

Мацуй А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кондратець В.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ У КУЛЬОВИХ МЛИНАХ ПРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ ІНВАРІАНТНОМУ КЕРУВАННІ ПОДРІБНЕННЯМ РУД

Виконано обґрунтування параметрів оцінювання енергоефективності подрібнення руди в кульових млинах. Виокремлено фактори, роль яких в підвищенні продуктивності кульового млина повністю не розкрита. Серед конструктивних факторів – це конструкція кульового млина, його розмір, форма футеровки. Серед технологічних факторів позначено подрібнюваність руди. Експлуатаційні фактори самі багаточисельні. Серед них визначені такі: характеристика крупності подрібнювальних тіл, завантаженість млина рудою, ефективність перемішування матеріалу, розрідження пульпи, ефективність роботи класифікуючого апарату. За ефект дії окремого фактора на кульовий млин прийнято 5% зростання продуктивності або зменшення перевитрат електроенергії, що відповідає 1 балу. Таким підходом об'єднано дію усіх факторів на результат роботи кульового млина в цілому, що дозволяє отримати результуючий ефект, наприклад, розв'язанням статичної оптимальної задачі. Метою оптимізації в даній задачі є отримання результуючої оцінки підвищення енергетичної ефективності кульового млина. Об'єктом оптимізації тут виступає процес підвищення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовим млином. Вхідні параметри оптимізації – витрата матеріалу в млин, споживана електроенергія. Вихідним параметром є енергетична ефективність подрібнення як параметр стану об'єкта. Це еквівалентно збільшенню продуктивності, зменшенню витрати електроенергії. Керуючі параметри – це безпосередньо фактори впливу на кульовий млин. Математичними моделями слугують залежності, які відносяться до теорії кульових млинів. Обмеження встановлені у вигляді рівностей і нерівностей. В якості критерію оптимальності висунута вимога досягнення найбільшого значення умовної оцінки від впливу окремих факторів. Задача розв'язувалася методом динамічного програмування з залученням методу Гауса-Зайделя. Тут виявлено дев'ять стадій оптимізації за числом факторів. Результуючий критерій оптимальності дорівнює сумі критеріїв в окремих стадіях. Критерії оптимальності в кожній стадії встановлювались за даними літературних джерел. Результуючий критерій склав 29. Ефективність роботи кульового млина може покращитись до 2,5 разів. За даними процесу оптимізації запропоновано шляхи покращення енергоефективності кульового млина.

Ключові слова: рудопідготовка, кульовий млин, енергоефективність, продуктивність, фактори впливу, оптимізація, шляхи покращення.

Постановка проблеми. Україна виробляє значну частку продукції чорної металургії та сировини для неї – залізорудного концентрату, що складає переважну більшість доходів від експорту. Вища собівартість вітчизняної продукції порівняно з зарубіжними аналогами ставить Україну не в однакові умови на світовому ринку. Це переважно викликано тим, що залізорудний концентрат внаслідок значних перевитрат електроенергії, матеріалів у вигляді куль і футеровки, особливо в перших стадіях подрібнення руди, відрізняється більш високою собівартістю. В той же час науковці і практики вказують на можливі шляхи покращення ситуації. Одним із них є удосконалення автоматичного керування рудопідго-

товкою в першій стадії подрібнення руди, оскільки діючі автоматизовані системи багато в чому не відповідають сучасним вимогам. Другим шляхом є врахування конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів з удосконаленням рудопідготовки в спрямуванні їх дії. Тобто, поряд з удосконаленням автоматичного керування рудопідготовкою в першій стадії необхідно удосконалити і керований об'єкт – кульовий млин. Дана робота виконана в межах наукових досліджень за темою “Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах” (0115U003942), яка входить до плану наукової тематики Центральноукраїнського національного

технічного університету. Враховуючи викладене, тема даної наукової статті є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кульові млини як керовані об'єкти відомі давно. Вони неперервно удосконалюються – збільшуються розміри, змінюються футерівки і молольне середовище, розвивається їх теорія і засоби автоматичного керування. Серед останніх досліджень і публікацій загального характеру стосовно керованого об'єкта можливо відмітити наступні. В роботі [1] розвивається теорія гідромеханіки робочого середовища кульових млинів мокрої подрібнення, а в [2] – технологія примусового подрібнення матеріалів. У монографії [3] викладені основи інтенсифікації процесів рудопідготовки. Нова ресурсозберігаюча RES-технологія дезінтеграції руд в кульових млинах з гумовою футерівкою викладена в [4]. Ці роботи, безумовно, позитивно впливають на удосконалення кульових млинів як керованих об'єктів. Загальні положення автоматичного керування рудопідготовкою розвинуті в роботі [5]. Це адаптивні системи у складі АСК ТП рудопідготовки MineOcad компанії National Steel Pellet Company (США, штат Міннесота). В Україні прикладом реалізації адаптивної системи інтелектуального типу є АСК ТП секцією збагачення руди, впровадженій у ВАТ “Північний ГЗК”, яка створена на базі SCADA-системи TRACE MODE [6]. Ці системи не вирішують усіх задач керування, які висунуті галуззю збагачення корисних копалин. Тому у перспективі на АСК ТП покладають функції підвищення технологічних показників збагачення руд і підвищення якості товарних продуктів [7].

В подальшому інновації стосовно кульового млина як керованого об'єкта здійснюються в напрямках впливу на конструктивні, технологічні та експлуатаційні складові процесу подрібнення. Удосконалення конструкції кульових млинів здійснювалося в основному стосовно створення технологічних агрегатів з низьким рівнем зливу пульпи. Це підтверджується зарубіжними публікаціями [8...10] і публікаціями вітчизняних авторів – Шинкоренко С.Ф., Півняк Г.Г. та ін. У ХХІ столітті зберігаються і отримують подальший розвиток напівавтоподрібнення і стандартне стадіальне дроблення та подрібнення [11]. В такому напрямку технологічних факторів можливо відмітити роботу [12], яка присвячена керуванню операціями подрібнення і класифікації на основі типізації руд. Цей нині прогресивний напрям удосконалення рудопідготовки розпочато в роботі [13].

Найбільша увага в останній час була приділена експлуатаційним факторам. Так, в останні роки опубліковані роботи, присвячені підвищенню ефективності роботи кульових млинів на основі використання комбінованого молольного середовища [14], порівнянню питомої витрати сталевих молольних куль четвертої і п'ятої груп твердості [15]. Формування оптимального кульового молольного середовища з підвищеною енергоефективністю подрібнення руди розглянуто в [16]. Якщо питанням абразивного зносу молольних куль приділяється порівняно велика увага, то корозійні явища вивчені недостатньо. Ці питання досліджувалися в роботі [17]. Встановлено, що частка корозійного зносу складає 25...28% від загальних витрат металевого заліза. Однак підтверджені і інші дані зі значно більшою витратою куль.

Значна увага приділялася і завантаженню куль в процесі їх спрацювання. Одна з проблем це самі дозатори куль, інша – інформаційне забезпечення їх подачі. Складність створення дозаторів зв'язана з великою кількістю куль, що можливо спростити використанням стійких молольних тіл, доступність до яких вже досягнута в Україні [18]. Однак перепоною залишається різномірність куль і частота їх подачі [19]. В основному дослідники розвивають вимірювання активної потужності. До нього у 2006 році повертається М.Д. Даниєл [20], а в 2008 році – К.Я. Улітенко [21]. Потім розробляється підхід з вимірюванням крутного моменту вала приводного двигуна. У сучасних умовах його досліджено в роботі з використанням DEM-моделювання [9]. Однак даний підхід нічого корінного в підвищенні точності вимірювання не вносить і вона залишається невисокою. У праці [10] запропоновано підхід з застосуванням нелінійного спостерігача за обсягом куль і руди в барабані. Однак в [10] відмічається, що для розв'язання цього завдання необхідні ще додаткові життєспроможні та незалежні вимірювання. Оскільки таке завдання не розв'язане, необхідно розробити новий підхід для оцінювання ситуації відносно кульового завантаження.

Завантаженню млинів рудою порівняно з кулями приділялося значно менше уваги. Найбільш широке розповсюдження на вітчизняних і зарубіжних збагачувальних фабриках отримав віброакустичний метод контролю завантаження кульових млинів рудою. У той же час даний метод має недоліки, які впродовж значного часу (з середини шістдесятих років минулого століття) примушують удосконалювати ці пристрої [22]. Незва-

жаючи на значні вдосконалення, віброакустичний метод не забезпечує необхідної точності ідентифікації технологічного параметра. Зрушення в цьому відбулися в останні роки, коли було створено засіб енергоефективного руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина [23].

Розрідженню пульпи в кульових млинах приділялось уваги мало, однак в останні роки виконано серію досліджень в цьому напрямі і опублікована монографія [24], де ця задача розв'язана для технологічних схем подрібнення руди, які застосовують в Україні.

З розглянутого видно, що в дослідженнях, проведених за останні роки, рудопідготовці на збагачувальних фабриках приділялась велика увага. Однак, не дивлячись на це, дослідження здебільшого присвячувалися окремим порівняно вузьким завданням і не отримали завершального оформлення. Це не дозволило узагальнити результати і перевести кульовий млин на функціонування на новому якісно вищому рівні. Тому такі узагальнення необхідно зробити і відкрити шляхи цілеспрямованого підвищення ефективності подрібнення руди кульовими млинами.

Постановка завдання. Метою публікації є виокремлення факторів, роль яких в підвищенні ефективності роботи кульового млина першої стадії подрібнення руди повністю не розкрита, оптимізація показника за цими напрямками з наступною розробкою шляхів реалізації покращення рудопідготовки в конкретних умовах виробництва.

Виклад основного матеріалу. Самою слабкою ланкою на рудозбагачувальних фабриках є кульовий млин першої стадії подрібнення [25]. Однак до тепер в циклах подрібнення не існує заміни кульовим млинам [26]. Аналіз показав, що даний тип подрібнювального агрегату має досить обмежені можливості зменшення енерговитрат [27]. В той же час в [27] вказується на можливі шляхи покращення характеристик кульового млина. Це також відмічається в роботі [26]. Однак системно ці шляхи підвищення продуктивності і зменшення енергоємності кульових млинів не досліджувалися.

Продуктивність кульового млина визначається рядом факторів як показано на рис. 1. Їх звичайно подають трьома групами. Продуктивність кульового млина при певному завантаженні подрібнювальним середовищем буде тим більшою, чим крупніший подрібнений продукт, чим менший розмір вихідної руди і її густина, краща подрібнюваність і більша споживана технологічним агрегатом корисна потужність. З подрібненістю руди питання залишається відкритим, оскільки вона змінюється в різних типах руди одного родовища, а перероблятися нині може по-різному.

Зараз відсутня чітка визначеність щодо впливу конструктивних факторів на продуктивність кульових млинів. Експериментами підтверджена більша ефективність дії подрібнювального середовища в кульових млинах з низьким рівнем пульпи, тому їх продуктивність на 15% вища

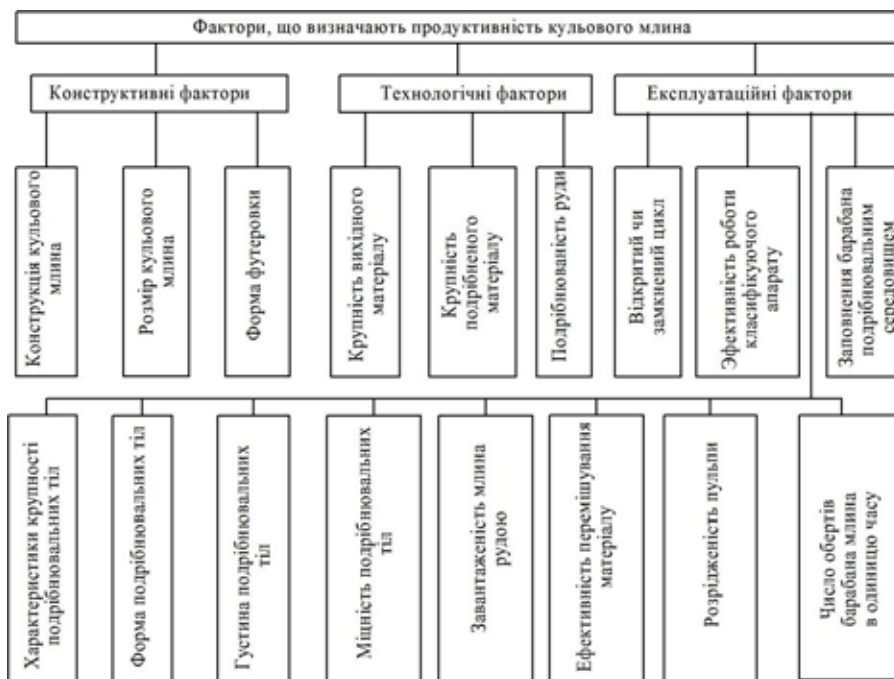


Рис. 1. Фактори, що визначають продуктивність кульового млина

порівняно з технологічними агрегатами з високим рівнем пульпи. Є суперечні дані про вплив розміру кульових млинів на їх продуктивність, відомо, що вона зростає при збільшенні об'єму барабана. Однак відсутні чіткі відповіді на зміну їх енергетичної ефективності подрібнення. Доведено, що продуктивність кульових млинів з гладкою футеровкою нижче порівняно з технологічними агрегатами з ребристою футеровкою.

Важливу роль мають і експлуатаційні фактори. Так, встановлено, що низька ефективність класифікації особливо негативно впливає на роботу кульових млинів при невеликих циркуляційних навантаженнях, серед подрібнювальних тіл найкращим є сталева сфера. Подрібнювальні тіла тим краще працюють, чим вони твердіші і мають більшу густину, міцність, правильну форму. Кульові млини працюють при заповненні кулями на 40...50%, тобто $\varphi=0,4...0,5$ і з частотою обертання барабана 75...80% від критичної, тобто $\psi=0,75...0,8$.

Корисну споживану з електричної мережі потужність кульовим млином, діаметр якого більше 2 м, наближено можливо визначити за залежністю

$$N_{em} = 1,025 N / \eta_{em} = 2,51 \cdot D^{2,5} \cdot L, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де D – діаметр барабана кульового млина; L – довжина барабана.

Відомо, що суміш куль різного розміру забезпечує більшу продуктивність порівняно з однаковими кулями. Максимальну продуктивність кульового млина забезпечує оптимальна характеристика крупності подрібнювального середовища, однак не існує конкретних рекомендацій щодо її складу.

Кульовий млин ефективно подрібнює матеріал в тому випадку, коли весь простір між кулями заповнено твердим. Якщо таке заповнення не повне, то матеріал і кулі частково не взаємодіють і ефективність подрібнення падає, що зменшує продуктивність, і частково споживання електроенергії. При більшому завантаженні матеріалу кулі розходяться і подрібнення погіршується. Контролює цей процес часто оператор в ручному режимі або з застосуванням автоматичного контролю, однак вважають, що такі технічні засоби ще не достатньо точні.

Розрідження пульпи в млині, з одного боку, визначає ефективність роботи подрібнювальних тіл, з другого, швидкість проходження матеріалу вздовж барабана. Зрозуміло, що оптимальне розрідження пульпи повинно забезпечити максимум ефективності роботи молоткових тіл і відповідну

швидкість видалення матеріалу з млина. Ці питання до теперішнього часу повністю не розв'язані.

Отже, виокремлено дев'ять факторів, які можуть впливати на зменшення енергоємності процесу подрібнення. В роботі [25] як засіб підвищення енергетичної ефективності подрібнення називається раціональний підбір технічних і технологічних параметрів подрібнювальних відділень для кожного конкретного випадку, а також введення попереднього збагачення. В роботі [27] пропонується також адаптація режимів роботи до змінних властивостей подрібнюваного матеріалу і завантаження куль різного діаметра, застосування раціонування завантаження млинів кулями і деякі інші. Як видно з викладеного, всі ці завдання входять в перелік розглянутих факторів, які вказані в [28]. Модернізація кульових млинів, спрямована на зсувне руйнування руди, не отримала розвитку в наслідок низької надійності при контакті виступаючих в середині барабана елементів з кульовим завантаженням [29]. Така ж участь спостигла і пристрої на основі ефекту самозбудження пульсацій завантаження при постійних режимах руху механічної системи млина.

Системно розглянувши фактори, що визначають продуктивність кульового млина, приходимо до висновку, що не повністю розкритою залишилась роль дев'яти достатньо важливих з них, які представлені на рис. 2. Аналізу, зв'язаному з виявленням можливості підвищення продуктивності кульового млина, необхідно піддати всі приведені на рис. 2 фактори. Легко встановити, що вони одночасно прикладені до технологічного агрегату, однак деякі впливають на весь об'єкт, інші лише на його частину. Зважаючи на це при дослідженні впливу конструкції кульового млина, його розміру, завантаженості рудою, ефективності роботи класифікуючого апарату на продуктивність необхідно розглядати весь технологічний агрегат в цілому. В процесі дослідження впливу інших факторів на продуктивність млина доцільно здійснити декомпозицію об'єкта і розглядати їх роль окремо з наступним узагальненням результату. При декомпозиції кульового млина необхідно виділити і дослідити окремі незалежні підсистеми: футеровка, подрібнювальне середовище, подрібнюваність руди, розрідження (в'язкість) пульпи. При цьому в одну незалежну підсистему подрібнювального середовища увійдуть дії факторів – характеристика крупності подрібнювальних тіл, правильність їх форми, густина і твердість.

Аналіз показує, що дію досліджуваних факторів на енергетичну ефективність подрібнення руди



Рис. 2. Фактори, роль яких в підвищенні продуктивності кульового млина повністю не розкрита

в кульовому млині не можливо виразити в таких же одиницях виміру, оскільки відсутні конкретні дані їх впливу на роботу подрібнювального агрегату. Тому, аналізуючи дію конкретного фактора на роботу кульового млина, доводимо його суттєвий позитивний вплив. Якщо він є, наприклад збільшення продуктивності або зменшення енерговитрат, виставляємо умовну оцінку його впливу. При цьому необхідно враховувати і степінь впливу конкретного фактора на створюваний ефект. Ще на початку 60-х років минулого століття встановлено, що автоматичне регулювання процесу подрібнення руди дозволяє збільшити продуктивність млинів на 5...10% [30, с. 78]. Оскільки збільшення продуктивності на 5% складає вагому величину, цей рівень можливо прийняти за одиницю відліку позитивного ефекту конкретного фактора. Якщо, наприклад, збільшення продуктивності складе 10%, то необхідно врахувати дві одиниці і т.д. Як показує аналіз, цим підходом можливо об'єднати дію усіх факторів на результат роботи кульового млина в цілому і отримати результуючий ефект. Цього можливо досягнути розв'язанням оптимальної задачі.

Метою оптимізації в даній задачі є отримання результуючої оцінки підвищення енергетичної ефективності кульового млина при подрібненні руди в першій стадії. Зрозуміло, що дана задача відноситься до статичної оптимізації.

Об'єктом оптимізації тут виступає процес підвищення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовим млином. Об'єкт оптимізації передбачає виокремлення чотирьох груп параметрів – вхідних, керуючих, збуджуючих і вихідних. Ці параметри слід розглядати або до кульового млина в цілому, або до окремих незалежних його підсистем. До вхідних параметрів у даному процесі необхідно віднести витрату матеріалу в кульовий млин, підведену електроенергію до

технологічного агрегату. Вихідним параметром тут буде енергетична ефективність подрібнення як параметр стану об'єкта. Оскільки в даних дослідженнях її визначати не вдається, то необхідно в якості вихідних параметрів розглядати збільшення продуктивності, зменшення перевитрати електроенергії. За змістом даної задачі до керуючих параметрів необхідно віднести самі фактори, що впливають на кульовий млин. Математичними моделями даного об'єкта оптимізації слугують залежності, які відносяться до теорії кульових млинів. Однак продуктивність необхідно коригувати, враховуючи час на прості обладнання при планово-попереджувальних ремонтах, на заміну футеровки і кульового завантаження, відмови технологічних агрегатів. Фактичну продуктивність можна визначити відповідно формулі

$$Q_{\phi} = Q \cdot \frac{(n_p - n_N)}{n_p}, \quad (2)$$

де Q – продуктивність млина; n_p – кількість робочих днів у році; n_N – кількість днів простою технологічного обладнання в рік.

Цим буде враховуватись надійність технологічного обладнання, ефективність його ремонту і обслуговування, що впливає на річні показники збагачувальної фабрики.

Тут основними обмеженнями є

$$Q > Q_N \text{ при } N \leq N_N \text{ або } Q = Q_N \text{ при } N < N_N, \quad (3)$$

де Q, N – відповідно досягнута продуктивність при корисній витраченій потужності; Q_N, N_N – продуктивність і корисна витрачена потужність нормативного процесу подрібнення (до оптимізації).

Для розв'язання завдання необхідно визначитись з критерієм оптимальності. В якості критерію оптимальності може бути висунута вимога досягнення найбільшого значення умовної оцінки від впливу окремих факторів. При цьому зручно

прийняти “1” за відлік досягнутого вагомого позитивного ефекту при дії конкретного фактора, тобто $J_i = 1$.

Виходячи з розглянутого і враховуючи число змінних, види математичних моделей і обмежень, приходимо до висновку, що для розв’язання даної задачі оптимізації підходить метод динамічного програмування, оскільки він є ефективним засобом розв’язання задач оптимізації дискретних багатостадійних процесів, для яких загальний критерій оптимальності описується адитивною функцією критеріїв оптимальності окремих стадій. Тут виокремлюємо дев’ять стадій оптимізації, розуміючи під стадією один з впливових факторів – конструкція кульового млина, розмір кульового млина та ін.

Метод динамічного програмування фактично являє собою алгоритм визначення оптимальної стратегії управління на усіх стадіях процесу. Закон управління на кожній стадії зазвичай знаходять шляхом розв’язання частинних задач оптимізації послідовно для усіх стадій процесу за допомогою інших методів дослідження. В більшості практичних задач кінцевий результат отримують лише в чисельній формі. Скористаємося методом Гаусса-Зайделя. У цьому методі по чергово змінюють всі незалежні змінні так, щоб за кожною з них досягалось найбільше значення критерію оптимальності. Черговість варіювання незалежних змінних при цьому можливо встановлювати довільно. Результуючий критерій оптимальності буде дорівнювати сумі критеріїв оптимальності, отриманих в кожній стадії. У даній задачі вхід першої стадії відповідає нульовому значенню критерію оптимальності $J=0$. Оптимізацію тут можливо розпочинати з будь-якого фактора.

З залученням достатньо широкого переліку вітчизняних і зарубіжних літературних джерел шляхом аналізу встановлені критерії оптимальності в кожній стадії оптимізації, які були присвячені окремому фактору.

В результаті проведених досліджень встановлено, що за усіма напрямками можливого покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах отримано позитивний результат. В окремих стадіях оптимізації отримані різні критерії – від 1 до 9. Більшість факторів забезпечують критерій оптимальності на рівні одиниці, проте вибором конструкції або розміру кульового млина його можливо збільшити відразу на 4 одиниці. Молольне середовище при його правильному виборі забезпечує значення критерію оптимальності на рівні 9. Гумова футеровка, коли

вона буде мати стійкі результати в першій стадії подрібнення, може забезпечити значення критерію оптимальності на рівні 7. Графічна інтерпретація результуючого критерію оптимальності оптимізації енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах при повній реалізації впливу усіх факторів приведена на рис. 3. З рис. 3 видно, що перед оптимізацією критерій дорівнює нулю, потім він збільшується від стадії до стадії, досягаючи найбільшого значення 29. Порядок здійснення стадій оптимізації на кінцевий результат не впливає. Кінцевий результат оптимізації вагомий, однак необхідно більш детально розглянути шляхи досягнення покращення ефективності кульового млина.

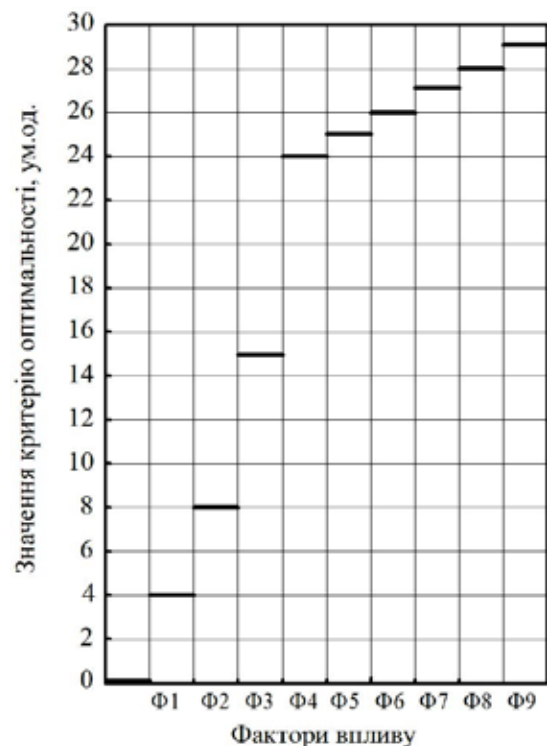


Рис. 3. Вплив факторів на критерій оптимальності при їх повній реалізації

Найбільш імовірні варіанти подані на рис. 4. Тут розглядаються можливі варіанти покращення показників кульового млина в різних умовах підприємства або побажання і можливостей керівного складу. Як видно з рис. 4, відповідно усім представленим варіантам можливо досягти суттєвого покращення роботи кульового млина. Не виключається і реалізація вигоди навіть від впливу одного з факторів. Оскільки спочатку вводилася умова за “1” рахувати покращення результату від впливу фактора на 5%, то за критерієм оптимальності можливо оцінити вплив одного чи кількох факторів на покращення ефективності роботи кульового



Рис. 4. Можливі шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах

млина. Наприклад, варіант, де критерій оптимальності складає $J=15$, відносна зміна показника буде $0,05 \times 15 = 0,75$. Це означає, що ефективність роботи кульового млина може покращитись в 1,75 рази. Як видно, ефективність роботи кульового млина може суттєво покращитись – до 2,5 разів порівняно з існуючим варіантом. Однак тут розглянуто лише технічний бік питання стосовно технологічного агрегату. Для реалізації цих можливостей необхідно понести і деякі тимчасові і фінансові витрати. По-перше, багато з розглянутого вимагає автоматичного управління. По-друге, у ряді випадків необхідна модернізація або придбання нового обладнання. По-третє, і саме головне, для досягнення поставлених задач необхідно у багатьох випадках змінити психологію відношення до праці, підняти професійність і відповідальність за виконання службових обов'язків. Необхідно ретельно виконувати інструктивні вимоги до технологічного процесу і обладнання, що включає жорсткий контроль якості футеровки, куль, регламенту і якості проведення ремонтних робіт та ін. Така ж увага повинна приділятися і сировині, що надходить на переробку, оскільки вона часто більш вартісна порівняно з обладнанням і матеріалами, які використовуються при переробці. Крім того, сировина не повинна виходити за межі якості, приписані технологічним процесом. Щоб

успішно розв'язати поставлені задачі, необхідно об'єднати зусилля всіх учасників цього достатньо непростого процесу.

При цьому також необхідно мати на увазі, що при зростанні одиничної продуктивності кульових млинів чітко прослідковується погіршення показників енерговіддачі. Зростання енерговіддачі прослідковується для кульових млинів з об'ємом до 60 м^3 , потім енерговіддача зростає повільно або навіть стабілізується. Межею цього показника є $8 \dots 10 \text{ кВт/т}$. Проф. С.Ф. Шинкаренко відмічає, що для кульових млинів при збільшенні діаметра зростають капітальні і приведені витрати. В кожному конкретному випадку існує розмір млина, перевищення якого зменшує ефективність подрібнення.

Деяко пізніше відмічається: “при збільшенні розміру млина більше певних значень ефективність подрібнення в них зменшується; зміна діаметра, довжини і частоти обертання барабана в різній степені впливає на продуктивність і питомі витрати електроенергії”. Далі відмічається, що більш високий приріст продуктивності на кубометр збільшення об'єму млина при менших питомих витратах електроенергії відповідає варіанту зі збільшенням довжини барабана. Отже, покращення є, однак необхідно робити уточнення в кожній конкретній ситуації.

Висновки. Таким чином, виконано аналіз вітчизняного і зарубіжного практичного досвіду рудопідготовки, виокремлено фактори, які можуть вплинути на покращення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами. Методом динамічного програмування здійснена оптимізація енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами, де розглядалося дев'ять стадій. В кожній стадії оптимізації шляхом аналізу процесів встановлювався абсолютний рівень критерію оптимальності величиною "1", якщо показник поліпшувався на 5%, тобто кожним 5% приросту показника встановлювалася "1". У всіх стадіях критерій оптимальності склав не менше 1, найбільш високе значення отримано на рівні 9, а результуючий критерій оптимальності, який дорівнює сумі часткових, склав 29. Показано, що ефективність роботи кульового млина може покращитись до 2,5 разів порівняно з існуючим варіантом.

Відповідно до даних процесу оптимізації запропоновано шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах у вигляді шести гілок, які можуть забезпечити результат, виходячи з побажання й можливостей підприємства. Реалізація оптимальних варіантів удосконалення подрібнення руди потребує тимчасових і фінансових витрат, а також автоматизації низки процесів, яка зводить нанівець вплив людського фактора на кінцевий результат. Аналіз показує, що доцільним є комплексне енергоефективне інваріантне керування повним конкретним циклом рудопідготовки збагачувальної фабрики.

Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є реалізація запропонованих гілок організації процесу подрібнення руди в залежності від умов конкретних збагачувальних фабрик та розробка відповідних систем енергоефективного інваріантного керування їх технологіями.

Список літератури:

1. Шинкоренко С.Ф. Гидромеханика рабочей среды шаровых мельниц мокрого измельчения. *Горный журнал*. 2002. № 7. С. 19–24.
2. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Кириченко В.В. Млини і технологія примусового подрібнення матеріалів. *Наука і інновації*. 2006. Т.2. № 3. С. 20–27.
3. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 320 с.
4. Дырда В.И., Калашников В.А., Хмель И.В. Новая ресурсо- и энергосберегающая RES-технология дезинтеграции руд в шаровых мельницах с резиновой футеровкой. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 108. С. 54-64.
5. Herbst J.A., Pate W.T., Oblad A.E. Model-based control of mineral processing operations. *Powder Technology*. 1992. Vol.69. P. 21–32.
6. SCADA TRACE MODE в АСУТП обогащения руды Северного ГОКа. URL: <http://www.tracemode.ua> (дата звернення 15.04.2015).
7. Модернизация и развитие систем автоматизированного контроля и управления / Золотков Н.Ф. и др. *Горный журнал*. 2012. № 10. С. 89–92.
8. Selective ensemble modeling load parameters of ball mill based on multi-scale frequency spectral features and sphere criterion / Tang J. et. al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. № 66-67. P. 485–504. doi: 10.1016/j.ymssp.2015.04.028.
9. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring / Pedrayes F. and other. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 433–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.
10. Le Roux J.D., Craig I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PaperOnLine*. 2017. Vol. 50. Iss.1. P. 1169–1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.
11. Арсентьев В.А., Баранов В.Ф., Вайсберг Л.А. Современное состояние и перспективы развития процессов дробления и измельчения минерального сырья. *Горный журнал*. 2007. № 2. С. 10–14.
12. Улитенко К.Я., Морозов В.В. Управление операциями измельчения и классификации на основе типизации руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 3. С. 162–167.
13. Бызов В.Ф. Усреднительные системы на горно-обогатительных предприятиях. Москва: Недра, 1988. 220 с.
14. Яценко А. А. О повышении эффективности работы шаровых мельниц на основе использования комбинированной мелющей загрузки. *Обогащение руд*. 2011. № 3. С. 3–5.
15. 2018 Большой старт промышленных испытаний. Испытание № 2. Сравнение удельного расхода стальных мелющих шаров четвертой и пятой групп твердости. URL: <http://www.energosteel.com/2018-bolshoy-start-promyshlennyih-ispytaniy-ispytanie-2-sravnienie-udel'nogo-rashoda-stalnyih-melyuschih-sharov-chetvertoy-i-pyatoy-grupp-tverdosti/> (дата звернення: 19.04.2018).
16. Jayasundara C.T., Yang R.Y., Yu A.B. Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 33. P. 66-71.

17. Lui A.W., Hocy G.R. Mechanisms of corrosive wear of steel balls in grinding hematite ore. *Canadian Metallurgist Quarterly*. 1975. Vol.14, No.3. P.281-285.
18. Lam M.M., Serov A.I., Smirnov E.N., Bazarova G.S. Mastering the production of 40- and 60mm diam. grinding balls in hardness classes III and IV at the Donetsk Metal-rolling Plant. *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. P. 1–7.
19. Bwalya M.M., Moys M.H., Finnie G.J., Mulenga F.K. Exploring ball size distribution in coal grinding mills. *Powder Technology*. 2014. Vol. 257. P. 68–73. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.02.044.
20. Daniel M. J. Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill. *Proc. Of the XXIII Intern. Mineral Processing Congress*. 2006. P. 92–97.
21. Улитенко К. Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой мощности. *Обогащение руд*. 2008. № 5. С. 42–44.
22. Улитенко К.Я., Соколов И.В., Маркин Р.П. Применение виброакустического анализа для контроля объемного заполнения мельниц. *Цветные металлы*. 2005. № 10. С. 63–66.
23. Kondratets V., Matsui A., Yatsun V., Lichuk M. Identification of energy efficiency of ore grinding and the liner wear by a three-phase motion of balls in a mill. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. № 3/5 (99). P. 21–28.
24. Кондратець В.О., Сербул О.М., Мацуй А.М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.
25. George A. Parks. Surface and international free energies of quartz. *Journal of Geophysical Research*. 1984. Vol. 89. P. 3997–4008.
26. Малярюв П.В. Проблемы снижения энергоемкости и повышения эффективности процессов рудо-подготовки. *Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы межд. совещ. (Иркутск, 21-25 сент. 2015 г.)*. Иркутск, 2015. С. 65–70.
27. Хопунов Э.А. Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья. *Современная техника и технология*. 2014. № 10. С. 42–51.
28. Баранов В.Ф., Сентемова В.А., Ядрышников А.О. О модернизации технологии рудоподготовки отечественных железорудных фабрик. *Обогащение руд*. 2005. № 1. С. 5–8.
29. Гончаров С.А. Резерв снижения энергозатрат при добыче и переработке железных руд. *Горный журнал*. 2016. № 6. С. 96.
30. Божко М.П., Маргулис В.С. Машинист мельницы. Москва: Гостехнаучиздат лит. по горному делу, 1962. 100 с.

Matsui A.M., Kondratets V.O. OPTIMISATION OF ENERGY AND MATERIAL USE IN BALL MILLS WITH ENERGY EFFICIENT INVARIANT CONTROL OF ORE GRINDING

Justification of parameters for evaluation of energy efficiency of ore grinding in ball mills is performed. Factors, the role of which in improving the performance of ball mill is not fully disclosed, are highlighted. Among the design factors are the design of ball mill, its size, the shape of the liner. Among technological factors, the grindability of ore is mentioned. Operational factors are the most numerous. Among them are characteristic particle size of crushed bodies, mill workload with ore, efficiency of material mixing, pulp dilution and efficiency of classifying device. The effect of a single factor on a ball mill is taken as 5% increase in productivity or decrease in energy consumption, which corresponds to 1 point. This approach combines the effect of all factors on the result of ball mill operation as a whole, thus making it possible to obtain the resulting effect, e.g. by solving a static optimum problem. The purpose of the optimization in this problem is to obtain a resulting estimate of the increase of the energy efficiency of a ball mill. The object of optimization here is the process of increasing the energy efficiency of ore grinding by a ball mill. The input parameters of the optimization are material flow rate to the mill, increased energy consumption. The input parameter is the energy efficiency of grinding as an object state parameter. This is equivalent to increased throughput, reduced energy consumption. The controlling parameters are directly influencing factors on the ball mill. The mathematical models are the dependencies relating to ball mill theory. The constraints are set in the form of equations and inequalities. The requirement of achieving the highest value of the conditional evaluation of the influence of individual factors was put forward as the criterion of optimality. The problem was solved by dynamic programming using the Gauss-Seidel method. It revealed nine stages of optimization according to the number of factors. The resulting optimality criterion is equal to the sum of criteria in separate stages. The optimality criteria in each stage were established according to the literature. The resulting criterion was 29. Ball mill efficiency could improve by 2.5 times. Based on the optimization process, ways to improve the energy efficiency of the ball mill are suggested.

Key words: ore preparation, ball mill, energy efficiency, performance, impact factors, optimization, ways to improve.