

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## АНАЛІЗ РОБОТИ КУЛЬОВОГО МЛИНА ПЕРШОЇ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ ЯК ОБ'ЄКТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

*Метою статті є здійснення всебічного аналізу роботи кульового млина в першій стадії подрібнення руди як об'єкта оптимального керування. Встановлена структура заходів, які повинні здійснюватися на якісно вищому рівні. Це організаційні заходи переходу на використання куль і футеровки певного типу і технології виготовлення. До організаційно-технічного заходу відноситься перехід на один технологічний тип руди, що переробляється конкретним кульовим млином. Важливим також є і обґрунтування нових підходів, методів, закономірностей і рівнів технологічних параметрів, а також здійснення заходів більш якісного оцінювання та керування технологічними параметрами. Реалізація запропонованих заходів дозволить суттєво знизити собівартість залізорудного концентрату стосовно частки, яка вноситься на даній технологічній ділянці рудопідготовки.*

**Ключові слова:** рудопідготовка, перша стадія, кульовий млин, заходи, організаційні, обґрунтування, оцінювання, керування.

**Постановка проблеми.** Україна відноситься до країн з розвиненою чорною металургією, сировинною основою якої є магнетитовий концентрат, що отримують при збагаченні бідних залізних руд. Перевитрати електроенергії і матеріалів у вигляді куль і футеровки роблять собівартість вітчизняного концентрату дещо більшою порівняно із зарубіжними аналогами. Це негативно впливає на положення України на міжнародному ринку продукції чорної металургії. Фахівці вказують на ряд причин такого стану. Однією з них є недостатній рівень автоматизації рудопідготовки, особливо в першій стадії подрібнення-класифікації [22, с. 5]. Важливість реалізації даного напряму досліджень вказується в роботі [1, с. 275] та інших працях. Звертається увага і на інші напрями удосконалення рудопідготовки. Сьогодні виконано багато досліджень в цій сфері, однак узагальнення практично не здійснюються. Галузь несе великі збитки і це не відповідає положенням Державних документів, спрямованих на енергозбереження і матеріалозбереження. На реалізацію цих задач зорієнтовані і плани наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету за темами «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (державний реєстраційний номер (0109U7939) і «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних витратах» (0115U003942). Врахо-

вуючи, що дана стаття спрямована на розв'язання цих задач, її тема є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизацією процесів подрібнення вихідної руди в перших стадіях збагачувальних фабрик займаються достатньо давно вітчизняні вчені, вчені близького та далекого зарубіжжя [15, 19, 26, 13, 32] та інші, однак в рудопідготовці все ще допускаються великі енергетичні та матеріальні втрати. Увага здебільшого приділялася основним технологічним процесам. Розроблялися інформаційні засоби та системи автоматичного керування. Повний їх арсенал розглянуто в роботі [21]. Деякі з цих засобів випускаються серійно. В роботі [11, с. 13] акцентується увага на відсутності надійних засобів контролю необхідної точності або на значній їх вартості. На необхідність розробки інформаційних засобів вказано і в роботі [22, с. 173]. Не дивлячись на те, що рівень автоматизації перших стадій подрібнення руди, обладнання, яке використовується, та технології з року в рік удосконалюються, рудопідготовка на цій ділянці технологічного процесу ще не відповідає сучасним вимогам, хоч ще в 1975 р. О.М. Марюта звернув увагу на те, що процеси на магнітозбагачувальних фабриках необхідно розглядати з точки зору їх оптимізації. Тобто кульовий млин першої стадії подрібнення необхідно розглядати як об'єкт оптимального керування з ув'язкою між собою всіх функціональних систем і параметрів. Такі дослідження ніхто не про-

водив, а саме вони можуть відкрити шлях до розв'язання даної проблеми.

**Постановка завдання.** Метою роботи є здійснення всебічного аналізу роботи кульового млина першої стадії подрібнення руди як об'єкта оптимального керування для отримання структури заходів, реалізація яких дозволить перевести функціонування технологічного агрегату на новий, якісно вищий рівень, що забезпечить отримання максимальної його продуктивності за готовим продуктом за мінімальних енергетичних і матеріальних перевитрат.

**Виклад основного матеріалу.** Бідні залізні руди перед збагаченням в основному подрібнюють у кульових млинах. Перша стадія несе основне енергетичне і матеріальне навантаження. Бідні залізні руди відрізняються значною міцністю, тому кульові млини працюють у водоспадному режимі. В цьому режимі роботи подрібнення матеріалу здійснюється в основному за рахунок ударів падаючих куль [10, с.14]. При цьому майже половина кульового навантаження ефективно не використовується. С.Ф. Шинкоренко експериментально досліджував водоспадний режим подрібнення в барабанному млині. Він встановив наявність двох фаз у цьому процесі – це руйнування ударом і подрібнення тертям. Ним же обґрунтовано положення про можливість збільшення ефективності процесів створення нової поверхні внаслідок збільшення частки руйнування матеріалу тертям [30]. Ще в 1961 р. С.Ю. Андрєєв теоретично довів, що у водоспадному режимі на траєкторіях підйому між шарами кульового навантаження існує ковзання, результатом якого є зменшення кутових швидкостей внутрішніх шарів [2, с. 62]. При цьому частина внутрішніх шарів навантаження циркулює відповідно каскадному режиму, де матеріал в основному розтирається. В таких режимах також може створюватися зона п'яти, де відбувається інтенсивне подрібнення як розтиранням, так і ударом [14, с. 40]. Крім того, у промислових млинах з такими режимами роботи у поперечних перерізах барабана може створюватися малорухоме ядро, навколо якого за замкнутими траєкторіями циркулюють кулі, які до його складу не входять. Тут також здійснюється інтенсивне подрібнення руди розтиранням [14, с. 40]. Такий режим може суттєво покращити показники роботи кульового млина і його слід використовувати.

Для кульових млинів найбільш важливими є співвідношення розмірів куль і подрібнюваного матеріалу, кількість куль, їх густина, твердість, ді-

метр барабана, швидкість обертання [28, с. 139]. Останні п'ять параметрів практично витримуються на оптимальних рівнях. Ефективна робота кульових млинів потребує витримування правильного співвідношення між величиною куль і шматків матеріалу, що завантажуються у технологічний агрегат. Якщо у подрібнюваному матеріалі буде багато великих шматків, які не розмелюються, то вони будуть накопичуватись між подрібнювачем середовищем, що приведе до зупинки технологічного процесу. К.А. Разумов запропонував наступну залежність для визначення діаметра максимальної кулі [22, с. 95]:

$$d_{к.м.} = 28\sqrt[3]{d}, \quad (1)$$

де  $d$  – розмір найбільшого шматка вихідного матеріалу, мм.

Аналіз залежності (1) показує, що при  $d = 27$  мм найбільший діаметр кулі буде  $d_{к.м.} = 84$  мм, при  $d = 20$  мм,  $d_{к.м.} = 76$  мм, при  $d = 15$  мм,  $d_{к.м.} = 69$  мм.

Малі шматки руди краще подрібнюються меншими кулями. Зокрема А.Г. Касаткін вважає за необхідне використовувати можливо більш дрібні кулі, однак не допускаючи зменшення їх діаметра нижче певного значення. Він запропонував мінімальний розмір кулі визначати відповідно формулі [7, с. 786]

$$d_{к.мін} = d_{макс} \sqrt[3]{\frac{\sigma^2}{1,28 \cdot E \gamma_k D}}, \quad (2)$$

де  $d_{макс}$  – максимальний розмір шматка подрібнюваного матеріалу в см;  $\sigma$  – межа міцності подрібнюваного матеріалу при стисненні в кг/см<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності в кг/см<sup>2</sup>;  $\gamma_k$  – густина кулі в кг/см<sup>3</sup>;  $D$  – внутрішній діаметр барабана в см.

Для бідних залізних руд знайдені мінімальні розміри куль за формулою (2). Для  $d_{макс} = 2,5$  см, 2 см і 1,5 см вони відповідно дорівнюють 5 см, 4 см і 3 см.

Розмір подрібнюючих тіл сильно впливає на ефективність і продуктивність кульового млина. Досвід експлуатації кульових млинів показує, що їх продуктивність вище, якщо вони працюють на суміші куль різних діаметрів. Для певної крупності і твердості подрібнюваного матеріалу можливо підібрати характеристику крупності кульової суміші, яка забезпечує найбільш високу продуктивність млина [10, с. 40]. З точки зору максимуму продуктивності існує оптимальна характеристика крупності кульової суміші [22, с. 95]. При цьому бажані кулі можливо меншого розміру, при якому вони ще спроможні добре подрібнювати матеріал даної крупності і твердості [25, с. 207].

Доведено [10, с. 41], що у разі початкового завантаження технологічного агрегату кулями

одного розміру і послідуєчого завантаження молольними тілами того ж діаметра, через певний час, коли початкове завантаження спрацюється, в млині створиться суміш куль усіх діаметрів, склад якої визначається законом спрацювання молольних тіл. При цьому склад суміші зберігається впродовж роботи кульового млина як завгодно довго. Тобто в кульовому млині створюється і підтримується усталений склад кульового навантаження, однак він не забезпечує оптимальних показників продуктивності і ефективності внаслідок недовистачання дрібних і середніх куль [10, с. 42].

В роботі [9] на підставі теоретичних розробок і досвіду використання змішаного кульового навантаження запропоновано підхід створення оптимального кульового навантаження перед пуском технологічного агрегату і підтримання його незмінним в процесі експлуатації. Показано, що додаткове завантаження куль необхідно здійснювати різнорозмірними молольними тілами, що співпадає з експериментально встановленим і відміченим фактом в роботі [22, с. 111]. Таке кульове навантаження необхідно підтримувати, однак це потребує розробки обґрунтування підходу його створення.

На продуктивність і ефективність роботи кульових млинів з однотипною футеровкою значний вплив здійснює сегрегація (відділення) подрібнюючих тіл за крупністю вздовж і поперек барабана. Найбільш детально її досліджував Д.К. Крюков [10], та узагальнили автори роботи [6]. Поздовжня сегрегація куль в основному викликана нахилом барабана в напрямі руху пульпи. При цьому крупні кулі скочуються до розвантажувальної цапфи, а більш дрібні легко провалюються між крупнішими молольними тілами і далеко не переміщуються. Як наслідок, більш крупні кулі накопичуються у розвантажувального кінця барабана [10, с. 46]. Розшарування куль у поперечних перерізах барабана пояснюється тим, що центр маси малого сферичного тіла може бути ближче до внутрішньої поверхні барабана порівняно з більшим тілом. Внаслідок цього радіус обертання малих куль більший, а отже, більшою буде і швидкість порівняно з крупними сферичними тілами. Тому мала куля під час обертання барабану при наступних обертах підніметься вище і попаде у зовнішній шар кульового навантаження, більша куля має меншу швидкість, підніметься на меншу висоту і відриваючись від футеровки, залишиться в одному з внутрішніх шарів. Внаслідок цього більш крупні кулі залишаються в середній частині навантаження і не змішу-

ються з малими кулями в усій масі навантаження [6, с. 105]. Явище сегрегації куль за розміром вважають негативним, оскільки більш крупні шматки руди піддані подрібнюючій дії дрібних куль, а дрібний матеріал, навпаки, подрібнюється крупними сферичними тілами. Не дивлячись на це, в такому розподілі куль можливо виокремити і позитивні сторони.

Роль кульових млинів в першій стадії подрібнення виконують технологічні агрегати з центральним розвантаженням і розвантаженням через ґрати. Кульові млини з розвантаженням через ґрати були більш розповсюдженими на збагачувальних фабриках, оскільки відрізняються більш високою продуктивністю і видають подрібнений матеріал з меншим вмістом шламів порівняно з агрегатами з центральним розвантаженням. Питома продуктивність млинів з розвантаженням через ґрати на 10...15% вища ніж продуктивність агрегатів з центральним розвантаженням [24, с. 223]. Недоліком млинів з розвантаженням через ґрати є порівняно складна їх конструкція і тому більш висока вартість на одиницю ваги та на одиницю корисного об'єму. Недоліком млинів з центральним розвантаженням є менша питома продуктивність і більш сильна зашламованість подрібнюваних продуктів [24, с. 223]. Водночас великі кульові млини з центральним розвантаженням зручні в експлуатації, оскільки не потребують тривалих зупинок. Млини з розвантаженням через ґрати вимагають достатньо тривалої зупинки для прочистки ґрат, витрачають більше електричної енергії. Крім того, млини з центральним розвантаженням дають більш прийнятний продукт для перекачування насосами. Витрати на ремонт млинів з центральним розвантаженням менші порівняно з технологічними агрегатами з розвантаженням через ґрати [25, с. 220]. Спираючись на вищезазначене, можна зробити висновок, що в останній час такі кульові млини все більше витісняються технологічними агрегатами з центральним розвантаженням. Особливо великі можливості має кульовий млин з низьким розвантаженням.

Аналіз показує, що від оптимального режиму працюючий кульовий млин може відхилити ряд факторів (рис. 1). Їх можливо подати трьома групами. Першу групу представляють змінні фактори, викликані принципом дії кульового млина або особливостями допоміжного обладнання. До них відносяться наступні: поздовжня і поперечна сегрегація куль, спрацювання куль; спрацювання футеровки; зміна густини пульпи вздовж бара-

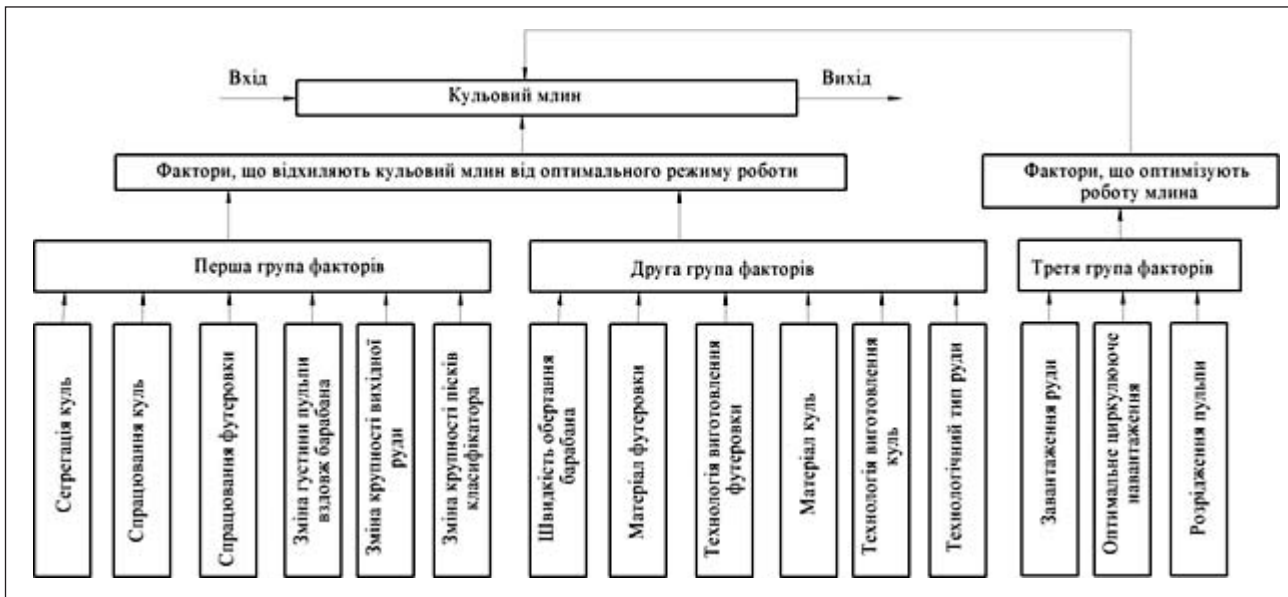


Рис. 1. Фактори, що діють на кульовий млин в процесі роботи

бана; зміна крупності вихідної руди; значення середньозваженої крупності пісків класифікатора. Наступну групу складають фактори, які можуть бути незмінними або змінними. Це – швидкість обертання барабана млина, матеріал і технологія виготовлення куль і футеровки, технологічний тип руди. Третя група включає фактори, завдяки зміні яких можливо досягти оптимального режиму роботи керованого об'єкта. До неї входять завантаження руди в технологічний агрегат і розрідження пульпи на його вході.

Проаналізуємо особливості кожного з вказаних факторів, які впливають на оптимальний режим роботи кульового млина. Спочатку розглянемо фактори першої групи. Під час роботи кульового млина в процесі сегрегації кулі оптимального навантаження розташовуються вздовж барабана, створюючи зони з наближено незмінними розмірами, особливо в шарі, що розміщений біля футеровки [9, с. 193]. Наближено однорозмірні кулі надають можливість оцінювання енергетичної ефективності подрібнення руди безпосередньо в барабані, в зоні, де ще містяться крупні шматки руди. Дрібні кулі біля завантажувальної горловини, де густина пульпи між кусками руди мала, добре пропускають матеріал і крупні шматки, а діють на них не поодинокі, а масивно, блоком, створюючи велике зусилля.

Біля розвантажувального кінця барабана, навпаки, знаходяться крупні кулі. Вони більш ефективно долають перепони у вигляді великої густини пульпи і зафіксованих в ній дрібних частках твердого, які руйнуються ударом, роздавлю-

ванням і розтиранням. Густа пульпа захоплюється крупними кулями на колову, а потім на параболічну орбіту, переміщується разом з ними й ефективно руйнується під час зустрічі з перепонами. За вмісту твердого в пульпі біля 80% може відбутися навіть пакетування куль [22, с. 59], чого не можна допускати. Однак густа пульпа сприяє руйнуванню твердого. В останній час запропоновано молільні тіла спеціальних форм, які підвищують густина навантаження і тим самим продуктивність барабанного млина [29]. Одним з варіантів такого молільного навантаження є використання упаковки однорозмірних куль [4]. В такій упаковці об'єм куль складає 74% проти 26% проміжків, зайнятих рудою. Якщо використовується багаторозмірне кульове навантаження, то в ньому проміжки між кулями складають 38%, що зменшує продуктивність технологічного агрегату. Отже, сегрегація поряд з недоліками несе і певні переваги – це не безпорядне, а закономірне розташування куль в барабані великих млинів, яке можливо врахувати і використати.

В процесі роботи кулі стираються, зменшуючи свій розмір і втрачаючи масу. В моделюванні процесу зносу куль теоретично встановлені закономірності і визначено, яку кількість куль і яких розмірів необхідно додати в млин взамін спрацьованих [9]. Однак на виробництві таке завантаження куль не здійснюється.

Під час подрібнення руди кульовим млином спрацьовується і футеровка, що приводить до збільшення внутрішнього діаметра барабана. Це буде наслідком необхідності зміни швидкості

обертання кульового млина та ступеня заповнення барабана подрібнюючим середовищем. Розрахунки показують, що за умови зменшення товщини футеровки з 150 мм до 50 мм швидкість обертання барабана млина повинна зменшитись на 2,56%, оскільки при цьому відбувається непродуктивна перевитрата електричної енергії. Використання такого керуючого впливу запропоновано в [27], однак тривалий час не реалізується. Сучасні дослідження показують, що дуже часто капітальні витрати на електродвигун зі змінною швидкістю обертання перебільшують потенційну економічну вигоду від його використання [3, с. 3].

Спрацювання футеровки супроводжується збільшенням об'єму барабана і, як наслідок, зменшенням ступеня заповнення подрібнюючим середовищем. Наприклад, в кульовому млині МШР-40x50 за спрацювання футеровки в тих же межах об'єм барабана збільшиться на 11,1%. Якщо первісний об'єм куль в барабані не змінюється, то ступінь його заповнення молотильним середовищем зменшиться з 50 до 45 %. Такі зміни знаходяться в межах допустимих 40...50%, однак при цьому зменшиться продуктивність технологічного агрегату. Це зменшення можливо компенсувати додатковою подачею куль в заміні спрацьованої футеровки. Таким підходом можливо повністю компенсувати вплив зміни діаметра барабана за спрацювання футеровки, однак таких систем керування подрібнюючим середовищем нині не існує.

На вхід кульового млина подається вихідна руда, піски класифікатора та вода з розрахунку певного співвідношення тверде-рідке, однак співвідношення тверде-рідке підтримується, а густина пульпи вздовж барабана змінюється. Оскільки густина пульпи змінюється за своїми закономірностями, а подрібнюоче середовище – за своїми, оптимальність умов подрібнення тут не витримується. Ці питання практично не досліджувалися. Виходячи зі сказаного, для досягнення оптимальних умов подрібнення руди необхідно встановити закономірності зміни густини і в'язкості пульпи вздовж барабана кульового млина.

Зміна крупності суттєво впливає на процес подрібнення руди в кульовому млині першої стадії. Закономірності зміни крупності вихідної руди під час розвантаження накопичувальних бункерів досліджувалися моделюванням даного процесу [8]. Встановлено, що розвантаження бункерів на збагачувальних фабриках відбувається циклічно зі зміною крупності. Звідси видно, що одночасне розвантаження трьох бункерів на конвеєрну

стрічку, що практикується у виробничих умовах [23, с. 8], не вирішує задачі осереднення руди за крупністю. Крупність на вході кульових млинів першої стадії буде змінною величиною, і це необхідно враховувати в процесі оптимізації подрібнення руди.

В кульовому млині подрібненню підлягають лише зерна крупних класів, оскільки заново створений готовий продукт виходить тільки від руйнування таких фракцій. Тому, чим вищий вміст крупних фракцій в руді, що знаходиться в барабані млина, тим буде вищою ефективність подрібнення і продуктивність технологічного агрегату за готовим продуктом. Коливання середньозваженої крупності на вході кульового млина змінює його стан і умови подрібнення. На виході технологічного агрегату буде змінюватись середньозважена крупність матеріалу, а як наслідок, і крупність пісків класифікатора. Отже, оптимізація роботи кульового млина має здійснюватися за умов зміни крупності вихідного живлення і пісків класифікатора.

З факторів другої групи швидкість обертання барабана млина вже розглянута. Її доцільно залишати незмінною. Іншими факторами є матеріал і технологія виготовлення куль і футеровки. Нині на збагачувальних фабриках використовують різні кулі і футеровки. Практично не притримуючись якоїсь стратегії в цьому питанні. Однак аналіз показує, що набагато вигідніше було б використовувати одну певну футеровку, виготовлену за певною технологією, і такі ж кулі. Доцільно обґрунтувати тип куль і футеровки та технологій їх виготовлення, ціни, їх якісні показники і здійснити перехід на конкретну продукцію. Обладнуючи млини однаковою футеровкою і використовуючи певні за якістю, стійкістю і розміром кулі, на підприємстві буде накопичуватись досвід роботи на конкретному матеріалі і типах подрібнюваних руд, що позитивно буде впливати на організацію виробничого процесу.

Формування сировини для перероблення на збагачувальній фабриці є чи не найбільш відповідальною задачею. Сьогодні наразі не існує чітких поглядів на цю проблему. Однією з перших була технологія осереднення руд, однак спроби стабілізації вихідного живлення шляхом впровадження цих технологій широкого використання не знайшли [13, 15]. Підтвердженням цьому є і думка автора роботи [25, с. 217], де сказано: «Для кожного різновиду руди є оптимальні величини валової продуктивності та циркуляційного навантаження, за яких забезпечується найбільш висока продуктивність млина за готовим продуктом».

Отже, таке висловлювання не допускає спільної переробки кількох технологічних різнотипів руд. До такого ж висновку в 2005 р. прийшов і В.В. Морозов, розглядаючи процес з точки зору технології збагачення [20]. У роботі [5] зазначається, що переробка руд в суміші закономірно приводить до пониження показників. В.Б. Кусков і Ю.М. Сишук [12] доводять необхідність індивідуальних підходів для ефективного збагачення складних за речовим і мінеральним складом залізних руд. Щодо формування відповіді на це питання авторами даної публікації також проводилося моделювання підходів подрібнення різнотипів руд на прикладі одного з родовищ [17].

Аналіз технологічних характеристик руд родовища показав, що вони достатньо різноманітні, охоплюючи весь діапазон від легкозбагачуваних до дуже важкозбагачуваних. Технологічно представлені сьома типами. Моделювання підходів подрібнення руд родовища показало, що не дивлячись на співпадіння середніх розмірів вкрапленостей магнетиту і коефіцієнтів подрібнюваності, їх доцільно подрібнювати окремо для отримання найкращих технологічних показників процесу і неперевитрачання електроенергії, куль, футеровки та недопущення втрат корисного компоненту. Доведена доцільність роздільного перероблення окремих типів руд і можливість його здійснення та розпізнавання руд в процесі їх видобування.

Третя група факторів стосується забезпечення оптимального функціонування керованого об'єкта. Розглянемо завантаження кульового млина рудою. Зважаючи на знайдене рішення визначення середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора [18], можливо реалізувати регульовальну характеристику замкнутого циклу подрібнення руди, запропоновану О.М. Марьютою [15, с. 81], у вигляді

$$\frac{Q_B}{Q_P} = \frac{d_P}{d_B}, \quad (3)$$

де  $Q_B$ ,  $Q_P$  – відповідно масові витрати вихідної руди і пісків односпірального класифікатора;  $d_B$ ,  $d_P$  – відповідно середньозважена крупність вихідної руди і пісків класифікатора.

В залежності (3) середньозважені крупності вихідної руди  $d_B$  і пісків  $d_P$  є збурними впливами. Керуючим впливом виступає масова витрата вихідної руди в млин  $Q_B$  при заданих або екстремальних значеннях регульованої величини – продуктивності готового класу в розвантаженні млина. Масову витрату пісків  $Q_P$  односпірального класифікатора можливо віднести як до регулюва-

них, так і до збурних діянь залежно від принципу побудови системи автоматичного керування.

Відомо, що у замкнутому циклі за збільшення продуктивності млина за вихідною рудою циркуляційне навантаження зростає. Циркуляційні навантаження до 400% помітно підвищують продуктивність млина. Збільшення швидкості проходження матеріалу через млин за умови зростання циркуляційного навантаження сприяє підвищенню ефективності роботи подрібнюючих тіл і зумовлює менше переподрібнення матеріалу, що є наслідком збільшення продуктивності технологічного агрегату. Однак, коли показники циркуляційного навантаження стають вищими за його оптимальне значення, продуктивність млина зменшується. Оптимальне циркуляційне навантаження може бути знайдено на основі рівняння кінетики подрібнення. Рациональне циркуляційне навантаження за подрібнення певного виду сировини знаходять для відомої продуктивності. Досягнення оптимального циркуляційного навантаження забезпечується регулюванням продуктивності млина за вихідним живленням при незмінній або незначній зміні вмісту твердого в зливні млина. Методику знаходження оптимального циркуляційного навантаження приводить С.Ф. Шинкоренко [31, с. 190], але вона практично не прийнятна за автоматичного керування процесом. Оптимальне значення циркуляційного навантаження звичайно уточнюють дослідним шляхом. Це значно полегшується, якщо на конкретному кульовому млині подрібнюється певний технологічний різновид руди. Тоді для кожного технологічного різновиду руди можливо знайти оптимальну величину валової продуктивності і циркуляційного навантаження, за яких забезпечується найбільш висока продуктивність за готовим продуктом. Ці дані можливо використати і за умови автоматичного керування подрібненням руди. В автоматичному режимі доцільно також ввести обмеження, суть яких зводиться до наступного. Для ефективної роботи кульових млинів у замкнутому циклі циркуляційне навантаження повинно бути не меншим 150...200% [24, с. 88] – це є нижньою межею обмеження даного параметра. З іншого боку, оптимальне циркуляційне навантаження під час транспортування матеріалу між млином і класифікатором за допомогою завиткового живильника має складати 200...400%. Верхня межа цього діапазону повинна задовольняти умові  $Q/V \leq 12 \text{ т/м}^3 \cdot \text{год}$ , де  $Q$  – продуктивність млина за загальним живленням, т/год;  $V$  – об'єм млина, м<sup>3</sup> [24, с. 102]. Отже, оптимальне

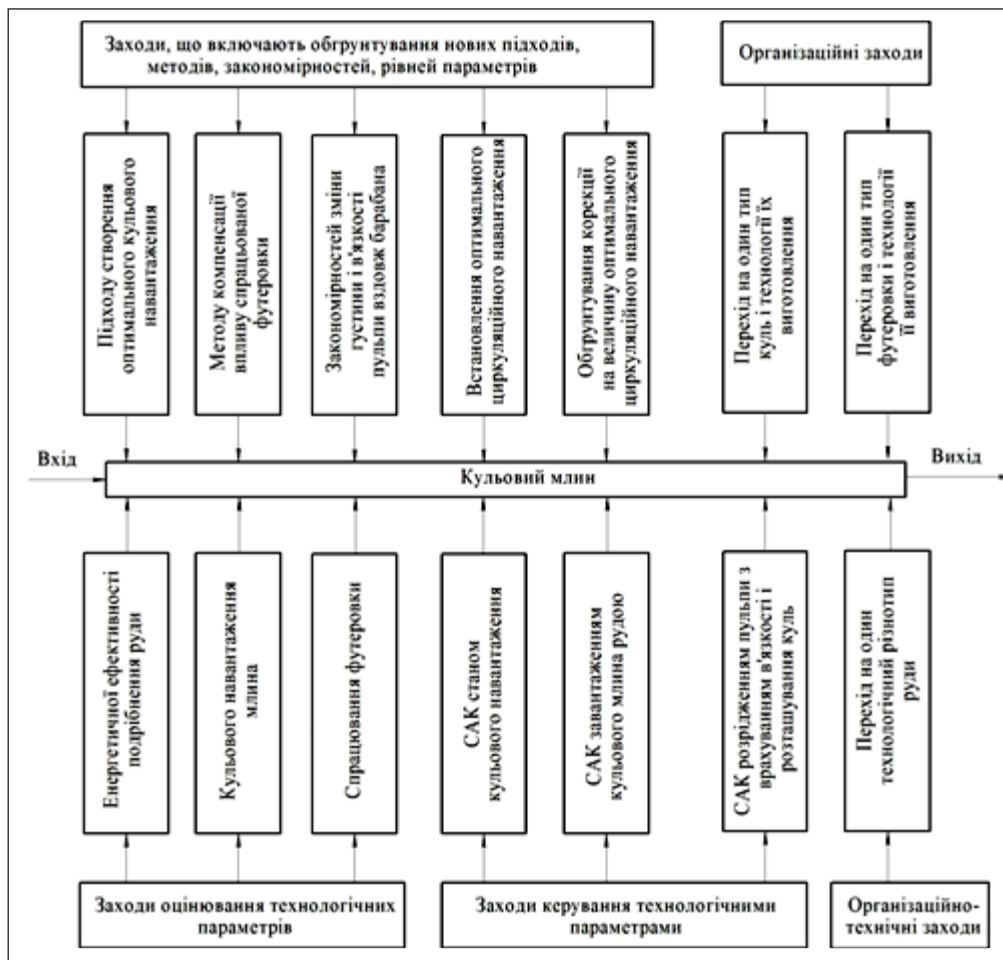


Рис. 2. Заходи, які необхідно реалізувати для переведення функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди на новий, якісно вищий рівень

значення циркуляційного навантаження має знаходитись десь близько біля верхньої межі, яку можливо коректувати залежно від середньозваженої крупності вихідного живлення та показань засобу контролю енергоефективного руйнування руди в кульовому млині. Оптимальне значення циркуляційного навантаження повинно бути тісно пов'язаним з розподілом крупного твердого в пульпі, оскільки подрібненню в млині підлягають тільки зерна крупного класу [3, с. 339]. З іншого боку, враховуючи, що потужність, яка споживається кульовим млином за холостого ходу, незначно відрізняється від її витрати під час роботи з навантаженням, необхідною умовою економічності подрібнення руди є робота технологічного агрегату за умови повного завантаження подрібнюваним матеріалом. Це завантаження ефективно може контролювати засіб енергетичної ефективності подрібнення руди [16].

У кульових млинах першої стадії подрібнення вміст твердого в пульпі звичайно доводять до межі 80...85%, за якої матеріал ще залишається рухо-

мим, що підвищує продуктивність [31, с. 21]. Це можливо пояснити збільшенням кількості зерен, що потрапляють в зону ударних впливів куль при густій пульпі. Задача встановлення необхідного розрідження пульпи в млині ускладнюється ще й тим, що під час подрібнення руди збільшується в'язкість матеріалу, а при вмісті твердого біля 80% може відбуватися пакетування куль [22, с. 59] і фактичне припинення подрібнення. Ці завдання вимагають уточнення.

З розглянутого випливає, що основні фундаментальні положення подрібнення руди на збагачувальних фабриках в першій стадії розроблені і успішно використовуються. Для переведення функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди на новий, якісно вищий рівень, що підвищить показники рудопідготовки на цій технологічній ділянці, необхідно реалізувати ряд різнопланових заходів, які приведені на рис. 2.

Їх зміст зрозумілий з назв. Заходи включають обґрунтування певних положень, оцінювання параметрів і автоматичне керування деякими

технологічними параметрами (САК) з новими підходами, організаційні та організаційно-технічні дії.

**Висновки.** Отже, проведений аналіз показав, що в рудопідготовці досягнені достатньо вагомі результати – висока надійність і продуктивність процесів, можливість отримання матеріалу необхідної якості. Однак перед збагачувальною галуззю стоїть задача зменшення собівартості продукції та енергетичних і матеріальних витрат. Для цього функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди необхідно перевести на новий, якісно вищий рівень. Цього можливо досягти за умови здійснення заходів, які розкриті в цій публікації і спрямовані на удосконалення роботи технологічного агрегату. Найбільш

складними в реалізації можуть виявитися заходи, спрямовані на підвищення загальної культури виробництва. До них відносяться переходи на використання конкретних типів куль, виготовлених за певною технологією, футеровки та перероблення на спеціально налаштованих кульових млинах конкретних незмінних технологічних різновидів руди, а також заходи, що включають обґрунтування нових підходів, методів, закономірностей, рівнів параметрів, заходи оцінювання технологічних параметрів та заходи керування технологічними параметрами.

Проведені дослідження відкривають перспективу удосконалення організації виробництва та розробку заходів, включаючи і технічні засоби автоматизації, які раніше не розроблялися.

#### Список літератури:

1. Азарян А.А., Кривенко Ю.Ю., Кучер В.Г. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд. Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг, 2014. Вип. 36. С. 276–280.
2. Андреев С.Е. О внутреннем трении в шаровой мельнице. Горный журнал. 1961. № 2. С. 62–68.
3. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва, 1980. 415 с.
4. Барбанягрэ В.Д., Матвеев А.Ф., Смаль Д.В., Москвичев Д.С. Интенсификация процессов тонкого измельчения материалов в шаровых трубных мельницах. Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам: сборник трудов конференции (Белгород, 09–10 апреля 2015 г.). Белгород, 2015. С. 20–27.
5. Даваасамбуу Д., Эрдэнэцогт Д. Повышение эффективности обогащения медно-молибденовых руд на основе оптимизации процессов дробления и измельчения. Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы Международного совещания (Иркутск, 21–25 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 110–113.
6. Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин Г.С. Измельчение материалов в цементной промышленности. Москва, 1966. 272 с.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты в химической технологии. Москва, 1961. 820 с.
8. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків, 2015. № 3. С. 42–50.
9. Кондратець В.О., Рева О.М., Карчевська М.О. Теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в млинах. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград, 2008. Вип.21. С. 187–196.
10. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. Москва, 1965. 184 с.
11. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. Кривий Ріг, 2008. 204 с.
12. Кусков В.Б., Сишук Ю.М. Совершенствование технологий обогащения железных руд различных типов и вещественного состава. Горный журнал. Москва, 2016. № 2. С. 70–74.
13. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Москва, 1981. 342 с.
14. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки. Ростов-на-Дону, 2004. 320 с.
15. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках. Москва, 1975. 231 с.
16. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Контроль енергетичної ефективності руйнування руди кульовим млином. The development of technical sciences: problems and solutions: proceedings of the conference (Brno, 27–28 April 2018 г.). Brno, 2018. С. 115–118.
17. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання підходів подрібнення різновидів руд конкретного родовища у кульових млинах замкнутого циклу. Математичне моделювання. Кам'янське, 2017. № 2. С. 43–49.
18. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора. Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя, 2017. № 2. С. 38–47.



19. Моркун В.С., Цокурєнко А.А., Луценко І.А. Адаптивні системи оптимального управління технологічними процесами. Кривий Ріг, 2005. 261 с.
20. Морозов В.В. Управление процессами обогащения на основе измерения параметров и оценки сортности руд. ГИАБ. Москва, 2005. № 7. С. 316–319.
21. Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. Москва, 2013. 512 с.
22. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. Измельчение. Энергетика и технология. Москва, 2007. 296 с.
23. Производство концентрата на обогатительной фабрике ОАО «Полтавский ГОК»: Технологическая инструкция ТИ-3-01-05. Комсомольск-на-Днепре, 2005. 63 с.
24. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. Москва, 1970. 592 с.
25. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Киев, 1975. 240 с.
26. Троп А.Е., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. Москва, 1987. 303 с.
27. Утеуш З.В., Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами. Москва, 1973. 280 с.
28. Ходаков Г.С. Физика измельчения. Москва, 1985. 307 с.
29. Шаровая загрузка барабанной мельницы: пат. 2477659 Российская федерация: МПК С2 В02С. №2010121271/13; заявл. 25.05.10; опубл. 20.03.13, Бюл. № 8. 9 с.
30. Шинкоренко С.Ф. Исследования в области теории и технологии измельчения руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.08. Днепропетровск, 1978. 53 с.
31. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. Москва, 1982. 212 с.
32. Herbst J.A., Pate W.T., Oblad A.E. Model-based control of mineral processing operations. Powder Technology, 1992. Vol.69. Pp. 21–32.

#### **АНАЛИЗ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПЕРВОЙ СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ КАК ОБЪЕКТА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Целью статьи является осуществление всестороннего анализа работы шаровой мельницы в первой стадии измельчения руды как объекта оптимального управления. Установлена структура мероприятий, которые должны осуществляться на качественно высшем уровне. Это организационные мероприятия перехода на использование шаров и футеровки определенного типа и технологии изготовления. К организационно-техническому мероприятию относится переход на один технологический тип руды, который перерабатывается конкретной шаровой мельницей. Важным также является и обоснование новых подходов, методов, закономерностей и уровней технологических параметров, а также осуществление мероприятий более качественного оценивания и управления технологическими параметрами. Реализация предложенных мероприятий позволит существенно снизить себестоимость железорудного концентрата касательно доли, которая вносится на данном технологическом участке рудоподготовки.*

**Ключевые слова:** рудоподготовка, первая стадия, шаровая мельница, мероприятия, организационные, обоснования, оценивания, управление.

#### **ANALYSIS OF OPERATION OF THE BALL MILL OF THE FIRST STAGE OF MILLING ORE AS A OBJECT OF OPTIMUM CONTROL**

*The goal of the article is to make a comprehensive analysis of the operation of a ball mill in the first stage of ore crushing as an object of optimal control. It was created the structure of actions which occur on higher level. These are organizational actions for the transition to the use of balls, lining of a certain type and the manufacturing technology. The organizational-technical action belongs the transition to a single technological type of ore, which is processed by a specific ball mill. It is important to find an argument of new approaches, methods, regularities and levels of technological parameters, as well as the occur of actions for more qualitative assessment and management of technological parameters are also important factors. The implementation of the proposed actions will significantly allow to reduce the cost of expenses of iron ore concentrate with respect to the share that is belonged to this technological area of ore preparation.*

**Key words:** ore preparation, first stage, ball mill, organizational, arguments, assessments, control.