0022, 0,0027, 0,0035 м/с. При тривалості дії вібрації не більше 20 % робочого часу допускається збільшення вібраційної швидкості в 1,5 рази.

*Основні види забруднюючих речовин*, які викидаються збагачувальними фабриками в атмосферу – пил, сірчистий ангідрид, оксиди вуглецю, азоту, сірководень.

Об'єктами викиду шкідливих речовин являються аспіраційні системи дробарок, грохотів, конвеєрів, котельні і сушарні агрегати, склади корисних копалин і продуктів збагачення, породні відвали.

Надходження сполук сірки і азоту в атмосферу є головною причиною кислотних опадів, які завдають шкоди будівлям, пам'ятникам і металевим конструкціям, викликають дигресію і загибель лісів, знижують урожай багатьох сільськогосподарських культур, погіршують родючість ґрунтів, що мають кислу реакцію, і стан водних екосистем.

В процесі механізованого видобутку корисної копалини утворюється багато пилу.

Транспортування і переробка корисної копалини на збагачувальних фабриках супроводжується додатковим пилоутворенням, що є джерелом виділення пилу всередині промислових приміщень і у атмосферу. Пил, що знаходиться у завислому стані, негативно впливає на здоров'я працівників і при визначених концентраціях може створювати вибухонебезпечні пилоповітряні суміші. Пил, який викидається у атмосферу, забруднює повітря прилеглих населених пунктів і являє собою також безповоротні втрати корисної копалини.

Класифікація пилу та інших шкідливих речовин за ступенем дії на організм людини наведені у табл. 7.1.



**Таблиця 7.1 – Класифікація пилу та інших шкідливих речовин за ступенем дії на організм людини**

| Пил            | Надзвичайно небезпечний | Дуже небезпечний | Помірно небезпечний | Мало-небезпечний |
|----------------|-------------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Клас небезпеки | 1                       | 2                | 3                   | 4                |

Вугільний, сланцевий і кварцовий пил належать до четвертої мало-небезпечної групи.

Вміст пилу у робочих зонах, де постійно або тимчасово знаходяться працівники не повинен перевищувати 3 або 4 класу небезпеки, що відповідає гранично допустимим концентраціям (ГДК), які наведені у табл. 7.2.

**Таблиця 7.2 – ГДК пилу у робочій зоні промислових приміщень збагачувальних фабрик**

| Пилоутворюючі матеріали | Вміст вільного кристалічного кремнезему, % | ГДК пилу у повітрі, мг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------|--|---------------------------------------|
| Порода                  | > 70                                       | 1                                     |
| Порода                  | 10 – 70                                    | 2                                     |
| Силікати                | > 10                                       | 4                                     |
| Барит, апатит, фосфорит | < 10                                       | 6                                     |
| Штучні абразиви         | 0  | 5                                     |
| Цемент, глини           | 0  | 6                                     |
| Вугілля                 | > 10                                       | 2                                     |
| Вугілля                 | < 10                                       | 4                                     |
| Вугілля                 | 0  | 10                                    |
| Кокс, вапняк            | 1,7 – 4,5                                  | 6                                     |

У цехах дроблення пил утворюється в місцях завантаження матеріалу у дробарки і розвантаження дробленого продукту з дробарок, на грохотах при сухому грохоченні і при перевантаженні сухого зернистого матеріалу з конвеєра на конвеєр. Для того щоб дотриматися норми запиленості усі ці місця герметизуються і з захисних засобів відсмоктується запилене повітря, яке після очищення від пилу викидається в атмосферу. Іноді застосовується зрошення матеріалу при розвантаженні з

вагонів, у дробарках і на грохотах в межах, що допускаються технологічним процесом.

Пилоповітряні суміші при визначених умовах можуть бути вибуховими. *Вибуховість* вугільних і сланцевих пилів залежить від їхньої крупності (табл. 7.3), зольності, вмісту летких речовин, концентрації у пилогазових сумішах, наявності в них кисню або іншого активного газу, вмісту леткої сірки, вологості суміші.

**Таблиця 7.3 – Класифікація пилу за крупністю**

| Вид пилу       | Крупний   | Дрібний  | Тонкий   | Надтонкий |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|
| Крупність, мкм | 100 – 500 | 10 – 100 | 0,1 – 10 | Менше 0,1 |

Ступінь вибуховості пилу (табл. 7.4) характеризується коефіцієнтом вибуховості:

$$K_g = 100(V^r + S_t^r) / [(NV)_c^r + W_t^r + A^r], \% \quad (7.1)$$

де  $K_g$  – коефіцієнт вибуховості, %;  $V^r$  – вихід летких речовин, %;  $S_t^r$  – вміст леткої сірки, %;  $(NV)_c^r$  – нелеткий осад робочої маси твердого, %;  $W_t^r$  – гігроскопічна вологість пилу, %;  $A^r$  – вміст золи на робочу масу, %.

Вибуховість пилу збільшується при збільшенні виходу летких речовин і знижується при підвищенні вологості і зольності.

Можливість вибуху пилоповітряної суміші визначається її концентрацією: небезпечною по вибуху концентрацією пилу є 112 – 500 г/м<sup>3</sup>, при концентрації більше 1500 г/м<sup>3</sup> і менше 30 г/м<sup>3</sup> вугільний пил не вибухає.

Чим менше крупність пилу, тим при меншій його концентрації може відбутися вибух. Найбільш вибухонебезпечним є пил крупністю 70 – 100 мкм.

**Таблиця 7.4 – Групи вибуховості пилу**

| Клас вибуховості пилу       | Номер групи | $K_g$   |
|-----------------------------|-------------|---------|
| Безпечний по вибуху         | 0           | 0 – 10  |
| Мало вибухонебезпечний      | I           | 10 – 25 |
| Середньо вибухонебезпечний  | II          | 25 – 35 |
| Підвищено вибухонебезпечний | III         | 35 – 50 |
| Особливо вибухонебезпечний  | IV          | 50 – 80 |

*Діяння пилу на організм людини* найбільше позначається на органі дихання, особливо якщо крупність частинок перевищує 10 – 15 мкм. При вдиханні такого пилу разом з повітрям частинки затримуються у верхніх дихальних шляхах і спричиняють їх роздратування і навіть запалення. Найбільш шкідливими є частинки крупністю 1 – 5 мкм, які при потраплянні у легені сприяють ущільненню легеневої тканини і виникненню пневмоконіозу. Найбільш шкідливий у цьому відношенні кварцовий пил з вмістом  $SiO_2$  більше 10 %. Людина, яка працює протягом 10 і більше років у середовищі вугільного пилу може захворіти одним з різновидів пневмоконіозу – антракозом.

Гостро-негативно діє пил і на очі та шкіру: тонкий пил сприяє запаленню роговиці очей, а крупний пил може спричинити механічні ушкодження очей.

### **7.3 Заходи боротьби з шкідливими діяннями у підготовчих цехах збагачувальних фабрик**

*Нейтралізація шуму* на збагачувальних фабриках здійснюється заходами загального і індивідуального характеру. Заходи загального характеру передбачають заміну машин або окремих вузлів з високим рівнем шуму на безшумні; надійну звукоізоляцію джерел шумоутворення; дистанційне управління роботою машин; використання гуми для футеровки і для прокладок. Заходи індивідуального характеру включають використання заглушок і навушників при роботі з машинами з високим рівнем шуму.

*Виникнення вібрації* запобігається установленням машин, що спричиняють вібрації, на спеціальні фундаменти з віброізоляцією і на фундаменти не зв'язані з будовою фабрики. Для віброізоляції застосовують прокладки з гуми, повсті, пробки, дерева, а також пружини.

На збагачувальних фабриках для *боротьби з пилом* проводять такі заходи:

- зменшення пилоутворення у процесах переробки корисних копалин за рахунок: зменшення пунктів перевантаження при транспортуванні і висоти падіння, застосування способів дроблення і грохочення, які не сприяють значному пилоутворенню;
- захист місць пилоутворення і відсмоктування повітря з цих місць;
- застосування закритих жолобів і конвеєрів при транспортуванні корисних копалин;
- зрошення місць утворення пилу або обробка їх паром;
- зменшення швидкості руху повітря в місцях утворення пилу;
- попереднє знепилення корисних копалин;

– облаштування місцевої витяжної і загальнообмінної вентиляції.

Захисні засоби дробарок в більшості випадків передбачають відсмоктування запиленого повітря при завантаженні вихідного матеріалу і вивантаженні дробленого продукту.

Захисні засоби грохотів передбачають відсмоктування запиленого повітря з декількох точок: зверху відсмоктування запиленого повітря виконується у точці завантаження матеріалу на грохот, знизу відсмоктування запиленого повітря здійснюють з піддону, також відсмоктування запиленого повітря здійснюється в місці падіння матеріалу з грохота на конвеєр.

Місця завантаження і розвантаження бункерів, де виділяється велика кількість пилу, повинні бути обладнані захисними засобами з відсмоктуванням пилу.

Шнеки, живильники змішувачі та інші апарати, що мають герметичні покриття, додаткових захисних засобів не потребують, але при завантаженні і розвантаженні матеріалу необхідно передбачити відсмоктування пилоповітряної суміші.

Захист збагачувального і транспортного обладнання має велике значення для успішної боротьби з пилоутворенням у промислових приміщеннях збагачувальних фабрик. Герметизація захисних пристроїв за рахунок застосування гумових і повстяних прокладок в місцях з'єднань їхніх окремих частин гарантує на 80 – 90 % усунення можливості проникнення пилу за межі захисних пристроїв.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Технічні характеристики дугових і конічних грохотів

| Параметр                            | Дугові грохоти |       |       | Конічні грохоти |       |       |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|                                     | СД-1           | СД-2  | СДО-3 | ГК-1,5          | ГК-3  | ГК-6  |
| Площа сит, м <sup>2</sup>           | 0,95           | 1,9   | 3,0   | 1,5             | 3,0   | 6,0   |
| Ширина щілини, мм                   | 0,5-3          | 0,5-2 | 0,5   | 0,5-1           | 0,5-1 | 0,5-1 |
| Крупність вихідного матеріалу, мм   | До 6           | До 6  | 8-10  | До 25           | До 35 | До 50 |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /час | 200            | 400   | 500   | 150             | 250   | 500   |
| Габарити, мм:                       |                |       |       |                 |       |       |
| довжина                             | 830            | 1440  | 1850  | 1800            | 3030  | 3600  |
| ширина                              | 1350           | 1170  | 1415  | 1412            | 2565  | 3100  |
| висота                              | 1880           | 1960  | 2860  | 1240            | 1460  | 1600  |
| Маса, т                             | 0,3            | 0,5   | 0,836 | 1,14            | 2,15  | 2,7   |

#### Технічні характеристики гідрогрохотів

| Параметр   | Гідрогрохоти |        |         |         |
|--|--------------|--------|---------|---------|
|  | ГГЛ          | ГГЛ 3  | ГГН 2,7 | КПУ 800 |
| Площа просіюючої поверхні, м <sup>2</sup>          | 4,2          | 4,2    | 2,7     | 9,5     |
| Кут нахилу короба, град                            | 23           | 23     | 23      | 23      |
| Максимальна крупність живлення, мм                 | 300          | 300    | 300     | 300     |
| Вологість вугілля в живленні, %                    | Не обмежена  |        |         |         |
| Розмір щілини колосникових сит, мм                 | 5 – 18       | 5 – 18 | 5 – 18  | 5 – 18  |
| Максимальна питома витрата води, м <sup>3</sup> /т | 1,5          | 1,5    | 1       | 1       |
| Тиск води, на менше, МПа                           | 0,1          | 0,1    | 0,1     | 0,1     |
| Продуктивність по рядовому вугіллю, т/год          | 800          | 800    | 500     | 800     |
| Габарити, мм:                                      |              |        |         |         |
| довжина  | 4735         | 5425   | 5550    | 8420    |
| ширина   | 1920         | 1920   | 1670    | 2950    |
| висота   | 3250         | 4585   | 4300    | 6100    |
| Маса грохота, т                                    | 5,2          | 8,1    | 6,5     | 13,8    |

### Технічні характеристики шнекових грохотів

| Параметр                                      | Шнекові грохоти               |         |
|---|-------------------------------|---------|
|   | ГШ 500                        | ГШ 1000 |
| Продуктивність, т/год                         | 500                           | 1000    |
| Питома продуктивність, т/год·м <sup>2</sup>   | 56                            | 111     |
| Максимальна крупність вихідного матеріалу, мм | 300                           | 400     |
| Вологість вихідного матеріалу, %              | Без обмежень                  |         |
| Ефективність грохочення, %                    | 90                            | 95      |
| Ширина щілини, мм                             | до 300                        | до 400  |
| Кут нахилу робочої решітки, град              | 0                             | 0       |
| Довжина валу шнека, мм                        | 1500                          | 1500    |
| Форма валу                                    | Циліндричний двозахідний шнек |         |
| Площа робочої поверхні, м <sup>2</sup>        | 2000                          | 2000    |
| Ширина робочої поверхні, м                    | 9                             | 9       |
| Висота перепаду між каскадами, мм             | 600                           | 600     |
| Частота обертання шнеків, хв <sup>-1</sup>    | 475                           | 475     |
| Швидкість транспортування гірничої маси, м/с  | 0,57                          | 1,04    |
| Потужність приводу, кВт                       | 6x75                          | 6x10    |
| Маса грохота з приводом, т                    | 7,0                           | 11,6    |

### Технічна характеристика грохота ГЕДП

| Параметр                                  | ГЕДП 52 |
|---|---------|
| Продуктивність, т/год                     | До 300  |
| Максимальна крупність живлення, мм        | 300     |
| Число сит                                 | 2       |
| Площа сит, м <sup>2</sup>                 | 7,9     |
| Розміри чарунок сита, мм                  |         |
| верхнього (металічного)                   | 25x25   |
| нижнього (гумового)                       | 8; 7x25 |
| Відстань між опорами нижнього сита, мм    | 250     |
| Кут нахилу грохота, град                  | 10 – 25 |
| Частота коливань короба, хв <sup>-1</sup> | 12,2    |
| Амплітуда коливань, мм                    |         |
| короба                                    | 4       |
| рами                                      | 10      |
| Габарити, мм:                             |         |
| довжина                                   | 4820    |
| ширина                                    | 2630    |
| висота                                    | 2500    |
| Маса грохота, т                           | 7,2     |

### Технічні характеристики барабанних і циліндричних грохотів

| Параметр                                     | Грохоти            |       |       |                |                  |
|--|--------------------|-------|-------|----------------|------------------|
|  | барабанні і бутари |       |       | циліндричні    |                  |
|  | ГБ 1,5             | О-82  | О-89  | ГЦЛ-1          | ГЦЛ-2            |
| Розміри барабана, мм:                        |                    |       |       |                |                  |
| діаметр                                      | 1500               | 1500  | 1330  | 1200           | 1700             |
| довжина                                      | 4200               | 4200  | 8300  | 1500           | 2500             |
| Ширина щілини між витками, мм                | -                  | -     | -     | 50; 70;<br>100 | 100; 150;<br>200 |
| Кут нахилу осі барабана до горизонту, град   | 3 – 8              | до 10 | 3     | 8              | 8                |
| Частота обертання барабана, хв <sup>-1</sup> | 10                 | 10    | 16    | 11             | 9,26             |
| Максимальна крупність грудок у живленні, мм  | 350                | 300   | 300   | 250            | 500              |
| Витрата води, м <sup>3</sup> /т              | 4 – 6              | 4 – 6 | 4 – 8 | -              | -                |
| Максимальна продуктивність, т/год            | 90                 | 150   | 75    | 400            | 1000             |
| Потужність електродвигуна, кВт               | 5,5                | 7,0   | 28,0  | 4,5            | 7,5              |
| Габарити, мм:                                |                    |       |       |                |                  |
| довжина                                      | 5385               | 4750  | 8780  | 3750           | 5700             |
| ширина                                       | 2205               | 2800  | 3000  | 1750           | 2000             |
| висота                                       | 2090               | 2670  | 2230  | 2400           | 3460             |
| Маса грохота, т                              | 5,2                | 7,5   | 12,6  | 3,2            | 9                |

### Технічні характеристики інерційних грохотів легкого і середнього типу

| Параметр                           | Грохоти легкого типу |           |         |         | Грохоти середнього типу |         |
|------------------------------------|----------------------|-----------|---------|---------|-------------------------|---------|
|                                    | ГЛ 32                | ГЛ 42     | ГЛ 43   | ГЛ 52   | ГС 42                   | ГС 52   |
| Площа сита, м <sup>2</sup>         | 3,1                  | 5,4       | 5,4     | 7,9     | 5,4                     | 7,9     |
| Число сит                          | 2                    | 2         | 3       | 2       | 2                       | 2       |
| Кут нахилу короба, град            | 10 – 25              | 10 – 25   | 10 – 25 | 10 – 25 | 10 – 25                 | 10 – 25 |
| Частота коливань, хв <sup>-1</sup> | 1150                 | 900; 1000 | 970     | 870     | 900                     | 900     |
| Амплітуда коливань, мм             | 2,5                  | 3; 3,5    | 2,5     | 2,5; 3  | 4,5                     | 3,7     |
| Розмір отворів сит, мм             | 3 – 25               | 6 – 50    | 6 – 50  | 6 – 100 | 6 – 50                  | 6 – 100 |
| Потужність електродвигуна, кВт     | 4,0                  | 7,5       | 7,5     | 7,5     | 10,0                    | 15,0    |
| Продуктивність, т/год              | 100                  | 180       | 200     | 250     | 230                     | 320     |
| Габарити, мм:                      |                      |           |         |         |                         |         |
| довжина                            | 3077                 | 4295      | 4265    | 5050    | 4500                    | 5300    |
| ширина                             | 1674                 | 2860      | 2770    | 3110    | 2150                    | 2700    |
| висота                             | 1640                 | 2710      | 2660    | 2910    | 1290                    | 1300    |
| Маса грохота, т                    | 1,5                  | 3,1       | 4,0     | 3,5     | 3,3                     | 3,8     |

### Технічні характеристики інерційних грохотів важкого типу

| Параметр                            | Грохоти важкого типу |         |          |         |          |          |
|-------------------------------------|----------------------|---------|----------|---------|----------|----------|
|                                     | ГІТ 32               | ГІТ 41  | ГІТ 42   | ГІТ 51  | ГІТ 52   | ГІТ 71   |
| Площа сита, м <sup>2</sup>          | 3,1                  | 4,5     | 4,5      | 7,9     | 7,9      | 12,5     |
| Число сит                           | 2                    | 1       | 2        | 1       | 2        | 1        |
| Кут нахилу короба, град             | 10 – 30              | 10 – 30 | 10 – 30  | 10 – 30 | 10 – 30  | 10 – 30  |
| Частота коливань, хв <sup>-1</sup>  | 776; 970             | 800     | 730; 970 | 730     | 543; 970 | 520; 730 |
| Амплітуда коливань, мм              | 3 – 5                | 3       | 3 – 5    | 3 – 7   | 3 – 5    | 4 – 8    |
| Розмір отворів сит, мм              | 12 – 40              | 12 – 80 | 12 – 80  | 6 – 80  | 20 – 100 | 50 – 120 |
| Потужність електродви-<br>гуна, кВт | 10                   | 13      | 13       | 17      | 22       | 30       |
| Продуктивність, т/год               | 200                  | 360     | 360      | 500     | 500      | 800      |
| Габарити, мм:                       |                      |         |          |         |          |          |
| довжина                             | 3300                 | 3100    | 3600     | 4010    | 4400     | 5500     |
| ширина                              | 2000                 | 2200    | 2300     | 2687    | 3100     | 3500     |
| висота                              | 1300                 | 1500    | 1300     | 1487    | 1900     | 1800     |
| Маса грохота, т                     | 3,3                  | 4,8     | 5,0      | 6,0     | 7,5      | 13,5     |

### Технічні характеристики інерційно-самобалансних грохотів

| Параметр                           | ГІСЛ 62   | ГІСЛ 72   | ГІСЛ 82   | ГІСТ 72 |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Площа сита, м <sup>2</sup>         | 10        | 15        | 21        | 16      |
| Число сит                          | 2         | 2         | 2         | 2       |
| Кут нахилу короба, град            | 0         | 0         | 0         | 0       |
| Частота коливань, хв <sup>-1</sup> | 735       | 735       | 735       | 735     |
| Амплітуда коливань, мм             | 6         | 6         | 6         | 6       |
| Розмір отворів сит, мм             | 0,5 – 100 | 0,5 – 100 | 0,5 – 100 | 6 – 100 |
| Потужність електродвигуна, кВт     | 2x17      | 2x22      | 2x40      | 2x30    |
| Продуктивність, т/год              | 270       | 400       | 600       | 650     |
| Габарити, мм:                      |           |           |           |         |
| довжина                            | 5670      | 6980      | 7650      | 6805    |
| ширина                             | 2700      | 3720      | 3740      | 3785    |
| висота                             | 2690      | 2500      | 2660      | 2530    |
| Маса грохота, т                    | 8,7       | 12,1      | 18,6      | 14,1    |



## Технічні характеристики шоккових дробарок

| Параметр                                   | Дробарки із складним<br>колюванням щокки |                 |               | Дробарки с простим<br>колюванням щокки |                  |                  |
|--|--|-----------------|---------------|--|------------------|------------------|
|  | ЩДС 1-<br>2,5 x 4                        | ЩДС 1-<br>4 x 9 | ЩДСП<br>6 x 9 | ЩДП -<br>9 x 12                        | ЩДП -<br>12 x 15 | ЩДП -<br>15 x 21 |
| Розміри приймального отвору, мм            | 250x400                                  | 400x900         | 600x900       | 900x1200                               | 1200x1500        | 1500x2100        |
| Найбільший розмір грудок у<br>живленні, мм | 210                                      | 340             | 500           | 750                                    | 1000             | 1300             |
| Ширина розвантажувальної щілини, мм        | 20-80                                    | 40-90           | 75-125        | 90-160                                 | 110-190          | 140-220          |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год        | 18                                       | 30              | 60            | 180                                    | 310              | 550              |
| Потужність електродвигуна, кВт             | 37                                       | 45              | 75            | 90                                     | 160              | 250              |
| Габарити, мм:                              |  |                 |               |  |                  |                  |
| довжина                                    | 2300                                     | 2200            | 3000          | 5300                                   | 6400             | 7500             |
| ширина                                     | 2400                                     | 2600            | 2500          | 6000                                   | 6800             | 7000             |
| висота                                     | 1900                                     | 2200            | 1800          | 4000                                   | 5000             | 6000             |
| Маса дробарки, т                           | 8  | 12              | 20            | 57                                     | 116              | 208              |

### Технічні характеристики конусних дробарок крупного дроблення

| Параметр                                | Дробарки крупного дроблення |               |                |                |            |            | Дробарки редуційні |              |               |
|---|-----------------------------|---------------|----------------|----------------|------------|------------|--------------------|--------------|---------------|
|   | ККД – 500/75                | ККД – 900/140 | ККД – 1200/150 | ККД – 1500/180 | ККД – 1700 | ККД – 1900 | КРД – 500/60       | КРД – 700/75 | КРД – 900/100 |
| Діаметр основи дробильного конусу, мм   | 1220                        | 1700          | 1900           | 2520           | 1700       | 1900       | 1680               | 2040         | 2340          |
| Ширина приймального отвору, мм          | 500                         | 900           | 1200           | 1500           | 900        | 1200       | 500                | 700          | 900           |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм | 400                         | 750           | 1000           | 1200           | 400        | 750        | 400                | 550          | 750           |
| Ширина розвантажувальної щілини, мм     | 75                          | 140           | 150            | 180            | 75         | 150        | 60                 | 75           | 100           |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год     | 200                         | 420           | 680            | 1450           | 200        | 420        | 200                | 400          | 680           |
| Потужність електродвигуна, кВт          | 110                         | 250           | 320            | 400            | 110        | 250        | 200                | 250          | 400           |
| Габарити, мм:                           |                             |               |                |                |            |            |                    |              |               |
| довжина                                 | 4500                        | 9000          | 10000          | 11800          | 4500       | 9000       | 4560               | 4800         | 11500         |
| ширина                                  | 4600                        | 5000          | 6500           | 6800           | 4600       | 5000       | 2540               | 3600         | 6500          |
| висота                                  | 5100                        | 7800          | 8900           | 10500          | 5100       | 7800       | 4320               | 7600         | 9100          |
| Маса дробарки, т                        | 40,6                        | 145           | 240            | 404            | 40,6       | 145        | 88                 | 138          | 237           |

### Технічні характеристики конусних дробарок середнього дроблення

| Параметр                                | ККД – 600                             | ККД – 900 | ККД – 1200Гр | ККД – 1200Т | ККД – 1750Гр | ККД – 1750Т | ККД – 2200Гр | ККД – 2200Т | ККД – 3000 |
|---|---------------------------------------|-----------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|
|   | Діаметр основи дробильного конусу, мм | 600       | 900          | 1200        | 1200         | 1750        | 1750         | 2200        | 2200       |
| Ширина приймального отвору, мм          | 600                                   | 900       | 1200         | 1200        | 1750         | 1750        | 2200         | 2200        | 3000       |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм | 75                                    | 130       | 185          | 125         | 250          | 200         | 350          | 275         | 475        |
| Ширина розвантажувальної щілини, мм     | 60                                    | 105       | 150          | 100         | 200          | 160         | 300          | 250         | 380        |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год     | 12-35                                 | 15-40     | 20-50        | 10-25       | 25-60        | 15-30       | 30-60        | 15-30       | 25-50      |
| Потужність електродвигуна, кВт          | 30                                    | 60        | 100          | 70          | 250          | 150         | 500          | 250         | 600        |
| Габарити, мм:                           | 30                                    | 55        | 75           | 75          | 160          | 160         | 250          | 250         | 400        |
| довжина                                 | 1600                                  | 2500      | 3500         | 3500        | 4400         | 4400        | 5500         | 5500        | 7000       |
| ширина                                  | 1500                                  | 1730      | 2500         | 2500        | 3400         | 3400        | 4300         | 4300        | 5500       |
| висота                                  | 1465                                  | 2300      | 3100         | 3100        | 4400         | 4400        | 5100         | 5100        | 6500       |
| Маса дробарки, т                        | 4,05                                  | 12,5      | 22           | 22          | 47           | 47          | 85           | 86          | 217        |

### Технічні характеристики конусних дробарок дрібного дроблення

| Параметр                                | КМД -<br>1200Гр | КМД -<br>1200Т | КМД -<br>1750Гр | КМД -<br>1750Т | КМД -<br>2200Гр | КМД -<br>2200Т1 | КМД -<br>2200Т2 | КМД -<br>3000Т |
|---|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Діаметр основи дробильного конуса, мм   | 1200            | 1200           | 1750            | 1750           | 2200            | 2200            | 2200            | 3000           |
| Ширина приймального отвору, мм          | 100             | 50             | 130             | 80             | 140             | 100             | 85              | 95             |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм | 80              | 40             | 100             | 70             | 110             | 85              | 75              | 75             |
| Ширина розвантажувальної щілини, мм     | 5-15            | 3-12           | 9-20            | 5-15           | 10-20           | 5-15            | 7-15            | 6-20           |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год     | 50              | 40             | 120             | 100            | 250             | 200             | 180             | 400            |
| Потужність електродвигуна, кВт          | 75              | 75             | 160             | 160            | 250             | 250             | 320             | 400            |
| Габарити, мм:                           |                 |                |                 |                |                 |                 |                 |                |
| довжина                                 | 3500            | 3500           | 4400            | 4400           | 5500            | 5500            | 5700            | 7000           |
| ширина                                  | 2500            | 2500           | 3400            | 3400           | 4300            | 4300            | 4300            | 5500           |
| висота                                  | 3100            | 3100           | 4400            | 4400           | 5500            | 5500            | 5900            | 7100           |
| Маса дробарки, т                        | 21              | 21             | 46              | 46             | 85              | 86              | 98              | 217            |

### Технічні характеристики конусних інерційних дробарок

| Параметр                                     | КІД -<br>300 | КІД -<br>300 | КІД -<br>600 | КІД -<br>900 | КІД -<br>1200 | КІД -<br>1750 | КІД -<br>2200 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Діаметр основи дробильного конуса, мм        | 300          | 300          | 600          | 900          | 1200          | 1750          | 2200          |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм      | 20           | 20           | 50           | 60           | 80            | 90            | 110           |
| Номинальна крупність дробленого продукту, мм | 0-2          | 0-2          | 0-6          | 0-7          | 0-8           | 0-10          | 0-12          |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год          | 1            | 1            | 18           | 35           | 50            | 90            | 150           |
| Потужність електродвигуна, кВт               | 10           | 10           | 75           | 160          | 250           | 500           | 630           |
| Габарити, мм:                                |              |              |              |              |               |               |               |
| довжина                                      | 1300         | 1300         | 2170         | 3000         | 5000          | 6500          | 6600          |
| ширина                                       | 800          | 800          | 1280         | 2200         | 3000          | 4000          | 4000          |
| висота                                       | 1450         | 1450         | 2170         | 3150         | 4000          | 5400          | 6400          |
| Маса дробарки, т                             | 1            | 1            | 5,5          | 25           | 45            | 90            | 160           |

### Технічні характеристики двовалкових дробарок з гладкими валками

| Параметр                                   | ДГ<br>400x250 | ДГ<br>600x400 | ДГ<br>1000x550 | ДГ<br>1500x600 | ДГР<br>600x400 |
|--|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Розмір валків, мм:                         |               |               |                |                |                |
| діаметр                                    | 400           | 600           | 1000           | 1500           | 600            |
| довжина                                    | 250           | 400           | 550            | 600            | 400            |
| Ширина щілини між валками, мм              | 2 – 12        | 2 – 14        | 4 – 18         | 4 – 20         | 10 – 30        |
| Частота обертання валків, хв <sup>-1</sup> | 148 – 275     | 134 – 187     | 63 – 112       | 24 – 76        | 175            |
| Найбільший розмір кусків у живленні, мм    | 20            | 30            | 50             | 75             | 60             |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год        | 1,4 – 15,6    | 3 – 29,4      | 12 – 53,5      | 13 – 65        | 8 – 25         |
| Потужність електродвигуна, кВт             | 4             | 10            | 40             | 55             | 20             |
| Маса дробарки, т                           | 1,9           | 5,3           | 16,7           | 34,0           | 3,3            |

### Технічні характеристики двовалкових зубчатих дробарок

| Параметр                                      | ДДЗ-4                   | ДДЗ-6                    | ДДЗ-10                | ДДЗ-16   | ДДЗЕ-<br>15x12 |
|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------|----------|----------------|
| Розмір валків, мм:                            |                         |                          |                       |          |                |
| діаметр                                       | 400                     | 630                      | 1000                  | 1600     | 1500           |
| довжина                                       | 500                     | 830                      | 1250                  | 2000     | 1200           |
| Ширина щілини між валками, мм                 | 105                     | 150                      | 240                   | 400      | 100            |
| Частота обертання валків, хв <sup>-1</sup>    | 60                      | 50                       | 35                    | 41       | 40             |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм       | 200                     | 500                      | 600                   | 1000     | 900            |
| Максимальна крупність дробленого продукту, мм | 25; 50; 75;<br>100; 125 | 50; 75; 100;<br>125; 150 | 100; 125;<br>150; 300 | 200; 300 | 100            |
| Продуктивність, т/год                         | 20-100                  | 60-150                   | 125-525               | 650-1000 | 150            |
| Потужність електродвигуна, кВт                | 13                      | 20                       | 40                    | 250      | 2x55           |
| Маса дробарки, т                              | 4,3                     | 9,9                      | 23,5                  | 107,6    | 31,4           |

### Технічні характеристики молоткових однороторних дробарок

| Параметр                                   | Дробарки нереверсивні |        |          | Дробарки реверсивні |                            |
|--|-----------------------|--------|----------|---------------------|----------------------------|
|  | М 6-4Б                | М 8-6Б | М 13-16В | М 20-30Г            | ДМРЕ 10х10<br>ДМРЕ 14,5х13 |
| Розміри ротора, мм:                        |                       |        |          |                     |                            |
| діаметр                                    | 600                   | 800    | 1300     | 2000                | 1000                       |
| довжина                                    | 400                   | 600    | 1600     | 3000                | 1000                       |
| Частота обертання ротора, хв <sup>-1</sup> | 1250                  | 1000   | 735      | 600                 | 750-1500                   |
| Ширина вихідної щілини решітки, мм         | 25                    | 13     | 10       | 20                  | 3 - 5                      |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм    | 150                   | 250    | 400      | 600                 | 80                         |
| Продуктивність, т/год                      | 12-15                 | 18-24  | 150-200  | 900-1200            | 100                        |
| Потужність електродвигуна, кВт             | 17                    | 55     | 200      | 1250                | 250                        |
| Габарити, мм:                              |                       |        |          |                     |                            |
| довжина                                    | 1100                  | 1350   | 2385     | 8865                | 3931                       |
| ширина                                     | 1031                  | 1360   | 2750     | 3800                | 2632                       |
| висота                                     | 1150                  | 1250   | 1900     | 3100                | 1802                       |
| Маса дробарки, т                           | 1,15                  | 2,7    | 11,0     | 60,0                | 8,3                        |
|  |                       |        |          |                     | 1450                       |
|  |                       |        |          |                     | 1300                       |
|  |                       |        |          |                     | 750-1000                   |
|  |                       |        |          |                     | 3 - 5                      |
|  |                       |        |          |                     | 80                         |
|  |                       |        |          |                     | 250                        |
|  |                       |        |          |                     | 500                        |
|  |                       |        |          |                     | 4943                       |
|  |                       |        |          |                     | 3320                       |
|  |                       |        |          |                     | 2270                       |
|  |                       |        |          |                     | 18,9                       |

### Технічні характеристики роторних дробарок

| Параметр                                | ДРК<br>8x6 | ДРК<br>12x10 | ДРК<br>16x12 | ДРК<br>20x16 | ДРК<br>20x16 | ДРК<br>12x12 |
|---|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Розміри ротора, мм:                     |            |              |              |              |              |              |
| діаметр                                 | 800        | 1250         | 1600         | 2000         | 2000         | 1200         |
| довжина                                 | 630        | 1000         | 1200         | 1600         | 1600         | 1200         |
| Окружна швидкість бив ротора, м/с       | 20-35      | 20-35        | 20-35        | 20-35        | 20-28,8      | 20-28,8      |
| Ширина вихідної щілини решітки, мм      | 16-160     | 25-250       | 22-320       | 40-400       | 16-200       | 20-250       |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм | 400        | 600          | 800          | 1100         | 300          | 375          |
| Продуктивність, м <sup>3</sup> /год     | 55         | 125          | 200          | 370          | 125          | 200          |
| Потужність електродвигуна, кВт          | 40         | 110          | 160          | 250          | 122          | 200          |
| Габарити, мм:                           |            |              |              |              |              |              |
| довжина                                 | 2500       | 3200         | 4200         | 5600         | 3400         | 2700         |
| ширина                                  | 1700       | 2350         | 2900         | 3600         | 3200         | 2800         |
| висота                                  | 2150       | 2800         | 3500         | 4400         | 2800         | 2100         |
| Маса дробарки, т                        | 6          | 15           | 30           | 68           | 18           | 10           |

## Технічні характеристики стержневих млинів з центральним розвантаженням

| Параметр  | МСЦ<br>1500х<br>х3000 | МСЦ<br>2100х<br>х2200 | МСЦ<br>2100х<br>х3000 | МСЦ<br>2100х<br>х3000 | МСЦ<br>2700х<br>х3600 | МСЦ<br>3200х<br>х4500 | МСЦ<br>3600х<br>х4500 | МСЦ<br>3600х<br>х5500 | МСЦ<br>4000х<br>х5500 | МСЦ<br>4500х<br>х6000 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Внутрішній розмір барабана (без футеровки), мм: | 1500                  | 2100                  | 2100                  | 2100                  | 2700                  | 3200                  | 3600                  | 3600                  | 4000                  | 4500                  |
| діаметр   | 3000                  | 2200                  | 3000                  | 3000                  | 3600                  | 4500                  | 4500                  | 5500                  | 5500                  | 6000                  |
| довжина   | 4,2                   | 6,3                   | 8,5                   | 8,5                   | 17,5                  | 32                    | 40                    | 49                    | 60                    | 82                    |
| Номинальний об'єм барабана, м <sup>3</sup>      | 100                   | 200                   | 200                   | 200                   | 400                   | 900                   | 1000                  | 1000                  | 2000                  | 2500                  |
| Потужність електродвигуна, кВт                  | 6300                  | 8450                  | 9100                  | 9100                  | 9750                  | 14150                 | 14300                 | 15200                 | 15300                 | 16000                 |
| Габарити, мм:                                   | 3600                  | 5650                  | 4850                  | 4850                  | 6300                  | 7200                  | 7200                  | 7500                  | 8400                  | 9000                  |
| довжина   | 2600                  | 4250                  | 3750                  | 3750                  | 5050                  | 5250                  | 5200                  | 5500                  | 6200                  | 6750                  |
| ширина  | 21                    | 46                    | 47                    | 47                    | 74                    | 141                   | 159                   | 172                   | 250                   | 310                   |
| висота  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Маса, т   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

## Технічні характеристики кульових млинів з центральним розвантаженням

| Параметр  | МШЦ-<br>2100х<br>х2200 | МШЦ-<br>2100х<br>х3000 | МШЦ-<br>2700х<br>х3600 | МШЦ-<br>2700х<br>х3600 | МШЦ-<br>3200х<br>х3100 | МШЦ-<br>3200х<br>х4500 | МШЦ-<br>3600х<br>х5500 | МШЦ-<br>4000х<br>х5500 | МШЦ-<br>4500х<br>х6000 | МШЦ-<br>5500х<br>х6500 |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Внутрішній розмір барабана (без футеровки), мм: | 2100                   | 2100                   | 2700                   | 2700                   | 3200                   | 3200                   | 3600                   | 4000                   | 4500                   | 5500                   |
| діаметр   | 2200                   | 3000                   | 3600                   | 3100                   | 4500                   | 4500                   | 5500                   | 5500                   | 6000                   | 6500                   |
| довжина   | 6,3                    | 8,5                    | 17,5                   | 22,4                   | 32                     | 32                     | 49                     | 60                     | 82                     | 140                    |
| Номинальний об'єм барабана, м <sup>3</sup>      | 200                    | 200                    | 400                    | 630                    | 900                    | 900                    | 1250                   | 2000                   | 2500                   | 4000                   |
| Потужність електродвигуна, кВт                  | 8300                   | 8850                   | 9750                   | 9650                   | 14300                  | 14300                  | 16000                  | 16000                  | 16700                  | 25500                  |
| Габарити, мм:                                   | 4850                   | 4850                   | 6400                   | 6400                   | 7300                   | 7300                   | 7500                   | 8500                   | 9100                   | 12400                  |
| довжина   | 3750                   | 3750                   | 5050                   | 5100                   | 5230                   | 5230                   | 5500                   | 6250                   | 6800                   | 8800                   |
| ширина  | 39                     | 43                     | 74                     | 89                     | 140                    | 140                    | 161                    | 250                    | 310                    | 706                    |
| висота  |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
| Маса, т   |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |

### Технічні характеристики кульових млинів з розвантаженням через решітку

| Параметр                                   | МШР-<br>2100х<br>х1500                          | МШР-<br>2100х<br>х2200 | МШР-<br>2100х<br>х3000 | МШР-<br>2700х<br>х3600 | МШР-<br>3200х<br>х3100 | МШР-<br>3600х<br>х4000 | МШР-<br>3600х<br>х5000 | МШР-<br>4000х<br>х5000 | МШР-<br>4500х<br>х5000 |
|--|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|  | Внутрішній розмір барабана (без футеровки), мм: | 2100                   | 2100                   | 2100                   | 2700                   | 3200                   | 3600                   | 3600                   | 4000                   |
| діаметр довжина                            | 1500  | 2200                   | 3000                   | 3600                   | 3100                   | 4000                   | 5000                   | 5000                   | 5000                   |
| Номинальний об'єм барабана, м <sup>3</sup> | 4,3   | 6,3                    | 8,5                    | 17,5                   | 22                     | 36                     | 45                     | 55                     | 68                     |
| Потужність електродвигуна, кВт             | 132   | 200                    | 200                    | 400                    | 630                    | 1000                   | 1250                   | 2000                   | 2500                   |
| Габарити, мм:                              |   |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
| довжина                                    | 7350  | 8150                   | 8850                   | 9700                   | 9600                   | 13000                  | 14700                  | 14800                  | 15100                  |
| ширина                                     | 4500  | 4850                   | 4800                   | 6400                   | 6300                   | 7200                   | 7400                   | 8400                   | 9100                   |
| висота                                     | 3750  | 3750                   | 3750                   | 5050                   | 5050                   | 5200                   | 5500                   | 6300                   | 6800                   |
| Маса, т                                    | 34,5  | 40,1                   | 44,9                   | 77                     | 92,6                   | 162                    | 166                    | 258                    | 290                    |

### Технічні характеристики рудних і рудногалькових млинів мокрого самоподрібнення

| Параметр  | Млини рудного самоподрібнення |                        |                        |                         |                         |                         | Млини рудногалькові    |                         |                          |                          |
|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
|   | ММС-<br>3000х<br>х1060        | ММС-<br>5000х<br>х2300 | ММС-<br>7000х<br>х2300 | ММС-<br>7000х<br>х6000А | ММС-<br>7000х<br>х6000А | ММС-<br>9000х<br>х3000А | МГР-<br>4000х<br>х7500 | МГР-<br>5500х<br>х7500А | МШРГУ-<br>4500х<br>х6000 | МШРГУ-<br>4500х<br>х6000 |
| Внутрішній розмір ба-барабана (без футеровки), мм |                               |                        |                        |                         |                         |                         |                        |                         |                          |                          |
| діаметр довжина                                   | 3000                          | 5000                   | 7000                   | 7000                    | 7000                    | 9000                    | 4000                   | 5500                    | 4500                     | 4500                     |
| Номинальний об'єм барабана, м <sup>3</sup>        | 1060                          | 2300                   | 2300                   | 6000                    | 6000                    | 3000                    | 7500                   | 7500                    | 6000                     | 6000                     |
| Частота обертання барабана, хв <sup>-1</sup>      | 6                             | 36,5                   | 80                     | 195                     | 160                     | 160                     | 83                     | 160                     | 83                       | 83                       |
| Найбільший розмір грудок у живленні, мм           | -                             | 15,3                   | 13                     | 13                      | 11,5                    | 11,5                    | -                      | 14,9                    | 16,7                     | 16,7                     |
| Потужність електродвигуна, кВт                    | 300                           | 400                    | 400                    | 500                     | 500                     | 500                     | -                      | -                       | -                        | -                        |
| Габарити, мм:                                     |                               |                        |                        |                         |                         |                         |                        |                         |                          |                          |
| довжина   | -                             | 630                    | 1600                   | 4000                    | 4000                    | 4000                    | 1600                   | 3150                    | 2500                     | 2500                     |
| ширина  | -                             | 12500                  | 18500                  | -                       | -                       | 23650                   | 17300                  | -                       | 16000                    | 16000                    |
| висота  | -                             | 7340                   | 10300                  | -                       | -                       | 14450                   | 8570                   | -                       | 9100                     | 9100                     |
| Маса, т   | -                             | 4780                   | 7900                   | -                       | -                       | 7850                    | 6250                   | -                       | 6800                     | 6800                     |
|   | 51                            | 202                    | 429                    | 719                     | 816                     | 310                     | 695                    |                         | 327                      | 327                      |



Технічні характеристики спіральних класифікаторів з незануреною спіраллю

| Параметр                            | 1КСН-12  | 1КСН-15 | 1КСН-20 | 1КСН-24 | 1КСН-30  | 2КСН-24  | 2КСН-30  |
|-------------------------------------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Характеристика спіралі:             |          |         |         |         |          |          |          |
| число, шт.                          | 1        | 1       | 1       | 1       | 1        | 2        | 2        |
| діаметр, мм                         | 1200     | 1500    | 2000    | 2400    | 3000     | 2400     | 3000     |
| частота обертання, хв <sup>-1</sup> | 4,1; 8,2 | 3,9     | 4,1     | 3,6     | 1,5; 3,0 | 2,5; 5,2 | 1,5; 3,0 |
| Характеристика ванни:               |          |         |         |         |          |          |          |
| довжина, мм                         | 6500     | 8200    | 8400    | 9200    | 12500    | 9200     | 12500    |
| кут нахилу, градус                  | 18       | 18      | 17      | 18      | 18       | 18       | 18       |
| Продуктивність:                     |          |         |         |         |          |          |          |
| по пісках, т/год                    | 40-80    | 75      | 170     | 260     | 150-300  | 370-770  | 260-520  |
| по зливу, т/год                     | 7        | 10      | 17      | 18      | 33       | 46       | 63       |
| Потужність електродвигуна, кВт      | 6        | 7       | 10      | 13      | 28       | 40       | 40       |
| Габарити, мм:                       |          |         |         |         |          |          |          |
| довжина                             | 8500     | 10000   | 11000   | 12500   | 15000    | 11750    | 15150    |
| ширина                              | 1700     | 2360    | 2800    | 3150    | 3750     | 5600     | 6760     |
| висота                              | 3000     | 3750    | 4750    | 4900    | 5800     | 4900     | 7100     |
| Маса, т                             | 6,4      | 12,6    | 17,8    | 21,4    | 14,4     | 39,6     | 68,9     |

### Технічні характеристики гідроциклонів

| Параметр  | ГЦ-75          | ГЦ-150         | ГЦ-250       | ГЦ-360         | ГЦ-500         | ГЦ-710         | ГЦ-1000        | ГЦ-1400        |
|---|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Діаметр гідроциклону, мм  | 75             | 150            | 250          | 360            | 500            | 710            | 1000           | 1400           |
| Кут конусності, градус  | 10             | 10             | 20           | 20             | 20             | 20             | 20             | 20             |
| Еквівалентний діаметр живильного отвору, мм   | 17             | 38             | 65           | 90             | 130            | 150            | 210            | 300            |
| Діаметр зливного отвору, мм   | 22             | 50             | 80           | 115            | 150            | 200            | 250            | 380            |
| Діаметр піскового отвору, мм  | 8; 12;         | 12; 20;        | 34; 48;      | 34; 48;        | 48; 75;        | 48; 150        | 75; 150        | 200; 250       |
|   | 17             | 27; 34         | 75           | 75; 96         | 96; 150        | 75; 200        | 200; 250       | 300; 350       |
| Тиск на вході, МПа  | 0,01-<br>-0,02 | 0,01-<br>-0,02 | 0,03<br>0,25 | 0,03-<br>-0,25 | 0,03-<br>-0,25 | 0,03-<br>-0,25 | 0,06-<br>-0,45 | 0,06-<br>-0,45 |
| Продуктивність по живленню з вмістом твердого 40 % при тиску 0,1 МПа, м <sup>3</sup> /год | 5              | 15             | 50           | 95             | 180            | 260            | 470            | 900            |
| Габарити, мм:   |                |                |              |                |                |                |                |                |
| довжина   | 300            | 500            | 600          | 700            | 900            | 1200           | 1500           | 2100           |
| ширина  | 350            | 450            | 650          | 750            | 1000           | 1400           | 1600           | 2200           |
| висота  | 600            | 1200           | 1400         | 1900           | 2500           | 3500           | 4500           | 6200           |
| Маса, кг  | 20             | 100            | 200          | 300            | 450            | 1450           | 2400           | 4500           |

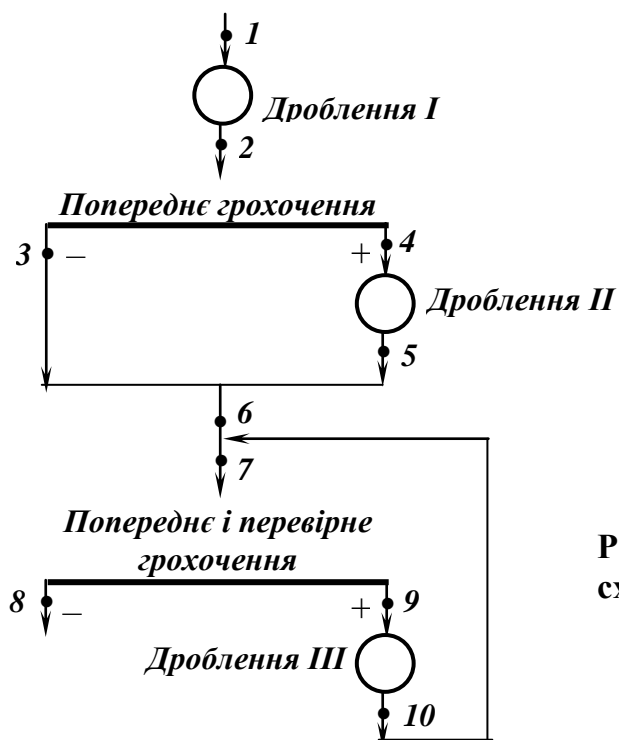
### Методика розрахунку схеми дроблення

Методика розрахунку схеми дроблення розглянута на прикладі, що приведений нижче.

Завдання: Виконати розрахунок схеми дроблення (рис. 1) за наступними вихідними даними: продуктивність 3Ф  $Q_{3Ф} = 600$  т/год; руда – середньої твердості; розмір максимального куска – у вихідному  $D_{max} = 600$  мм, у дробленому продукті  $d_{max} = 12$  мм; гранулометричні склади руди і дроблених продуктів (табл. 1).

**Таблиця 1 – Гранулометричний склад руди**

| Клас, мм  | $\gamma, \%$ | $\gamma^{+d}, \%$ | $\gamma^{-d}, \%$ |
|-----------|--------------|-------------------|-------------------|
| +400      | 30           | 30                | 100               |
| 400 – 200 | 28           | 58                | 70                |
| 200 – 100 | 17           | 75                | 42                |
| 100 – 50  | 15           | 90                | 25                |
| 50 – 25   | 4            | 94                | 10                |
| 25 – 12   | 3            | 97                | 6                 |
| 12 – 0    | 3            | 100               | 3                 |
| Разом     | 100          | –                 | –                 |



**Рис. 1 – Розрахункова схема дроблення (АБГ).**

### 1. Розрахунок технологічних показників

Визначаємо показники схеми дроблення.

#### 1.1 Загальний ступінь дроблення:

$$S_{\text{заг}} = D_{\text{max}} / d_{\text{max}} = 600/12 = 50.$$

При отриманому загальному ступені дроблення може бути прийнята трьохстадіальна схема дроблення, що не суперечить I-му правилу вибору схеми дроблення.

#### 1.2 Середній ступінь дроблення:

$$S_{\text{сер}} = \sqrt{S_{\text{заг}}} = \sqrt{50} = 3,7.$$

#### 1.3 Ступені дроблення у окремих стадіях:

- у I і II стадії призначаємо

$$S_1 = S_2 = 3,3.$$

Перша і друга стадії працюють без перевірного грохочення, тому їхні ступені дроблення повинні бути менші, ніж у третьому ступені, який працює з перевірним грохоченням;

- тоді ступінь дроблення III стадії

$$S_3 = S_{\text{заг}} / (S_1 \cdot S_2) = 50 / 3,3 \cdot 3,3 = 4,6.$$

#### 1.4 Умовна максимальна крупність грудок у окремих стадіях:

- у I стадії

$$D_1 = D_{\text{max}} / S_1 = 600 / 3,3 = 182 \text{ мм},$$

- у II стадії

$$D_2 = D_{\text{max}} / (S_1 \cdot S_2) = 600 / 3,3 \cdot 3,3 = 55 \text{ мм},$$

- у III стадії

$$D_3 = D_{\text{max}} / (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) = 600 / 3,3 \cdot 3,3 \cdot 4,6 = 12 \text{ мм}.$$

#### 1.5 Ширина розвантажувальних щілин дробарок I і II стадій.

При дробленні руд без перевірного грохочення максимальна умовна крупність з дробленого продукту перевищує ширину розвантажувальної щілини дробарки (табл. 2).

**Таблиця 2 – Максимальна умовна крупність з дробленого продукту**

| Категорія твердості руди | Максимальна умовна крупність з дробленого продукту для дробарок типу: |     |           |           |
|--------------------------|---|-----|-----------|-----------|
|                          | ККД   | ЩДП | КСД       | КМД       |
| М'які                    | 1,1   | 1,3 | 1,3 – 1,5 | 1,7 – 2,0 |
| Середньої твердості      | 1,4   | 1,5 | 1,8 – 2,0 | 2,2 – 2,5 |
| Тверді                   | 1,6   | 1,7 | 2,4 – 2,6 | 2,7 – 3,0 |

З урахуванням закругнення ширина розвантажувальних щілин дробарок:

- I стадії (закрупнення для руди середньої твердості  $z_1 = 1,4$ )  
 $i_1 = D_1/z_1 = 182/1,4 = 130$  мм;
- II стадії (закрупнення для руди середньої твердості  $z_2 = 1,8$ )  
 $i_2 = D_2/z_2 = 55/1,8 = 30$  мм.

*1.6 Розмір отворів сит грохотів  $a$  і ефективність грохочення  $E_2^{-a}$  у II стадії дроблення.*

Для попереднього грохочення розмір отворів сит грохотів приймають від  $i$  (якщо дробарка недовантажена) до  $zi$  (якщо дробарка перевантажена).

Для крупного грохочення на колосникових грохотах  $E = 60 - 70$  % (в розрахунковій схемі відсутнє).

Для середнього і дрібного грохочення на вібраційних грохотах  $E = 80 - 85$  % .

Для розрахункової схеми приймаємо:

$$a_2 = i_2 = 30 \text{ мм}; \quad E_2^{-a} = E_2^{-30} = 85 \text{ \%}.$$

*1.7 Режим роботи грохотів і дробарок III стадії*

У залежності від значень ширини розвантажувальної щілини дробарки  $i$ , розміру отворів сита  $a$  і ефективності грохочення  $E_2^{-a}$ , які визначають режим роботи грохотів і дробарок, змінюється характеристика крупності дробленого продукту, необхідне число дробарок і грохотів, продуктивність млинів.

Найбільш раціональні такі режими, при яких розвантажувальні щілини дробарок і ефективності грохочення зменшені, а розміри отворів сит грохотів збільшені.

Для розрахункової схеми приймаємо:

$$i_3 = 0,8D_3 = 0,8 \cdot 12 = 10 \text{ мм};$$

$$a_3 = 1,2D_3 = 1,2 \cdot 12 = 14 \text{ мм};$$

$$E_3^{-a} = E_3^{-14} = 75 \text{ \%}.$$

*1.8 Обґрунтування схеми дроблення.*

Оскільки у вихідній руді, що надходить на ЗФ, вміст класу – 130 мм складає менше 15 % (див. табл. 1 – гранулометричний склад вихідної руди), I стадії дроблення не повинна передувати операція попереднього грохочення (обґрунтування по I правилу вибору схеми дроблення). В II стадії дроблення раціональне використання попереднього грохочення (обґрунтування по II правилу вибору схеми дроблення). В заключній стадії дроблення рекомендується застосовувати попереднє і перевірне грохочення (об-

грунтування по III правилу вибору схеми дроблення). Таким чином, прийнята тристадійна схема типу АБГ (рис. 1) є для даної руди раціональною.

## 2. Розрахунок схеми дроблення

Якщо є ситові аналізи вихідного матеріалу і продуктів дроблення необхідно побудувати їхні характеристики крупності і використовувати їх при розрахунках. При відсутності ситових аналізів слід скористатися типовими характеристиками або емпіричними формулами, які їх описують.

### 2.1 Розрахунок I стадії дроблення

• Маса продуктів I стадії:

$$Q_2 = Q_1 = 600 \text{ т/год.}$$

Після побудови характеристики крупності продукту I (рис. 2) визначаємо вміст у ньому класу + 130 мм:  $\beta_1^{+130} = 67\%$  ( $\beta_1^{-130} = 33\%$ ).

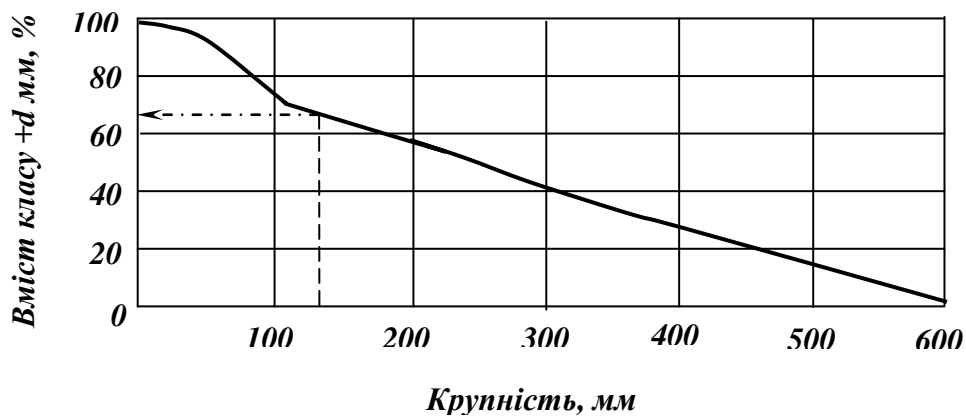


Рис. 2 – Характеристика крупності вихідної руди.

• Визначаємо відносну крупність зерен у дробленому продукті I стадії дроблення (табл. 3):  $z_1 = d / i_1$  ( $i_1 = 130$  мм).

Таблиця 3 – Відносна крупність зерен у дробленому продукті I стадії дроблення

|          |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|
| $d$ , мм | 130  | 100  | 50   | 25   | 12   |
| $z_1$    | 1,00 | 0,77 | 0,38 | 0,19 | 0,09 |

Потім для руди середньої твердості по типовій характеристиці крупності або за формулою (2.59) визначаємо гранулометричний склад класу +130 мм після його дроблення (табл. 4):

$$b^{+z} = (1 - 0,80z + 0,11z^3 - 0,02z^4) \cdot 10^2; \quad b^{-z} = 100 - b^{+z}.$$

**Таблиця 4 – Гранулометричний склад класу + 130 мм після дроблення**

|            |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|
| $d$ , мм   | 130  | 100  | 50   | 25   | 12   |
| $b_1^{+z}$ | 29,0 | 43,3 | 70,2 | 84,8 | 92,8 |
| $b_1^{-z}$ | 71,0 | 56,7 | 29,8 | 15,2 | 7,2  |

- Вихід класів у продукті 2 розраховується за формулою:

$$\beta_2^{-d} = \beta_1^{-d} + b_1^{-d} \cdot \beta_1^{+i_1}, \%$$

де  $\beta_1^{-d}$ ,  $\beta_2^{-d}$  – вихід класу « $-d$ » у вихідному і дробленому продуктах, %;  
 $b_1^{-d}$  – вміст класу « $-d$ » у дробленому продукті (табл. 4), %;  $\beta_1^{+i_1}$  – вихід класу « $+i_1$ » у вихідному продукті ( $\beta_1^{+130} = 0,67$ ), частки од.

Наприклад,

$$\beta_2^{-130} = 33 + 71 \cdot 0,67 = 80,6, \%$$

$$\beta_2^{-100} = 25 + 56,7 \cdot 0,67 = 63,0, \% \text{ і т.д.}$$

Результати розрахунку гранулометричного складу продукту 2 наведені у табл. 5.

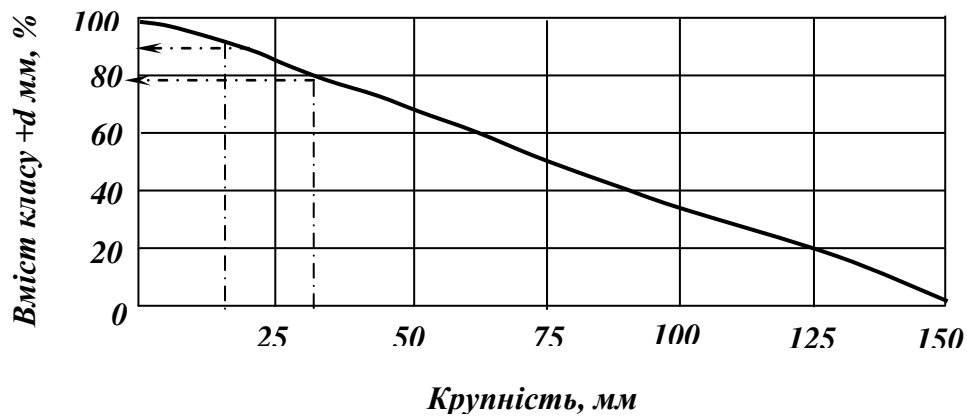
**Таблиця 5 – Гранулометричний склад продукту 2**

| Клас, мм  | $\gamma$ , % | Сумарні виходи    |                   |
|-----------|--------------|-------------------|-------------------|
|           |              | $\gamma^{+d}$ , % | $\gamma^{-d}$ , % |
| + 130     | 19,4         | 19,4              | 100,0             |
| 130 – 100 | 17,6         | 37,0              | 80,6              |
| 100 – 50  | 33,0         | 70,0              | 63,0              |
| 50 – 25   | 13,8         | 83,8              | 30,0              |
| 25 – 12   | 8,4          | 92,2              | 16,2              |
| 12 – 0    | 7,8          | 100,0             | 7,8               |
| Разом     | 100,0        | –                 | –                 |

### 2.2 Розрахунок II стадії дроблення

Другій стадії дроблення передуює грохочення на ситі з розміром отворів  $a_2 = 30$  мм. З використанням даних табл. 5 визначити вихід класу (0–30 мм) неможливо, тому необхідно побудувати сумарну характеристику крупності продукту 2 (рис. 3).

Після побудови характеристики крупності продукту 2 визначаємо вміст у ньому класу + 30 мм:  $\beta_1^{+30} = 80\%$  ( $\beta_1^{-30} = 20\%$ ).



**Рис. 3 – Характеристика крупності продукту 2.**

Крім того, при розрахунку процесу грохочення необхідно знати вихід класу (0–15 мм):  $\beta_1^{+15} = 90\%$  ( $\beta_1^{-15} = 10\%$ ).

• Маса продуктів II стадії:

$$Q_6 = Q_1 = 600 \text{ т/год.}$$

$$Q_3 = Q_2 \cdot \beta_2^{-30} \cdot E_2^{-30} = 600 \cdot 0,2 \cdot 0,85 = 102 \text{ т/год; } (\gamma_3 = 17\%);$$

$$Q_4 = Q_2 - Q_3 = 600 - 102 = 498 \text{ т/год; } (\gamma_4 = \gamma_5 = 83\%);$$

$$Q_5 = Q_4 = 498 \text{ т/год;}$$

• Визначаємо відносну крупність зерен у дробленому продукті II стадії дроблення (табл. 6):  $z_2 = d / i_2$  ( $i_2 = 30$  мм).

**Таблиця 6 – Відносна крупність зерен у дробленому продукті II стадії дроблення**

|          |      |      |
|----------|------|------|
| $d$ , мм | 25   | 12   |
| $z_2$    | 0,83 | 0,40 |

Потім для руди середньої твердості по типовій характеристиці крупності або за формулою (2.75) визначаємо гранулометричний склад класу +30 мм після його дроблення (табл. 7):

$$b^{+z} = (1 - 0,82z + 0,17z^2) \cdot 10^2;$$

$$b^{-z} = 100 - b^{+z}.$$

**Таблиця 7 – Гранулометричний склад класу + 30 мм після дроблення**

|            |      |      |
|------------|------|------|
| $d$ , мм   | 25   | 12   |
| $b_2^{+z}$ | 43,7 | 69,9 |
| $b_2^{-z}$ | 56,3 | 30,1 |



- Вихід класів у продукті 6 розраховується за формулою:

$$\beta_6^{-d} = \beta_2^{-d} \cdot E_2^{-30} + b_2^{-d} \cdot \gamma_5, \%$$

де  $\beta_2^{-d}$ ,  $\beta_6^{-d}$  – вихід класу «- d» у продуктах 2 і 6, %;  $b_2^{-d}$  – вміст класу «- d» у дробленому продукті (табл. 7), %;  $\gamma_5$  – вихід продукту 5, частки од.;  $E_2^{-30}$  – ефективність грохочення по зерну 30 мм, частки од.

Наприклад,

$$\beta_6^{-25} = 16,2 \cdot 0,85 + 56,3 \cdot 0,83 = 60,5, \%$$

$$\beta_6^{-12} = 7,8 \cdot 0,85 + 30,1 \cdot 0,83 = 31,6, \%$$

Результати розрахунку гранулометричного складу продукту 6 наведені у табл. 8.

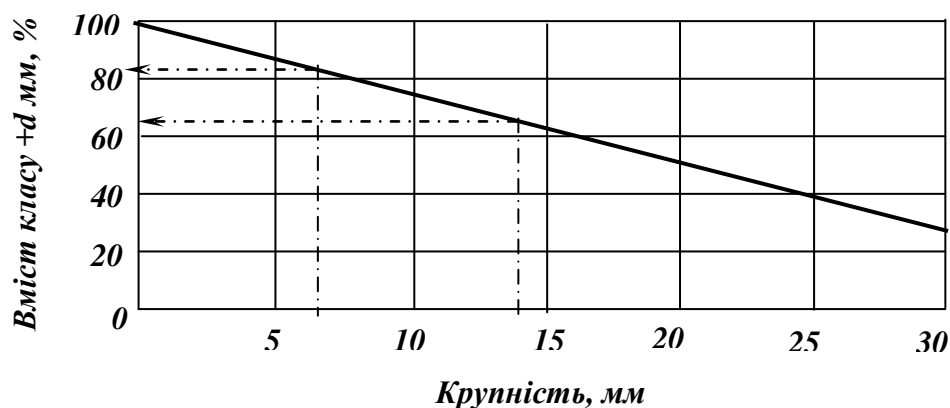
**Таблиця 8 – Гранулометричний склад продукту 6**

| Клас, мм | $\gamma$ , % | Сумарні виходи    |                   |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|
|          |              | $\gamma^{+d}$ , % | $\gamma^{-d}$ , % |
| + 25     | 39,5         | 39,5              | 100,0             |
| 25 – 12  | 28,9         | 68,4              | 60,5              |
| 12 – 0   | 31,6         | 100,0             | 31,6              |
| Разом    | 100,0        | –                 | –                 |

### 2.3 Розрахунок III стадії дроблення

У третю стадію дроблення включені операції попереднього і перевірного грохочення на ситі з розміром отворів  $a_3 = 14$  мм. З використанням даних табл. 8 визначити вихід класу (0–14 мм) неможливо, тому необхідно побудувати сумарну характеристику крупності продукту 6 (рис. 4).

Після побудови характеристики крупності продукту 6 визначаємо вміст у ньому класу + 14 мм:  $\beta_6^{+14} = 65\%$  ( $\beta_6^{-14} = 35\%$ ).



**Рис. 4 – Характеристика крупності продукту 6.**

• Визначаємо відносну крупність зерен у дробленому продукті III стадії дроблення (табл. 9):  $z_2 = d / i_3$  ( $i_3 = 10$  мм).

**Таблиця 9 – Відносна крупність зерен у дробленому продукті III стадії дроблення**

|          |     |     |
|----------|-----|-----|
| $d$ , мм | 14  | 12  |
| $z_3$    | 1,4 | 1,2 |

Потім для руди середньої твердості по типовій характеристиці крупності або за формулою (2.78) визначаємо гранулометричний склад класу + 14 мм після його дроблення (табл. 10):

$$b^{+z} = (1 + 0,12z - 1,13z^2 + 0,62z^3 - 0,10z^4) \cdot 10^2; \quad b^{-z} = 100 - b^{+z}.$$

**Таблиця 10 – Гранулометричний склад класу + 14 мм після дроблення**

|            |      |      |
|------------|------|------|
| $d$ , мм   | 14   | 12   |
| $b_2^{+z}$ | 27,0 | 38,1 |
| $b_2^{-z}$ | 73,0 | 61,9 |

Результати розрахунку гранулометричного складу продукту 10 наведені у табл. 11.

**Таблиця 11 – Гранулометричний склад продукту 10**

| Клас, мм | $\gamma$ , % | Сумарні виходи    |                   |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|
|          |              | $\gamma^{+d}$ , % | $\gamma^{-d}$ , % |
| + 14     | 27,0         | 27,0              | 100,0             |
| 14 – 12  | 11,1         | 38,1              | 73,0              |
| 12 – 0   | 61,9         | 100,0             | 61,9              |
| Разом    | 100,0        | –                 | –                 |

• Для визначення оригінального живлення, по якому вибирається дробарка, III стадія дроблення представляється у розгорнутому вигляді, тобто с роздільними операціями попереднього і перевірного грохочення (рис. 5).

• Маси продуктів III стадії:

$$Q_8 = Q_6 = Q_1 = 600 \text{ т/год};$$

$$Q_{6'} = Q_6 \cdot \beta_6^{-14} \cdot E_3^{-14} = 600 \cdot 0,35 \cdot 0,75 = 157,2 \text{ т/год}; \quad (\gamma_{6'} = 26,3 \text{ \%});$$

$$Q_{6''} = Q_6 - Q_{6'} = 600 - 157,5 = 442,5 \text{ т/год}; \quad (\gamma_{6''} = 73,7 \text{ \%}).$$

З використанням ситової характеристики продукту 10 (табл. 11) визначаємо  $C$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_7$ :

$Q_{10}' = Q_{10} \cdot \beta_{10}^{-14} \cdot E_3^{-14}$ , при  $Q_{10} = Q_{6''} + C$  і  $Q_{6''} = Q_{10}'$   
отримуємо:

$$Q_{6''} = Q_{6''} \cdot \beta_{10}^{-14} \cdot E_3^{-14} + C \cdot \beta_{10}^{-14} \cdot E_3^{-14},$$

звідки

$$C = \frac{Q_{6''}(1 - \beta_{10}^{-14} \cdot E_3^{-14})}{\beta_{10}^{-14} \cdot E_3^{-14}} = \frac{442,5 \cdot (1 - 0,73 \cdot 0,75)}{0,73 \cdot 0,75} = 365,7 \text{ т/год};$$

$$Q_{10} = Q_{6''} + C = 442,5 + 365,7 = 808,2 \text{ т/год}; \quad (\gamma_{10} \approx 134,7 \%)$$

$$Q_7 = Q_6 + Q_{10} = 600 + 808,2 = 1408,2 \text{ т/год}; \quad (\gamma_7 \approx 234,7 \%)$$

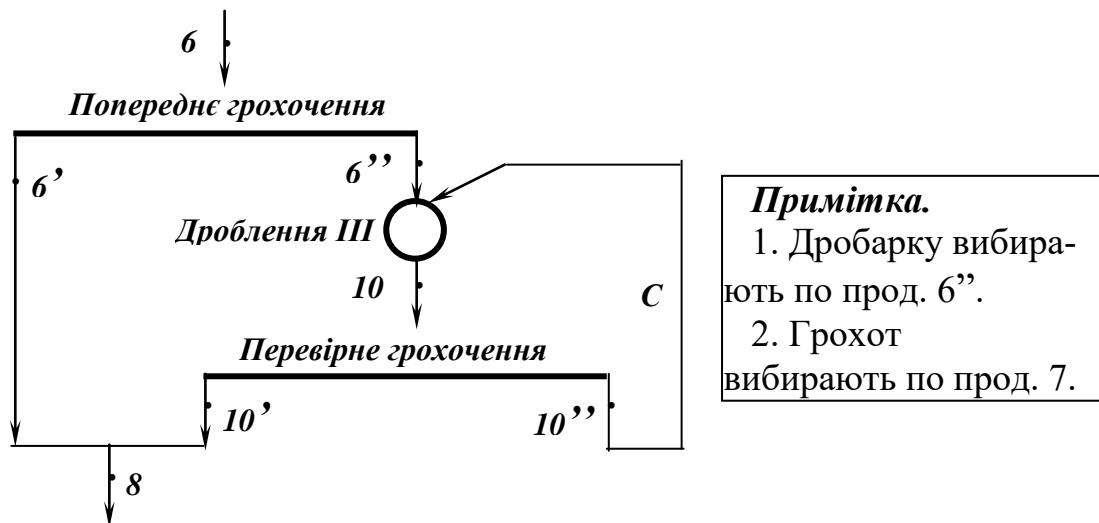


Рис. 5 – Розрахункова схема III-ої стадії дроблення.

• Вихід класу (– 12 мм) у продукті 8 розраховується за формулою:

$$\beta_8^{-12} = (\beta_6^{-12} + \beta_{10}^{-12} \cdot \gamma_{10}) \cdot E_3^{-14} = (31,6 + 61,9 \cdot 1,347) \cdot 0,75 = 86,2 \%,$$

де  $\beta_6^{-12}$ ,  $\beta_{10}^{-12}$  – вихід класу «– 12» у продуктах 6 і 10, %;  $\gamma_5$  – вихід продукту 10, частки од.;  $E_3^{-14}$  – ефективність грохочення по зерну 14 мм, частки од.

Результати розрахунку гранулометричного складу продукту 8 наведені у табл. 8.

**Таблиця 12 – Гранулометричний склад продукту 8**

| Клас, мм | $\gamma$ , % | Сумарні виходи    |                   |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|
|          |              | $\gamma^{+d}$ , % | $\gamma^{-d}$ , % |
| + 12     | 13,8         | 13,8              | 100,0             |
| 12 – 0   | 86,2         | 100,0             | 86,2              |
| Разом    | 100,0        | –                 | –                 |

При розрахунку процесу грохочення необхідні такі дані:

– вміст класу розміром менше половини розміру отворів сита (– 7 мм) у продукті 7. Оскільки характеристика крупності прямолінійна, вміст цього класу можна розрахувати за формулою:

$$\beta_7^{-7} \approx 0,5 \cdot \frac{\beta_6^{-14} + \beta_{10}^{-14} \cdot \gamma_{10}}{\gamma_7} = 0,5 \cdot \frac{35 + 73 \cdot 1,347}{2,347} = 28,4\% ;$$

– вміст надлишкових зерен (+ 14 мм) у продукті 7:

$$\beta_7^{+14} = \frac{\beta_6^{+14} + \beta_{10}^{+14} \cdot \gamma_{10}}{\gamma_7} = \frac{65 + 27 \cdot 1,347}{2,347} = 43,2\% .$$

### 3. Вибір обладнання схеми дроблення

#### Дробарки

3.1 Вимоги, яким повинні задовольняти дробарки наведені у табл. 13.

**Таблиця 13 – Вимоги до дробарок**

| Показник                                     | I стадія | II стадія | III стадія |
|--|----------|-----------|------------|
| Крупність максимальних грудок у живленні, мм | 600      | 182       | 55         |
| Ширина розвантажувальної щілини, мм          | 130      | 30        | 10         |
| Потрібна продуктивність, т/год               | 600      | 498       | 442,5      |

#### 3.2 Технологічні характеристики обраних дробарок.

Дробарки вибирають с урахуванням твердості матеріалу, що дробиться, і вимог, що указані в табл. 13. Для руд середньої твердості обираємо конусні дробарки, їхні технологічні характеристики наведені в табл. 14.

**Таблиця 14 – Технологічні характеристики обраних дробарок**

| Стадія дроблення | Тип дробарки | Ширина, мм     |                 | Насипна густина т/м <sup>3</sup> | Продуктивність      |       |
|------------------|--------------|----------------|-----------------|----------------------------------|---------------------|-------|
|                  |              | завант. отвору | розвант. щілини |                                  | м <sup>3</sup> /год | т/год |
| I                | ККД 900/140  | 900            | 140             |                                  | 420                 | 840   |
| II               | КСД 1750Гр   | 250            | 25 – 60         | 2                                | 300                 | 600   |
| III              | КМД 2200Т2   | 75             | 7 - 15          |                                  | 160                 | 320   |

3.3 Визначення числа дробарок з урахуванням нерівномірності навантаження ( $k_n = 1,1$ ):

- в I стадії:

$$n_1 = k_n \cdot Q_1 / Q_{\partial p_1} = 1,1 \cdot 600 / 840 = 0,8 \Rightarrow 1 \text{ др. ККД 900/140};$$

- в II стадії:

$$n_2 = k_n \cdot Q_4 / Q_{\partial p_2} = 1,1 \cdot 498 / 600 = 0,9 \Rightarrow 1 \text{ др. КСД 1750Гр};$$

- в III стадії:

$$n_3 = k_n \cdot Q_{6''} / Q_{\partial p_3} = 1,1 \cdot 442,5 / 320 = 1,5 \Rightarrow 2 \text{ др. КМД 2200Т2}.$$

### Грохоти

3.3 Визначення площі просіюючої поверхні вібраційних грохотів II і III стадій виконується за формулою (1.34):

$$F = Q_o / q \cdot \delta \cdot k \cdot l \cdot m \cdot n \cdot o \cdot p,$$

де  $F$  – робоча поверхня грохота,  $m^2$ ;  $q$  – питома продуктивність грохота,  $m^3/\text{год} \cdot m^2$ ;  $\delta$  – насипна густина матеріалу,  $кг/m^3$ ;  $k$  – поправковий коефіцієнт на вміст у початковому матеріалі частинок розміром менше половини розміру отворів сита;  $l$  – поправковий коефіцієнт на вміст у початковому живленні частинок більше розміру отвору сита;  $m$  – поправковий коефіцієнт на ефективність грохочення;  $n$  – поправковий коефіцієнт на форму зерен;  $o$  – поправковий коефіцієнт на вологість матеріалу;  $p$  – поправковий коефіцієнт на спосіб грохочення (сухе або мокре).

Дані для визначення площі просіюючої поверхні грохотів використовуються дані табл. 1.8 і 1.9. Для прикладу, що розглядається, розрахункові коефіцієнти наведені у табл. 15.

**Таблиця 15 – Розрахункові коефіцієнти для визначення площі просіюючої поверхні**

| Показники  | $q, m^3/\text{год} \cdot m^2$ | $\delta$ | $k$ | $l$  | $m$  | $n$ | $o$ | $p$ |
|------------|-------------------------------|----------|-----|------|------|-----|-----|-----|
| II стадія  | 33                            | 2        | 0,7 | 2,00 | 1,28 | 1   | 1   | 1   |
| III стадія | 25                            | 2        | 0,9 | 1,47 | 1,45 | 1   | 1   | 1   |

- в II стадії:

$$F_2 = Q_2 / q \cdot \delta \cdot k \cdot l \cdot m \cdot n \cdot o \cdot p = 600 / 33 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 1,28 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5,1 m^2;$$

- в III стадії:

$$F_3 = Q_7 / q \cdot \delta \cdot k \cdot l \cdot m \cdot n \cdot o \cdot p = 1408,2 / 25 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 1,47 \cdot 1,45 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,7 m^2.$$

Для руд з насипною густиною  $2 \text{ т/м}^3$  обираємо грохоти типу ГІТ-51 ( $F_{зр} = 7,9 \text{ м}^2$ ) – для II і III стадії.

3.5 Визначення числа грохотів з урахуванням нерівномірності навантаження ( $k_n = 1,1$ ):

• в II стадії:

$$n_2 = k_n F_2 / F_{зр} = 1,1 \cdot 5,1 / 7,9 = 0,7 \Rightarrow 1 \text{ гр. ГІТ-51}$$

• в III стадії:

$$n_3 = k_n \cdot F_3 / F_{зр} = 1,1 \cdot 14,7 / 7,9 = 2,0 \Rightarrow 2 \text{ гр. ГІТ-51}$$

Схема ланцюга апаратів розрахованої схеми дроблення наведено на рис. 6.

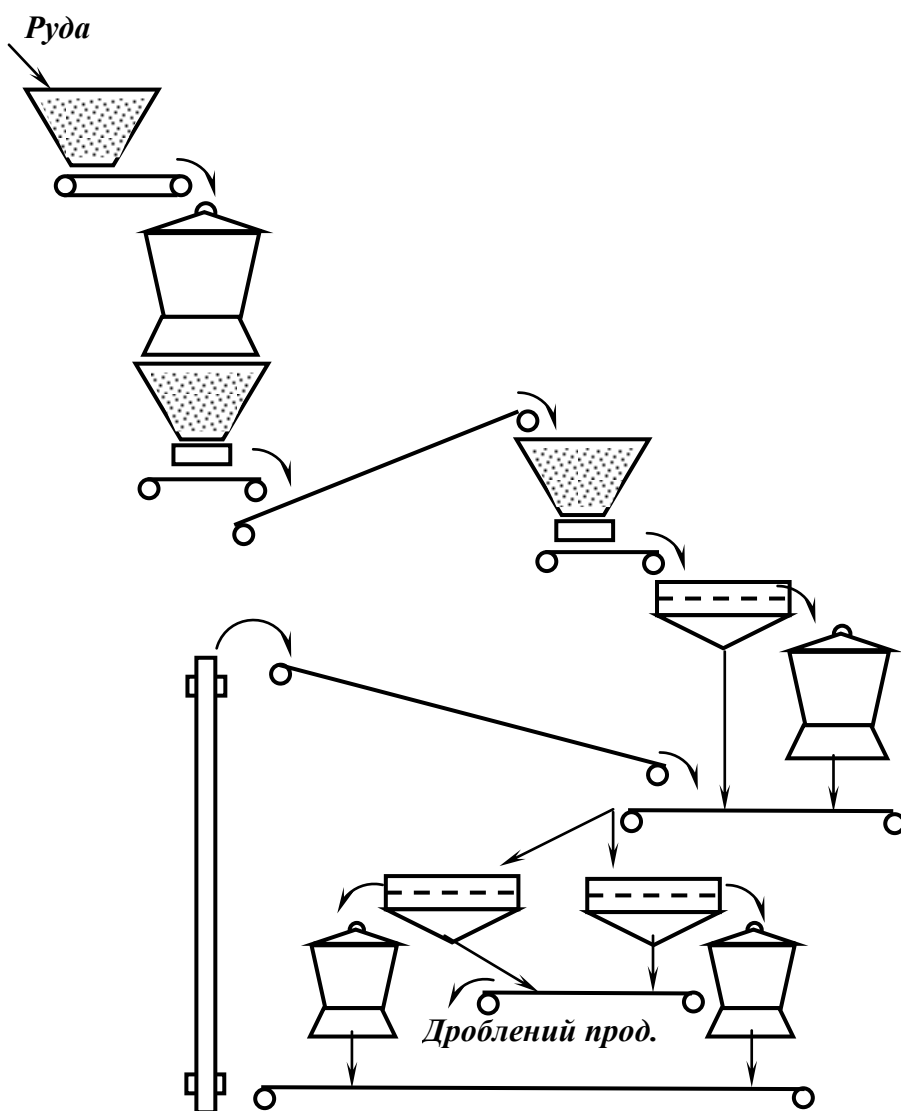


Рис. 6 – Апаратурне зображення розрахованої схеми дроблення.

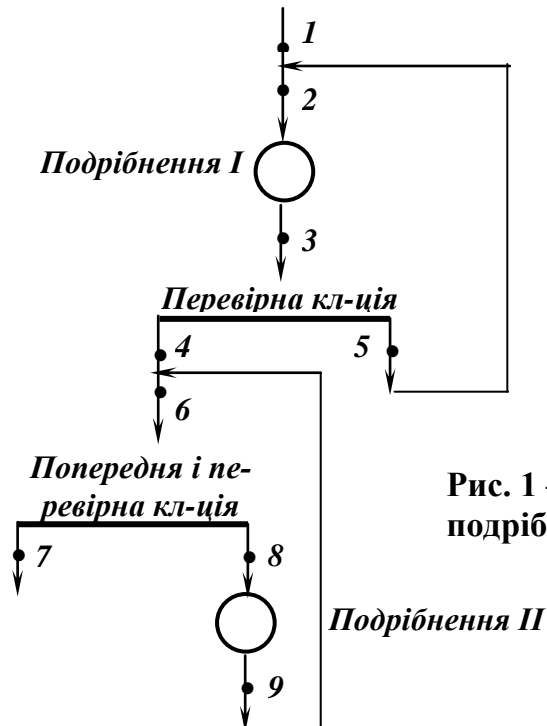
### Методика розрахунку схеми подрібнення

Методика розрахунку схеми подрібнення розглянута на прикладі, що приведений нижче.

**Завдання:** Виконати розрахунок схеми подрібнення (рис. 1) за наступними вихідними даними: продуктивність 3Ф  $Q_{3\Phi} = 600$  т/год; на подрібнення надходить дроблена руда середньої твердості; вкраплення – нерівномірне по крупності; розмір максимального куска у вихідному продукті  $D_{max} \leq 20$  мм; попередніми дослідженнями встановлено, що раціональним варіантом є двостадійна схема ВГ; вміст розрахункового класу ( $-0,074$  мм) у продуктах схеми наведено у (табл. 1).

**Таблиця 1 – Вміст розрахункового класу у продуктах схеми**

| № продукту                    | 1 | 3  | 4  | 5 | 7  | 8 | 9  |
|-------------------------------|---|----|----|---|----|---|----|
| Вміст розрахункового класу, % | 3 | 30 | 50 | 5 | 80 | 8 | 40 |



**Рис. 1 – Розрахункова схема подрібнення.**

## 1. Визначення мас продуктів

• I-а стадія подрібнення:

$$Q_4 = Q_1 = 600 \text{ т/год.}$$

Для визначення мас продуктів складаємо балансове рівняння для перевірної класифікації I стадії подрібнення:

$$Q_3\beta_3 = Q_4\beta_4 + Q_5\beta_5$$

при  $Q_3 = Q_4 + Q_5$  і  $Q_4 = Q_1$  одержимо:

$$(Q_1 + Q_5)\beta_3 = Q_1\beta_4 + Q_5\beta_5,$$

звідки

$$Q_5 = Q_1 \cdot \frac{\beta_4 - \beta_3}{\beta_3 - \beta_5} = 600 \cdot \frac{50 - 30}{30 - 5} = 480 \text{ , т/год;}$$

$$Q_2 = Q_3 = Q_1 + Q_5 = 600 + 480 = 1080 \text{ , т/год.}$$

Вибір млина I стадії подрібнення здійснюється по продукту 1 (без циркуляційного навантаження), а вибір класифікатора – по продукту 3 (з циркуляційним навантаженням).

• II-а стадія подрібнення:

$$Q_7 = Q_1 = 600 \text{ т/год.}$$

Для визначення циркуляційного навантаження і оригінального живлення, по якому вибирається млин, II стадія подрібнення представляється у розгорнутому вигляді, тобто с роздільними операціями попередньої і перевірної класифікації (рис. 2).

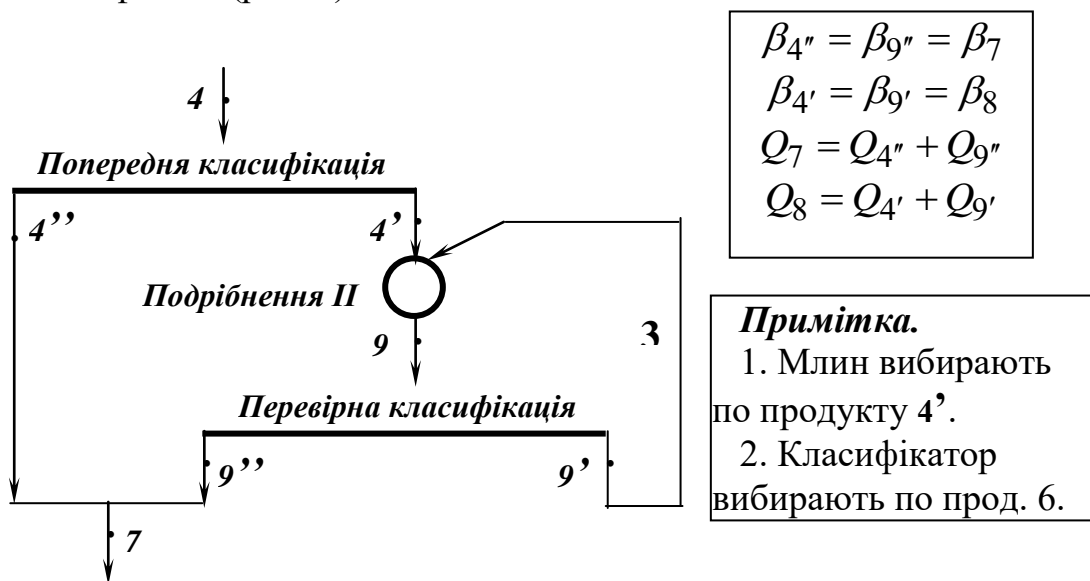


Рис. 2 – Розрахункова схема II стадії подрібнення.



Для визначення мас продуктів складаємо балансове рівняння для попередньої класифікації II стадії подрібнення:

$$Q_4\beta_4 = Q_{4''}\beta_{4''} + Q_{4'}\beta_{4'}$$

при  $Q_{4''} = Q_4 - Q_{4'}$  одержимо:

$$Q_4\beta_4 = (Q_4 - Q_{4'})\beta_{4''} + Q_{4'}\beta_{4'},$$

звідки

$$Q_{4'} = Q_4 \cdot \frac{\beta_{4''} - \beta_4}{\beta_{4''} - \beta_{4'}} = 600 \cdot \frac{80 - 50}{80 - 8} = 250, \text{ т/год};$$

$$Q_{4''} = Q_4 - Q_{4'} = 600 - 250 = 350, \text{ т/год}.$$

Для визначення мас продуктів складаємо балансове рівняння для перевірної класифікації II стадії подрібнення:

$$Q_9\beta_9 = Q_{9''}\beta_{9''} + Q_{9'}\beta_{9'}$$

при  $Q_9 = Q_{4'} + Q_{9'}$  і  $Q_{4'} = Q_{9''}$  одержимо:

$$(Q_{4'} + Q_{9'})\beta_9 = Q_{4'}\beta_{9''} + Q_{9'}\beta_{9'},$$

звідки

$$Q_{9'} = Q_{4'} \cdot \frac{\beta_{9''} - \beta_9}{\beta_9 - \beta_{9'}} = 250 \cdot \frac{80 - 40}{40 - 8} = 312,5, \text{ т/год};$$

$$Q_8 = Q_9 = Q_{4'} + Q_{9'} = 250 + 312,5 = 562,5, \text{ т/год}.$$

$$Q_6 = Q_4 + Q_9 = 600 + 562,5 = 1162,5, \text{ т/год}.$$

## **2. Вибір обладнання схеми подрібнення**

### **2.1 Млини**

У I стадію подрібнення надходить руда крупністю 0 – 20 мм, вміст розрахункового класу – 0,074 мм у вихідному продукті  $\beta_6 = \beta_1 = 3\%$ , у остаточному –  $\beta_0 = \beta_4 = 50\%$ . У I стадії прийнятий до установаження стержневий млин з центральним розвантаженням – МСЦ.

У II стадію подрібнення надходить руда крупністю 0 – 3 мм, вміст розрахункового класу – 0,074 мм у вихідному продукті  $\beta_6 = \beta_8 = 8\%$ , у остаточному –  $\beta_0 = \beta_7 = 80\%$ . У II стадії прийнятий до установаження кульовий млин з центральним розвантаженням – МШЦ.

Продуктивність барабанних млинів розраховуємо за методом подібності, виходячи з практичних даних роботи млинів на подібній сировині

при режимах, близьких до оптимального, тобто з використанням даних роботи ЗФ-аналога. Розрахунок робимо за питомою продуктивністю.

Питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом визначається за формулою:

$$q = q_e k_n k_k k_T k_\varphi k_\psi k_L k_D,$$

де  $q$  – питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м<sup>3</sup>;  $q_e$  – питома продуктивність еталонного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м<sup>3</sup>;  $k_n$  – коефіцієнт, що враховує відмінності в подрібнюваності проектного до переробки руди і руди, що переробляється;  $k_k$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в крупності вихідного і кінцевого продуктів на діючій та проектній фабриках;  $k_T$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в типі проектного і працюючого млинів;  $k_\varphi$  – коефіцієнт, що враховує розходження в об’ємному заповненні проектного і працюючого млинів подрібнюючим середовищем;  $k_\psi$  – коефіцієнт, що враховує розходження в частоті обертання проектного і працюючого млинів;  $k_L$  – коефіцієнт, що враховує розходження в довжині барабанів проектного і працюючого млинів;  $k_D$  – коефіцієнт, що враховує розбіжності в діаметрах барабанів проектного і працюючого млинів.

За еталонний прийнятий кульовий млин МШЦ 2700х3600, що працює на ЗФ-аналогі і подрібнює руду середньої твердості крупністю 0 – 15 мм.

Параметри еталонного млина МШЦ 2700х3600:  $V_g = 17,5 \text{ м}^3$ ;  $Q_e = 35$  т/год;  $N_e = 400$  кВт;  $\beta_g^e = 5\%$ ;  $\beta_o^e = 60\%$ ;  $\varphi_e = 35\%$ ;  $\psi_e = 75\%$ .

У відповідності до параметрів еталонного млина його питома продуктивність складає:

$$q_e = \frac{Q_e(\beta_o^e - \beta_g^e)}{V_e} = \frac{35 \cdot (0,60 - 0,05)}{17,5} = 1,1 \text{ т/год} \cdot \text{м}^3.$$

Типорозміри прийнятих до установки млинів наведені у табл. 2.

**Таблиця 1 – Типорозміри прийнятих до установки млинів**

| Варіант | I стадія      | II стадія     |
|---------|---------------|---------------|
| 1       | МСЦ 3600х4500 | МШЦ 3600х4500 |
| 2       | МСЦ 4000х5500 | МШЦ 4000х5500 |
| 3       | МСЦ 4500х6000 | МШЦ 4500х6000 |

• **Визначення поправкових коефіцієнтів**

*Коефіцієнт подрібнюваності руди  $k_n$ .*

Якщо руда, що проектується до переробки, має твердість меншу еталонної,  $k_n > 1$ . Якщо руда, що проектується до переробки, має твердість більшу еталонної,  $k_n < 1$ . Якщо руда, що проектується до переробки, і еталонна мають близьку твердість,  $k_n = 1$ .

*Коефіцієнт крупності руди  $k_k = m/m_e$ ,*

де  $m$  – відносна продуктивність млина, що проектується, при заданій крупності вихідного і залишкового продуктів;

$m_e$  – те ж саме для еталонного млина, що працює у промислових умовах.

Відносні продуктивності млинів і коефіцієнти  $k_k$  визначені з використанням даних табл. 3.4, результати розрахунку наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Відносні продуктивності млинів і коефіцієнти  $k_k$

| Млин      | Крупність вихідної руди, мм | Вміст класу – 0,074 мм у залишковому продукті, % | Відносна продуктивність $m$ | Коеф. $k_k$ |
|-----------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------|
| Еталонний | 0 – 15                      | 60   | 0,96                        | –           |
| I стадія  | 0 – 20                      | 50   | 0,92                        | 0,96        |
| II стадія | 0 – 3                       | 80   | 0,94                        | 0,98        |

*Коефіцієнт типу млина  $k_T$ .* Якщо еталонний млин МШЦ, а прийнятий до установки – МШР,  $k_T = 1,10 – 1,15$ . Якщо еталонний млин МШР, а прийнятий до установки – МШЦ,  $k_T = 0,85 – 0,90$ . Якщо еталонний млин і прийнятий до установки одного типу,  $k_T = 1$ .

*Коефіцієнт заповнення подрібнюючим середовищем  $k_\varphi = \varphi / \varphi_e$ ,*

де  $\varphi$  і  $\varphi_e$  – ступені заповнення проектованого і еталонного млинів подрібнюючими тілами (максимальний ступінь заповнення – див. табл. 3.7). Ступені заповнення, прийняті для проектованих млинів, і коефіцієнти заповнення наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Ступені заповнення і коефіцієнти  $k_\varphi$

| Показники     | Еталонний млин | МСЦ (I стадія) | МШЦ (II стадія) |
|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| $\varphi, \%$ | 35             | 35             | 38              |
| $k_\varphi$   | –              | 1,00           | 1,08            |

Коефіцієнт частоти обертання  $k_\psi = \psi / \psi_e$ ,

де  $\psi$  і  $\psi_e$  – частоти обертання проектового і еталонного млинів (максимальні частоти обертання – див. табл. 3.6). Частоти обертання, прийняті для проектованих млинів, і коефіцієнти частоти обертання наведені у табл. 5.

**Таблиця 5 – Частоти обертання млинів і коефіцієнти  $k_\psi$**

| Показники  | Еталонний млин | МСЦ (I стадія) | МШЦ (II стадія) |
|------------|----------------|----------------|-----------------|
| $\psi, \%$ | 75             | 70             | 75              |
| $k_\psi$   | –              | 0,93           | 1,00            |

Коефіцієнт довжини млина  $k_L = (L / L_e)^{0,15}$ ,

де  $L$  і  $L_e$  – довжина проектового і еталонного млинів, м. Довжина проектованих млинів, і коефіцієнти довжини наведені у табл. 6.

**Таблиця 6 – Довжина млинів і коефіцієнти  $k_L$**

| Показники | Еталонний млин | Проектовані млини |      |      |
|-----------|----------------|-------------------|------|------|
| $L, \%$   | 3,6            | 4,5               | 5,5  | 6,0  |
| $k_L$     | –              | 1,03              | 1,06 | 1,08 |

Коефіцієнт діаметра млина  $k_D = \sqrt{(D - 2t) / (D_e - 2t_e)}$ ,

де  $D$  і  $D_e$  – діаметри проектового і еталонного млинів, м;  $t$  і  $t_e$  – товщина футеровки проектового і еталонного млинів, м.

$$t = 0,04 + 0,02D$$

Результати розрахунку коефіцієнта  $k_D$  наведені у табл. 7.

**Таблиця 7 – величина поправкового коефіцієнта  $k_D$**

| Млин        | Діаметр, м | Товщина футеровки | Коеф. $k_D$ |
|-------------|------------|-------------------|-------------|
| Еталонний   | 2,7        | 0,094             | –           |
| Проектовані | 3,6        | 0,112             | 1,16        |
|             | 4,0        | 0,120             | 1,23        |
|             | 4,5        | 0,130             | 1,30        |

**• Визначення продуктивності млинів**

З використанням поправкових коефіцієнтів визначаємо *питомі продуктивності проектованих млинів*.(табл. 8).

**Таблиця 7 – Питомі продуктивності млинів**

| Стадія | Вар. | $q_e$ | $k_n$ | $k_k$ | $k_T$ | $k_\phi$ | $k_\psi$ | $k_L$ | $k_D$ | $q$  |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|------|
| I      | 1    |       |       |       |       |          |          | 1,03  | 1,16  | 1,17 |
|        | 2    | 1,1   | 1     | 0,96  | 1     | 1        | 0,93     | 1,06  | 1,23  | 1,28 |
|        | 3    |       |       |       |       |          |          | 1,08  | 1,30  | 1,38 |
| II     | 1    |       |       |       |       |          |          | 1,03  | 1,16  | 1,39 |
|        | 2    | 1,1   | 1     | 0,98  | 1     | 1,08     | 1,00     | 1,06  | 1,23  | 1,52 |
|        | 3    |       |       |       |       |          |          | 1,08  | 1,30  | 1,63 |

Визначаємо продуктивність прийнятих у проекті млинів і їх число:

$$Q_M = \frac{qV_M}{\beta_o - \beta_e}; \quad n_M = \frac{kQ_{ЖС}}{Q_M}.$$

Результати розрахунку продуктивності наведені у табл. 8.

**Таблиця 8 – продуктивність млинів і їх число**

| Стадія | Вар. | $q$  | $V$ | $\beta_o$ | $\beta_e$ | $Q_M$ | $Q_{ЖС}$ | $n_M$ |
|--------|------|------|-----|-----------|-----------|-------|----------|-------|
| I      | 1    | 1,17 | 32  |           |           | 80    |          | 8     |
|        | 2    | 1,28 | 60  | 0,50      | 0,03      | 160   | 600      | 4     |
|        | 3    | 1,38 | 82  |           |           | 240   |          | 3     |
| II     | 1    | 1,39 | 32  |           |           | 65    |          | 4     |
|        | 2    | 1,52 | 60  | 0,80      | 0,08      | 125   | 250      | 2     |
|        | 3    | 1,63 | 82  |           |           | 185   |          | 2     |

Вибір варіанта млинів здійснюється за результатами техніко-економічного порівняння (табл. 9).

**Таблиця 9 – техніко-економічне порівняння варіантів**

| Стадія | Вар. | Кільк. | Маса, т |      | Установлена потужність, кВт |      | Вартість, млн. грн. |       |
|--------|------|--------|---------|------|-----------------------------|------|---------------------|-------|
|        |      |        | од.     | заг. | од.                         | заг. | од.                 | заг.  |
| I      | 1    | 8      | 160     | 1280 | 1000                        | 8000 | 13,0                | 104,0 |
|        | 2    | 4      | 250     | 1000 | 2000                        | 8000 | 15,9                | 63,6  |
|        | 3    | 3      | 310     | 930  | 2500                        | 7500 | 21,7                | 65,1  |
| II     | 1    | 4      | 160     | 640  | 1000                        | 4000 | 13,0                | 52,0  |
|        | 2    | 2      | 250     | 500  | 2000                        | 4000 | 15,9                | 31,8  |
|        | 3    | 2      | 310     | 620  | 2500                        | 5000 | 21,7                | 43,4  |

Найбільш економічний 2-й варіант, але він незручний при компонуванні обладнання, тому приймається по 4 млина у кожній стадії (у I стадії 4 млина МСЦ 4000х5500, у II стадії – 4 млина МШЦ 3600х4500).

### **Класифікатори**

*Спіральні класифікатори* використовують у замкнених циклах подрібнення для одержання грубого за крупністю зливу. Тому у I стадії установлюються спіральні класифікатори. Продуктивність класифікатора визначається з використанням емпіричних формул:

по зливу:

$$Q_C = 4,56 m k_\beta k_\delta k_c k_\alpha D^{1,768}, \text{ т/год};$$

по пісках:

$$Q_{II} = 5,45 m k_\delta k_\alpha D^3 n, \text{ т/год},$$

де  $m$ ,  $D$ ,  $n$  – число, діаметр (м) і частота обертання спіралей ( $\text{хв}^{-1}$ );  $k_\beta$ ,  $k_\delta$ ,  $k_c$ ,  $k_\alpha$  – коефіцієнти, що враховують відповідно крупність зливу, густину руди, розрідженість зливу і кут нахилу ванни класифікатора.

#### **• Визначення поправкових коефіцієнтів**

*Коефіцієнт крупності зливу*  $k_\beta$ , визначається за даними табл. 4.5.

При вмісті класу ( $-0,074$  мм) у зливі  $\beta = 50\%$   $k_\beta = 1,75$ .

*Коефіцієнт густини руди*  $k_\delta = \delta / 2,7$ ,

де  $\delta$  – об'ємна густина руди,  $\text{т/м}^3$ .

При об'ємній густині руди  $\delta = 3,5 \text{ т/м}^3$   $k_\delta = 1,30$ .

*Коефіцієнт розрідженості зливу*  $k_c$  враховує розбіжності між заданою розрідженістю ( $R$ ) і базисною ( $R_{2,7}$ ) для даної крупності зливу. Величина коефіцієнта  $k_c$  залежно від густини руди і співвідношення розрідженостей  $R$  і  $R_{2,7}$  визначається за даними табл. 4.6.

При густині зливу, яка відповідає базисній,  $k_c = 1$

*Коефіцієнт кута нахилу ванни класифікатора*  $k_\alpha$  визначається за табл. 4.7.

При куті нахилу ванни класифікатора  $\alpha = 14^\circ$   $k_\alpha = 1,12$ .

#### **• Визначення типорозміру класифікатора**

Оскільки у I стадії прийнято до установки 4 млина, то доцільно визначити продуктивність однієї секції і для неї виконувати розрахунок необхідного класифікаційного обладнання.

Годинна продуктивність однієї секції:

– по зливу  $Q_4^* = Q_4 / n_m = 600/4 = 150 \text{ т/год};$

– по пісках  $Q_5^* = Q_5 / n_m = 180/4 = 120 \text{ т/год}.$

Визначаємо діаметр спіралей класифікатора (класифікатор двоспіральний  $m = 2$ ):

$$D^{1,768} = Q_4^* / 4,56 m k_{\beta} k_{\delta} k_c k_{\alpha} = 150 / 4,56 \cdot 2 \cdot 1,75 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 1,12 = 6,45 \text{ м.}$$

$D = 2,87$  м, найближчий стандартний розмір –  $D = 3$  м.

Продуктивність обраного класифікатора по зливу:

$$Q_C = 4,56 \text{ м } k_{\beta} k_{\delta} k_c k_{\alpha} D^{1,768} = 4,56 \cdot 2 \cdot 1,75 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 1,12 \cdot 3^{1,768} = 162 \text{ т/год.}$$

Перевіряємо вибраний класифікатор на продуктивність по пісках:

$$Q_{II} = 5,45 \text{ м } k_{\delta} k_{\alpha} D^3 n = 5,45 \cdot 2 \cdot 1,3 \cdot 1,12 \cdot 3^3 \cdot 3 = 1285 \text{ т/год.}$$

Приймаємо 4 двоспиральних класифікатора – 2КСН-30 (по одному класифікатору на кожний млин).

### **Гідроциклони**

Для класифікації подрібненого продукту II стадії подрібнення ( $Q_6 = 1162,5$  т/год.) плануються гідроциклони ГЦ-710, ГЦ-1000 і ГЦ-1400.

Продуктивність гідроциклонів і їх число визначається за формулами:

$$Q_{гц} = 200 D^2, \text{ т/год;} \quad n = 1,1 Q_{ж} / Q_{гц}.$$

Результати розрахунку продуктивності і числа гідроциклонів наведені у табл. 10.

**Таблиця 10 – Продуктивність і число гідроциклонів**

| Гідроциклон           | ГЦ-710 | ГЦ-1000 | ГЦ-1400 |
|-----------------------|--------|---------|---------|
| Продуктивність, т/год | 100    | 200     | 400     |
| Число гідроциклонів   | 13     | 7       | 4       |

Вибір варіанта гідроциклонів здійснюється техніко-економічним порівнянням (табл. 11).

**Таблиця 11 – Техніко-економічне порівняння варіантів**

| Варіант | ГЦ   | Кільк. | Маса, т |       | Вартість, тис. грн. |       |
|---------|------|--------|---------|-------|---------------------|-------|
|         |      |        | од.     | заг.  | од.                 | заг.  |
| 1       | 710  | 13     | 1,45    | 18,85 | 18,0                | 234,0 |
| 2       | 1000 | 7      | 2,40    | 16,80 | 22,0                | 154,0 |
| 3       | 1400 | 4      | 4,50    | 18,00 | 38,0                | 152,0 |

З технологічних і економічних міркувань до установки прийняті ГЦ-1400 (зручність компонування – по одному гідроциклону на кожний млин і найменші витрати на ГЦ). Але гідроциклони приймають зі 100%-ним резе-

рвом, таким чином, у кожного млина буде встановлено по 2 гідроциклона – 1 робочий і 1 резервний.

Апаратурне зображення 1-ої секції розрахованої схеми подрібнення наведено на рис. 3.

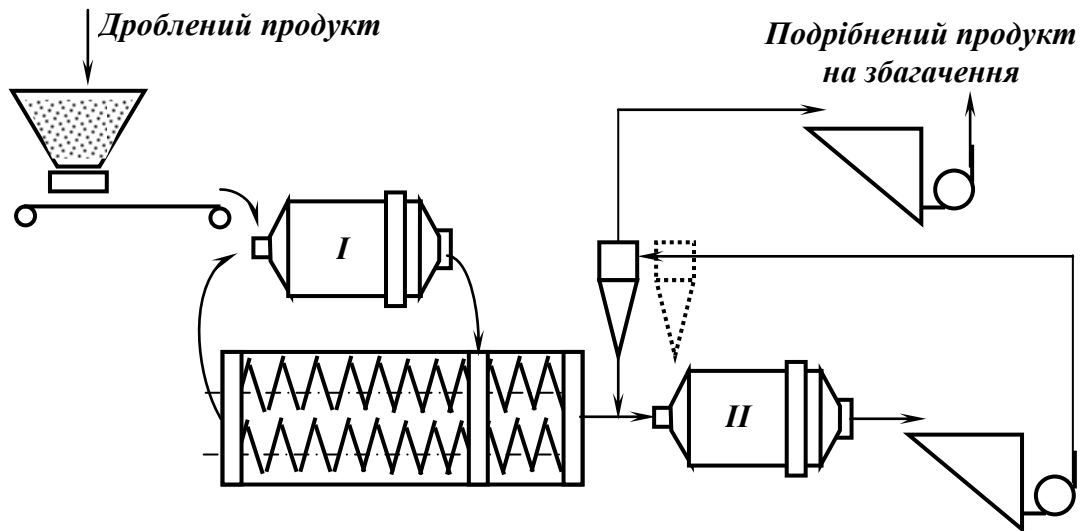


Рис. 3 – Апаратурне зображення 1-ої секції розрахованої схеми подрібнення (усього секцій – 4).



## Список рекомендованой литературы

1. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415с.
2. Разумов К.А., Перов В.В. Проектирование обогатительных фабрик: Учеб. для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982.– 518 с.
3. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 285с.
4. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. –296 с.
5. Справочник по обогащению руд: Т. 1. Подготовительные процессы./ Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского – М.: Недра, 1982. – 366 с.
6. Справочник по обогащению углей./ Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. – М.: Недра, 1984.– 614 с.
7. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик: Кн. 1 / Редкол. О.Н. Тихонов и др. – М.: Недра, 1988.– 374с.
8. Смирнов В. О., Білецький В. С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. — Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. — 284 с.
9. Сокур М.І. 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.
10. Сокур Н.И. Экономия энергоресурсов при дезинтеграции минерального сырья // Пути экономии ресурсов при обогащении руд: сборник статей / Минмет СССР. Ин-т Механообрчермет. - М.: Недра, 1990. - С. 3-8.
11. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. - М.: Недра, 1982. - 212с.
12. Korpi P.A., Dopson G.W. Angular Spiral Lining systems in Wet Grinding Grate Discharge Ball Mills // Mining Engeneereng - 1982. - 34. - №1, - P. 57-60.
13. Потураев В.И. , Сокур Н.И. Мельницы самоизмельчения. -Киев: Наукова думка, 1988. 220 с.
14. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик - М.: Гостехиздат. - 1963. - 198 с.
15. Крюков Д.Н. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. - М.: Недра. -1986. -. 173 с.
16. Михельсон М.Г., Шильман А.А. Футеровка мельниц самоизмельчения МБ 70-23 и ММС 70-23 // Горный журнал. -1977. -№6. - С. 20-25.
17. Хватов Ю.А., Шолудько А.А., Шильман А.А. Опыт эксплуатации мельниц самоизмельчения на Ингулецком ГОКе // Горный журнал. - 1972, - №10. - С. 35-37.

18. Промышленные испытания полусамоизмельчения железных руд. / А.А. Ширяев, Н.И. Сокур, В.П. Корж и др. // Горн, журнал.. - 1984. - №10. - С. 53-55.
19. Испытание технологии комбинированного измельчения на Ингулецком ГОКе / А.А. Ширяев, Н.И. Сокур, В.П. Коряс и др. // Горн, журнал.. - 1980. - №3. - С. 35-37.
20. Промышленные испытания мельниц МШР-4000х7500 и МШЦ-4000х7500 / Н.И. Сокур, В.П. Корж и др. // Горн, журнал.. - 1987. - №7.-С. 40-42,
21. Яшин В.П., Бортников В.П. Теория и практика самоизмельчения руд. - М.: Недра, 1978. - 227 с.
22. Сысолятин С.А., Першуков А.А. Перспективы применения избирательного измельчения в газоструйной мельнице. // Горный журнал. - 1980, №4. - С. 53-54.
23. Лесин А.Д., Локшина Р.В. Исследования по применению центробежных мельниц при измельчении руд //Цветные металлы. - 1985.-№12.-С. 78-82.
24. Muller C., Weiger T., Einsast von Vertical-Prallrecherhals Alternative zu Herko mlichenerkleineru Vertahren // Aufbereitung – Technsk/ - 1988, -No.1- pp 26-31.
25. Мельницы для руд. // Горное и нефтепромысловое машиностроение: РЖ. - 1988. - №12. - с. 26. - Реф. ст.:
26. Robertson J.L., Impact crucher replaces three compresation cruchers in plant // ROCK PRODUCTS. - 1983. -. - N5. - pp. 44,46,52.
27. Eine Neue Brech-Dimension // AUBEREITUNG-TECHNIK. - 1986. - №2. - P.P. 113-114.
28. SBM Vertical cruchers the model series V // March und Stanidans. - 1986. - No.1-2. - p.p. 34-37.
29. Pearse G., Cruchers and grinding mills // MINING MAGAZINE, - 1986. - APR, - p.p. 330-351.
30. Сокур Н.И., Соколовский А.К. Закономерности движения материала в разгрузочной части барабанной мельницы с принудительной разгрузкой // Гор. журн. - 1981, №6. С, 51-53.
31. Сокур Н.И. О новой конструкции разгрузочных элеваторов барабанной мельницы // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. М-ва высш. и сред. спец. образования УССР. -Киев: Техника, 1982. - Вып. 31. - С. 25-27.
32. О криволинейных элеваторах разгрузочных устройств барабанных мельниц// Д.К. Крюков, Н.И. Сокур, В.И. Кириченко и др. // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. М-ва высшю и сред. спец. образования УССР. -Киев: Техника, 1984. - Вып. 34. - С. 30-36.
33. Об эффективности работы элеваторов разгрузочных устройств барабанных мельниц/Д.К. Крюков, Н.И. Сокур, В.И. Кириченко и др. // Обога-

- щение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. М-ва высш. и сред. спец. образования УССР. -Киев: Техника, 1985. - Вып. 35. - С. 19-24,
34. Сокур Н.И., Соколовский А.К., Малиновский Р.А. О пропускной способности разгрузочных решеток барабанных мельниц // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. М-ва высш. и сред. спец. образования УССР. -Киев: Техника, 1985.-Вып. 35.-С. 15-18.
  35. Сокур Н.И., Калиниченко А.Ф., Бульба. Новая конструкция футеровки мельницы самоизмельчения ММ С 90-30А // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. информю 1988, №3, - с. 29.
  36. А.с. 1480196, СССР, МКИ. ВО 2С 17/18 Футеровка барабанной мельницы / Н.И. Сокур, А.Ф. Калиниченко, Ю.Г. Бам, В.Ф. Шепель // Б.И., 1990
  37. Сокур Н.И. Внедрение новой конструкции разгрузочной решетки мельниц самоизмельчения // Цветная металлургия. -1981. №5.-с. 18.
  38. А.с. 1202618 СССР, МКИ. ВО 2С 17/18 Разгрузочная решетка барабанной мельницы самоизмельчения / Н.И. Сокур, В.П. Корж, А.В. Юртаев и др. // Б.И., 1983, №1.
  39. А.с. 1115800 СССР, МКИ. ВО 2С 17/18 Разгрузочное устройство барабанной мельницы / Н.И. Сокур, А.А. Ширяев, Р.Т. Журман и др.) Б.И., 1984, №36.
  40. Сокур Н.И., Калиниченко А.Ф., Бульба В.И. Новая конструкция разгрузочных элеваторов коробчатого типа для мельниц самоизмельчения // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. информ. 1987, №23.
  41. Сокур Н.И., Внедрение новой конструкции узлов проточной части барабанных мельниц /У Горное дело и обогащение руд. НИИЦветмет. - 1987. - №5. - 16 с.
  42. Сокур Н.И. Промышленные испытания и внедрение новой конструкции разгрузочных элеваторов мельниц МШР-45х50 на обогатительной фабрике НКГОКа / Ин-т Механобрчермет. -Кривой Рог, 1989. - 10 е.: Деп. в Черметинформации 24.04.89, №6058.
  43. Сокур Н.И. Испытание и внедрение новой конструкции разгрузочного устройства мельницы МШР-40х45 на Северном ГОКе / Ин-т Механобрчермет. - Кривой Рог, 1989. - 11с.: Деп. в Черметинформации 24.04.89, №5057.
  44. Сокур И.И., Ширяев А.А., Корж В.П. Промышленное испытание новых мельниц МШР-40х75 и МШЦ-40х75 на обогатительной фабрике Ингулецкого ГОКа // Горн. журн. - 1987. - №7. - С. 40-42.
  45. Сокур Н.И., Ширяев А.А., Корж В.П. Промышленное испытание полу-самоизмельчения железных руд // Горн. журн. -1984, -№10. - С. 83-86.
  46. Сокур Н.И., Ширяев А.А., Корж В.П и др. Испытание технологии комбинированного измельчения на Ингулецком ГОКе // Горн. журн. - 1988, - №3. - С. 35-37.

47. Промышленные испытания технологии комбинированного измельчения на СевГОКе / НИ. Сокур, В.П. Корж, Л.Н. Ха-ладжи и др. // Горн. журн. - 1990, - №5. - С, 41-43.
48. Сокур Н.И., Корж В.П., Юртаева А.В., Синявский В.В. Испытания новой технологии комбинированного измельчения на Ингулецком ГОКе // Горн. журн. - 1990, - №6. - С. 35-37.
49. Сокур Н.И., Гаращенко А.И. Исследование деформации элементов барабана мельницы самоизмельчения в процессе монтажа // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования: Отрасл. тематич. сб. / Минмет СССР. ВНИИА чермет. - М.: Металлургия, 1979. - Выш.б. - С. 64.
50. А.с. 1608929 СССР. Барабанная мельница / Н.И. Сокур, А.Ф. Калиниченко, Е.К. Бабецидр. - 1990.
51. Состояние и перспективы развития технологии и оборудования для измельчения полезных ископаемых / М.Я. Антонычев, Н.И. Сокур, А.А. Ширяев и др. // Черная металлургия. Бюл. научн.-техн. информ. - 1990, - №11, - С. 2-11.
52. Сокур Н.И., Хорольский В.П., Бабец Е.Н. Исследование и разработка математических моделей электропотребления РОФ // Горн. журн. - 1989. - №4, С. 47-48.
53. Усовершенствование центробежной дробилки на основе математической модели процесса / Н.И. Сокур, С.А. Учитель, А.Ф. Калиниченко и др. // Тезисы докл. Всесоюзн. науч. - техн. конф.: Развитие техники и технологии рудоподготовки в XII пятилетке. - Кривой Рог, 1986. - С . 44.
54. Сокур Н.И., Учитель С,А., Калиниченко А.Ф. Центробежные дезинтеграторы для мелкого дробления минерального сырья // Оборудование для дезинтеграции минерального сырья. Сб. науч. трудов ин-та Механобр. - Санкт Петербург. - 1992 г.
55. Сокур Н.И. К вопросу разрушения минерального сырья в поле центробежных сил // Новые технологии дня переработки руд: Отрасл. темат. сб. /Минпрем Украины. Кривой Рог, 1993.
56. Сокур Н.И. Переработка промышленных отходов в центробежных дезинтеграторах // Тез. докл. Всесоюз. наус.-техн. конф.: Комплексное освоение техногенных месторождений. - Челябинск, 1990. - С. 109-110.
57. Сокур Н.И. Исследование возможности применения центробежных дезинтеграторов для дробления строительных материалов // Тез. докл. Всесоюз. наус.-техн. конф.: Комплексное освоение техногенных месторождений. - Челябинск, 1990.
58. Сокур Н.И. Исследование влияния способа дробления на технологические показатели обогатительного передела // Новые технологии для переработки руд: Отрасл. темат. сб. / Минпром. Украины, - Кривой Рог, 1993.

59. Сокур Н.И. Исследование и создание типоразмерного ряда дезинтеграторов центробежного типа // Тез. докл. Всесоюз. наус.-техн. конф.: Пути развития науки и техники при подготовке руд черных металлов к металлургическому переделу. - Кривой Рог, 1996.-С. 46-48.
60. Сокур Н.И. Основы теории разрушения материала в поле центробежных сил. // Обогащение руд, 1995 - №6, С 8-15.
61. Система управления расходом электроэнергии на горнообогатительных предприятиях Украины / Н.И. Сокур, Е.К. Бабец, В.П. Хорольский, Т.В. Хорольская // Труды У международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". Одесса, 1997.
62. Сокур Н.И., Хорольский В.П. Исследование и разработка систем управления процессами дробления и измельчения на обогатительных фабриках. II Труды У международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1997.
63. Сокур Н.И. Повышение качества и конкурентоспособности дробленной аглоруды на Запорожском железорудном комбинате // Труды V международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1997.
64. Сокур НИ, Егурнов А.И., Равишин В.П. Новые бутары с эластичными просеивающими поверхностями для разделения продуктов измельчения мельниц самоизмельчения и рудногачечных. // Труды V международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1997.
65. Сокур НИ., Егурнов А.И., Равишин В.П. Новые просеивающие поверхности для грохотов дробильно-обогатительных фабрик. // Труды V международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". -Одесса, 1997.
66. Н.И. Сокур, А.И. Егурнов, В.П. Равишин, Д.А. Волков, И.Н. Сокур. Повышение эффективности процессов измельчения и классификации на обогатительной фабрике ИнГОКа. // "Труды VI международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1998.
67. Применение классифицирующих бутар с эластичной просеивающей поверхностью для разделения продуктов измельчения на Северном ГОКе. / Н.И. Сокур, А.И. Егурнов, В.П. Равишин, Д.А. Волков, И.Н. Сокур. // Труды VI международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1998.
68. Сокур НИ., Егурнов А.И.. Сокур И.Н. исследование и повышение параметров надежности классифицирующих аппаратов рудоразмольных

- мельниц. // Труды VII международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1999.
69. Сокур Н.И., Бабец Е.Н., Хорольский В.П. Управление расходом электроэнергии в процессах дезинтеграции руд. // Труды VII международной конференции "Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения". - Одесса, 1999.
  70. М. І. Сокур. Дослідження процесу дезинтеграції твердих матеріалів у відцентрових дезінтеграторах // М. І. Сокур, В. С. Білецький, Л. М. Сокур, Д. П. Божик, І. М. Сокур / Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. № 3.
  71. Thomas, A; Filippov, L.O. (1999). "Fractures, fractals and breakage energy of mineral particles". *International Journal of Mineral Processing*. 57 (4): 285. doi:10.1016/S0301-7516(99)00029-0.
  72. Baron, M.; Chamayou, A.; Marchioro, L.; Raffi, J. (2005). "Radical probes to measure the action of energy on granular materials". *Advanced Powder Technology*. 16 (3): 199. doi:10.1163/1568552053750242.
  73. Wills, B.A. (2006). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th ed. Amsterdam ; Boston, MA. p. 157. ISBN 0750644508.
  74. Mular, Andrew L.; Halbe, Doug N.; Barratt, Derek J. (2002). *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings*. SME. pp. 2369. ISBN 978-0-87335-223-9. Retrieved 26 October 2012.
  75. J.M. Zuñiga, J.L. Mantari. A computational methodology to calculate the required power in disc crushers. Original Research Article. *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 4, Issue 1, January 2017, Pages 14-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcde.2016.09.003>
  76. P.W. Cleary, M.D. Sinnott, R.D. Morrison, S. Cummins, G.W. Delaney. Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM. Original Research Article. *Minerals Engineering*, Volume 100, January 2017, Pages 49-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.005>
  77. Marcus Johansson, Johannes Quist, Magnus Evertsson, Erik Hulthén . Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. Original Research Article. *Minerals Engineering*, In Press, Corrected Proof, Available online 29 September 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.015>
  78. Mohammad Javad Rahimdel, Mohammad Ataei. Application of analytical hierarchy process to selection of primary crusher. Original Research Article. *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 24, Issue 4, July 2014, Pages 519-523. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.05.016>

79. E. Lee, C.M. Evertsson. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. Original Research Article. Minerals Engineering, Volume 24, Issues 3–4, February–March 2011, Pages 188-194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.013>
80. Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. International Journal of Mineral Processing, Volume 90, Issues 1–4, 16 February 2009, Pages 97-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.007>

Наукове видання

**Сокур** Микола Іванович  
**Білецький** Володимир Стефанович  
**Єгурнов** Олександр Іванович  
**Воробйов** Олександр Миколайович  
**Смирнов** Валерій Олександрович  
**Божик** Денис Пилипович

## **ПІДГОТОВКА КОРИСНИХ КОПАЛИН ДО ЗБАГАЧЕННЯ**

Монографія

Українською мовою

Підп. до друку 07.07.2017. Формат 60x84 1/16. Папір офісний.  
Друк цифровий. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 22,6.  
Зам. № 66-17. Наклад 300 пр.

Видавець і виготовлювач ПП Щербатих О.В.  
вул. Софіївська, 36-Б, м. Кременчук, 39601  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №2129 від 17.03.2005р.  
[www.novabook.com.ua](http://www.novabook.com.ua)