

Кондратець В.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Федотова М.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Хлебніков М.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І КОМПОЗИЦІЇ В МЕТОДОЛОГІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПОДРІБНЕННЯМ-КЛАСИФІКАЦІЄЮ РУД

Неперервне зменшення вмісту корисних копалин в рудах, в тому числі і залізних, призводить до такого ж розширення їх збагачення. Перед збагаченням руду необхідно подрібнити до мікронного стану, що відповідає розміру вкраплень корисного компоненту. В залізорудних збагачувальних фабриках подрібнення вихідної руди розміром 25-0 мм або 12-0 мм здійснюється у барабанних кульових млинах, які нині не мають альтернативи і відрізняються низьким коефіцієнтом корисної дії на рівні 1...2%. Крім того, кульові млини витрачають величезну кількість електроенергії. Вона найбільша у першій стадії рудопідготовки, де в Україні в основному використовують кульовий млин і механічний односпіральний класифікатор (МОК). Покращити показники рудопідготовки в першій стадії можливо автоматизацією даного процесу, яка нині недосконала і практично не охоплює ряд важливих процесів – кульове завантаження, розділення твердого в класифікаторі та ін. Такий стан речей створився тому, що методології покращення автоматичного керування даним процесом практично не приділялось уваги. Тому запропоновано провести математичне моделювання процесів циклу подрібнення-класифікації, визначити математичні моделі керування об'єктів і на їх основі створити локальні системи автоматизованого керування, а, здійснивши композицію систем у єдине ціле, створити комплекс, що охоплює автоматичним керуванням всі процеси. Показано, що математичним моделюванням необхідно охопити п'ятнадцять процесів, з яких три математичні моделі відомі. Керування дванадцятьма процесами повинно здійснюватись на базі нових математичних моделей, які необхідно відшукати. Встановлено, що дані моделі можливо отримати, а на їх основі побудувати автоматизовані системи керування відповідними процесами. Кожна з цих автоматизованих систем виконує свої конкретні функції і діє незалежно, тому є автономною. Здійснивши композицію окремих складових в єдине ціле, реалізуємо комплекс для здійснення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСК ТП першої стадії рудопідготовки. До його складу входять дев'ять технологічних автоматизованих систем різного призначення. Три з них – автоматизована система керування стабілізацією кульового завантаження млина, розрідження пісків класифікатора, розділення твердого в класифікаторі та допоміжна система стабілізації підсилення в радіометоді є повністю автономними. Для передавання інформації з датчиків, установлених на обертових частинах обладнання, використано радіометод. Показано, що ефективно і порівняно дешево керування можливо здійснити мікропроцесорними засобами. Найбільш ефективно використовувати осереднену сировину у поєднанні з таким керуючим комплексом. Це відкриває перспективу переведення рудопідготовки в першій стадії на якісно новий рівень з гарантованим отриманням як соціальної, так і економічної ефективності.

Ключові слова: подрібнення-класифікація руд, кульовий млин, спіральний класифікатор, енергоефективне автоматичне керування, методологія, математичне моделювання, композиція, комплекс, АСК ТП, перша стадія.

Постановка проблеми. У світі щорічно в родовищах зменшується вміст корисних копалин, що потребує збагачення руд. Оскільки це призводить

до величезних витрат електроенергії на подрібнення руд до розкриття вкраплень корисного компоненту, неперервно зростає інтерес до їх міні-

мізації. Особливо великі витрати електроенергії при подрібненні бідних залізних руд в перших стадіях рудопідготовки при їх збагаченні. Одним з шляхів зменшення перевитрати електроенергії є удосконалення автоматизації процесів в першій стадії подрібнення руди. Переведення автоматичного управління першою стадією подрібнення руди на новий якісно вищий рівень гарантує значне покращення ефективності здійснення даних технологічних процесів і, як наслідок, суттєве зменшення собівартості однієї тони залізорудного концентрату. Однак це не можливо здійснити без відповідної методології розроблення автоматизованих систем керування технологічними процесами в першій стадії рудопідготовки. Тому тема запропонованої статті є актуальною. Дана робота виконана за матеріалами наукових досліджень відповідно темі «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942), що є складовою плану наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматизація процесів першої стадії рудопідготовки здійснюється давно, але здебільшого вона присвячувалась лише окремим технологіям. В основному це було завантаження млинів рудою, врахування циркуляційного навантаження та інше. Порівняно мало уваги приділялось кульовому завантаженню, розділенню твердого в МОК. Методології керування процесами практично зовсім уваги не приділялось. Мова зовсім не велася про методологію керування повним процесом рудопідготовки в першій стадії в цілому. В той же час аналіз показує, що методологія керування процесом подрібнення руди в першій стадії потребує використання 15 математичних моделей, з яких відомими є лише три. Відомими є метод моделювання впливу температури на в'язкість пульпи [1, стор. 10], метод моделювання кінетики подрібнення руди в кульовому млині, метод моделювання характеристик крупності кульового завантаження при однорозмірних кулях [2, стор. 140-143].

Дванадцять математичних моделей і підходів математичного моделювання процесів необхідно розробити. Метод композиції взагалі ніколи не застосовувався при керуванні процесами рудопідготовки в перших стадіях.

Отже встановлено, що, не дивлячись на те, що рудопідготовці в перших стадіях приділялась велика увага, дослідження не отримали завер-

шального рівня. Не розвивалась методологія керування процесами подрібнення руди в перших стадіях і кульовий млин не переведено на функціонування на новому якісно вищому рівні. Тому методологію створення таких систем керування необхідно розробити і довести шляхи їх практичної реалізації.

Метою публікації є розробка схеми (алгоритму) отримання математичних моделей досліджуваних процесів або об'єктів і методів математичного моделювання та автоматизованих систем керування на їх основі, які слід застосувати при реалізації даної методології з наступним здійсненням композиції окремих складових в АСК ТП першої стадії рудопідготовки з визначенням типу технічних засобів її створення.

Виклад основного матеріалу. Методам математичного моделювання в даній праці приділяється чи не найважливіше місце, оскільки вивести керування циклом подрібнення руд на якісно вищий рівень неможливо без розгляду особливостей, які раніше практично не вивчалися. Зокрема, необхідно корінним чином удосконалити роботу кульового завантаження, значно підвищити точність вимірювання циркуляційного навантаження, стабілізувати розрідження пульпи в піщовому жолобі МОК, вивести на новий рівень систему керування подрібненням руди в кульовому млині, розділення твердого в МОК та ін. Цього не можливо досягнути без широкого застосування методів математичного моделювання. Математичне моделювання – це метод дослідження технічних об'єктів і технологічних процесів на їх математичних моделях. Вони слугують для опису властивостей досліджуваних об'єктів.

Нині не існує універсального методу отримання математичних моделей будь-яких процесів чи об'єктів. Тому в процесі аналізу запропоновано схему отримання математичної моделі, яку показано на рис. 1. З рис. 1 видно процеси, які необхідно здійснювати при розробці математичних моделей. Реальний стан об'єкта чи модельованого процесу породжує ситуацію, на яку немає відповіді. Постановка завдання полягає у виокремленні основних чи суттєвих особливостей досліджуваного об'єкта. Оскільки в реальному об'єкті процеси здебільшого достатньо складні, то необхідно звернутися до ідеалізації, що покладає на дослідника велику відповідальність. Тому процес постановки завдання здебільшого відіграє вирішальну роль.

Після цього розпочинають розроблення математичної моделі об'єкта досліджень. Головною метою побудови математичної моделі є необ-



Рис. 1. Схематичне зображення отримання математичної моделі досліджуваного об'єкта

хідність передбачення об'єктивних результатів моделювання об'єкта. Обов'язково здійснюють перевірку отриманої математичної моделі. Математичний апарат моделі повинен підпорядковуватися наявним законам математичної логіки, тобто не повинно виникати суперечностей. Обов'язково повинна збігатись розмірність вихідних величин з фізичним змістом математичної моделі.

Обов'язковою є перевірка математичної моделі на адекватність – здатність відображати властивості модельованого об'єкта з похибкою, яка не перевищує задану. Для цього математичні вирази моделі необхідно постійно співставляти з реальною ситуацією в модельованому об'єкті. Точність математичної моделі оцінюють за співвідношенням значень параметрів реального об'єкта й моделі. Вона характеризується відносною похибкою, де за базове значення приймається параметр реального об'єкта.

Методи математичного моделювання, встановлені в процесі аналізу циклу подрібнення, які слід застосувати при розв'язанні поставлених завдань, наведено на рис. 2. З рис. 2 випливає, що математичним моделюванням охоплені всі технологічні процеси циклу подрібнення-класифікації руди. Як вже згадувалося, лише три процеси моделювання базуються на відомих математичних моделях, дванадцять процесів

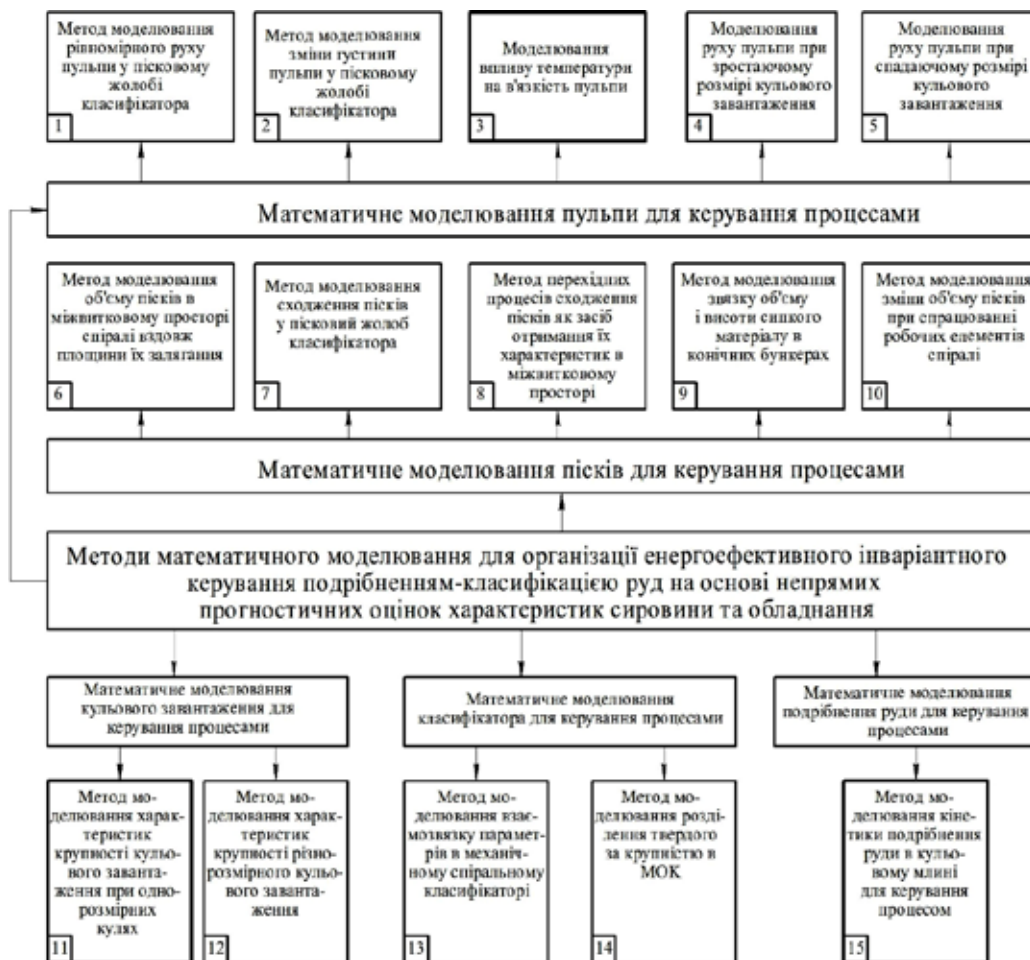


Рис. 2. Методи математичного моделювання, які слід застосовувати в процесі розроблення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд в першій стадії

повинні здійснюватись на нових математичних моделях, які необхідно отримати.

З рис. 2 слідує, що серед методів математичного моделювання, які слід застосовувати в процесі розроблення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд в першій стадії, виокремлено п'ятнадцять. Три з них відомі і відомі математичні моделі для їх здійснення. Це метод моделювання впливу температури на в'язкість пульпи, метод моделювання кінетики подрібнення руди в кульовому млині та метод моделювання характеристик крупності кульового завантаження при однорозмірних кулях. Дванадцять підходів математичного моделювання процесів і їх математичні моделі потребують розроблення. Аналізом встановлено, що дані моделі можливо отримати, а також можливо на їх основі створити автоматизовані системи керування (АСК) відповідними процесами. Доведено, що дані АСК будуть практично автономними. З врахуванням сказаного структура обладнання для рудопідготовки в першій стадії залізородних збагачувальних фабрик прийме вигляд, поданий на рис. 3. З рис. 3 видно, що технологічна частина обладнання першої стадії рудопідготовки представлена кульовим млином КМ, механічним односпіральним класифікатором МОК і пісковим жолобом класифікатора ПЖК, які обв'язані автоматизованими системами керування різних типів. Автоматизованих систем керування застосовано десять. Крім того, використано пристрій фіксування відхилення енергетичної ефективності подрібнення руди ПФВЕ і пристрій фіксування відхилення розрідження пульпи ПФВР, а також блок прийняття рішення про вплив на системи керування БПР. Призначення окремих АСК видно з рис. 3.

Для цього здійснимо композицію складових (рис. 3) в єдине ціле і отримаємо комплекс для реалізації енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСУТП першої стадії рудопідготовки, який приведено на рис. 4. З рис. 4 випливає, що до комплексу входять дев'ять технологічних АСК різного призначення. Аналіз показав, що три з них – АСК стабілізацією кульового завантаження млина (АСК-СКЗ); АСК розрідження пісків класифікатора (АСК-РПК); АСК розділення твердого в МОК (АСК-РТК) та допоміжна АСК стабілізацією підсилення в радіометоді (АСК-СПР) – є повністю автономними. Останні з них знаходяться у взаємозв'язку. Для передавання інформації з датчиків, установлених на частинах обладнання, що обертаються, використано радіометод. У радіометоді для забез-

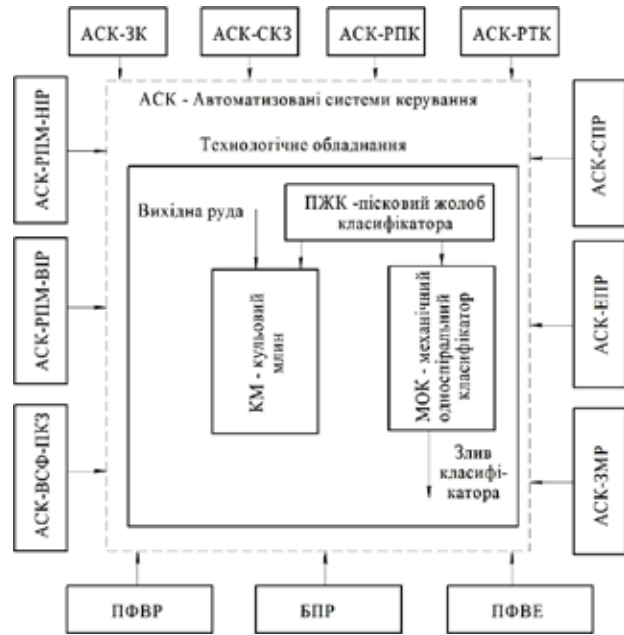


Рис. 3. Структура технологічного обладнання і автоматизованих систем керування (АСК) процесом подрібнення руди в першій стадії рудопідготовки:

АСК-СПР – АСК стабілізації підсилення в радіометоді; АСК-ЗК – АСК завантаження куль; АСК-СКЗ – АСК стабілізацією кульового завантаження; АСК-РПК – АСК розрідження пісків класифікатора; АСК-РТК – АСК розрідження твердого в класифікаторі; АСК-ЕІР – АСК енергоефективністю подрібнення руди; АСК-ЗМР – АСК завантаження млина рудою; ПФВЕ, ПФВР – відповідно пристрої фіксування відхилення енергетичної ефективності подрібнення руди й розрідження пульпи; БПР – блок прийняття рішення, про вплив на системи керування; АСК-ВСФ-ПКЗ – АСК компенсації впливу спрацювання футерівки та прослизання кульового завантаження; АСК-РПМ-ВІР, АСК-РПМ-НІР – відповідно АСК розрідженням пульпи в кульовому млині вищого і нижчого ієрархічних рівнів

печення точності передавання інформації АСК-СПР перед кожним вимірюванням технологічного параметра встановлюється задане значення коефіцієнта підсилення. Радіометодами передаються дані про середньозважену крупність пісків МОК, середньозважену крупність розвантаження кульового млина та енергетичну ефективність руйнування руди.

Базовою є АСК завантаження млина рудою, задавальне діяння якої формується відповідно до крупності вихідної руди. Однак, якщо руйнування руди відхиляється від енергоефективного значення, то АСК-ЕІР формує поправку, яка корегує це значення в бік збільшення або зменшення. Тобто, системи АСК-ЗМР і АСК-ЕІР є системами зв'язаного керування. Систему керування розрідженням пульпи у кульовому млині виконано

дворівневою, тому АСК-РПМ-ВІР і АСК-РПМ-НІР є системами зв'язаного керування. У них задавальне діяння формується з урахуванням крупності вихідної руди. Однак задавальне діяння може корегуватися АСКК-ВСФ-ПКЗ залежно від спрацьованих футерівки й можливого прослизання кульового завантаження. Тобто, ці три системи є засобами зв'язаного керування.

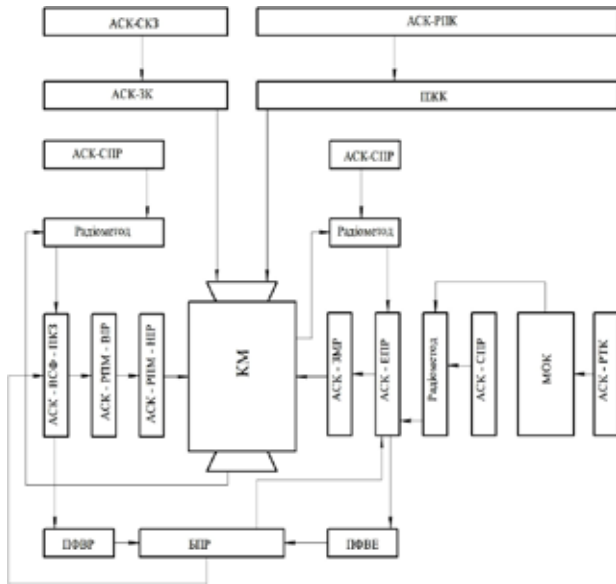


Рис. 4. Схема композиції автоматизованих систем у комплексі для здійснення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСУТП першої стадії рудопідготовки

При керуванні завантаженням руди сигнал АСК-ЕІР, що фіксується пристроєм ПФВЕ у вигляді відхилення, може зменшитися. Тоді система спрацює через збільшення завдання на витрату руди, яка при цьому зростає. Якщо енерго-ефективність руйнування руди відповідає нормі, то блок БІР прийняття рішення не дає команди на зміну витрати руди. БІР може реалізувати певні критерії ефективності при такому керуванні. Якщо при цьому крупність розвантаження млина, наприклад, збільшиться відносно приписаного значення, то БІР подасть команду на корекцію задавального діяння на розрідження пульпи та збільшення тривалості подрібнення та одночасне зменшення розрідження пульпи й зменшення прослизання кульового завантаження. Розглянуті два впливи на системи при зміні в них задавальних діянь знаходяться в протиріччі. Збільшення подавання руди відновлює енергоефективність її руйнування, а зменшення розрідження пульпи приведе до зменшення швидкості її просування й можливого переподрібнення руди до зони контролю концентрації. Тому тут необхідно обґрунту-

вати критерій дії блока прийняття рішення БІР, щоб забезпечити найкращу ефективність подрібнення руди.

Для реалізації розглянутих систем керування необхідно прийняти тип технічних засобів. Виходячи із сучасних поглядів, області ефективного застосування мікропроцесорних, нейромережних і нечітких систем керування наведено на рис. 5 [3, стор. 18]. Базовим об'єктом керування в комплексі є кульовий млин з спіральним класифікатором. Він є достатньо складним керованим об'єктом. Однак специфіка здійснення енерго-ефективного керування подрібненням-класифікацією руд полягає в тому, що керування окремими параметрами в складному об'єкті здійснюється традиційними методами. Тобто, дев'ять порівняно простих АСК різного призначення одночасно функціонують в одному керованому об'єкті й гарантують необхідну ефективність керування. Тут забезпечується повна інформація про об'єкт, тому ефективно й найбільш дешево керування можна здійснити мікропроцесорними засобами.



Рис. 5. Области різних технологій реалізації систем керування, де вони ефективно застосовуються

При створенні цієї системи автоматичного керування подрібненням-класифікацією руд важливим є вирішення підходу використання сировини конкретного родовища. У кінці 20-го століття фахівці почали використовувати осереднення руд певного родовища. Так створюється теорія й осереднювальні системи на гірничо-збагачувальних підприємствах. Осереднення руд в основному здійснюється за вмістом заліза. На підприємствах важливе значення приділяється збереженню незмінного складу руд, що гарантує підвищення технологічних показників збагачення, оскільки можна чітко витримувати технологічні режими. Однак, якщо руди різко відрізняються за вмістом видобутих корисних компонентів, то їх необхідно збагачувати за різними технологічними схемами.

Виходячи з цього, ще на початку 70-х років минулого століття збудовано гірничо-збагачувальні комбінати ПівніГЗК і НКГЗК за різними технологічними схемами. Таке ж спостерігається і на ПолтГЗК, де діє дві збагачувальні фабрики за різними технологічними схемами. У випадку, коли середній склад руди одного штабеля відрізняється від середнього складу руди того ж гатунку в іншому штабелі, то при переході до переробки сировини з останнього необхідно дещо змінити технологічний режим. Отже, технологія подрібнення та збагачення чутлива до складу сировини.

Зараз на більшості кар'єрів чорної металургії руда осереднюється за вмістом у ній заліза. Однак для збагачення не менш важливими факторами є текстурна характеристика руди, крупність рудомінеральної вкрапленості, стабільність її гранулометричного складу. Рівномірність гранулометричного складу руди може змінюватись в процесі завантаження-розвантаження. Проблему розвантаження бункерів з сипким матеріалом розв'язують давно, досягнуті вагомі результати. Здійснюються спроби покращення запропонованих раніше залежностей [4]. Удосконалюються наближені методи визначення розподілу тиску сипкого матеріалу в бункерах [5, 6]. В роботі [7] розкриті причини порушення рівномірності гранулометричного складу сипкого матеріалу в бункерах. Встановлено [8], що циліндричні бункери збагачувальних фабрик приводять до розосереднення руди при розвантаженні, створюючи довгоперіодну послідовність крупних шматків і дрібного матеріалу.

В той же час аналіз показує, що осереднення руди за крупністю може забезпечити ідеальна усереднювальна місткість, яку можливо реалізувати у вигляді усереднювального бункера. У ньому формується еліпсоїд випуску, з поверхні якого сипучий матеріал до випускного отвору приходить одночасно. Оскільки відбувається миттєве перемішування руди, що надходить з різних шарів над випускним отвором бункера, якість осереднення в таких системах буде висока. У цих бункерах за рахунок зміни об'єму можна зменшити коливання якості руди до будь-якого рівня неза-

лежно від його значення у вхідному потоці. При такому осередненні руди за крупністю цей параметр на вході млинів буде змінюватися лише під впливом спрацювання поверхонь дробильного обладнання.

Тому можливо стверджувати, що стабілізація якості руди перед збагаченням в усіх випадках забезпечує технологічний ефект, який виправдовує витрати на її здійснення. Забезпечення однорідності якості рудної сировини є основною умовою автоматизації технологічних процесів при збагаченні руд, засобом підвищення виходу металу й підвищення продуктивності праці.

Висновки. Таким чином, встановлено, що в процесі розроблення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд необхідно реалізувати 15 математичних моделей, серед яких три – моделювання впливу температури на в'язкість пульпи, моделювання характеристик крупності кульового завантаження при однорозмірних кулях, моделювання кінетики подрібнення руди в кульовому млині є відомими, дванадцять підходів моделювання та їх математичні моделі необхідно розробити, що значно розширює інформацію про керовані процеси. Показано, що енергоефективне керування подрібненням-класифікацією руд можна реалізувати комплексом автономних систем у складі АСК ТП першої стадії рудопідготовки, до якого входять дев'ять автоматично діючих розроблених засобів, що, на відміну від відомих АСК ТП, забезпечує високу точність отримання інформації й переведення керування циклом подрібнення-класифікації на новий, якісно вищий рівень гарантованим отриманням як соціальної, так і економічної ефективності.

Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є пошук методів математичного моделювання та самих математичних моделей і відповідних їм локальних автоматизованих систем керування окремими технологічними процесами, а також композиція окремих АСК у комплекс для здійснення енергоефективного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСК ТП першої стадії рудопідготовки.

Список літератури:

1. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод / Дідур В. А. та ін. Запоріжжя: Прем'єр, 2005. 464 с.
2. Підготовка корисних копалин до збагачення / Сокур М.І. та ін. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с.
3. Васюра А.С., Мартинюк Т.Б., Куперштейн Л.М. Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 175 с.
4. Walters J.K. A Theoretical Analysis of stresses in Silos with Vertical Walls. *Chemical Engineering Science*.1973. V. 28. P. 13–21.

5. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins. *Journal of Applied Mechanics*. 1977. V. 44. № 9. P. 409-412.
6. Takami A., Syoten O.A. Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. *Powder Technology*. 1974. V. 10. P. 295-301.
7. Кондратець В.О. Математичне моделювання формування потоків рудного живлення кульових млинів при транспортуванні. *Вісник ХНТУ*. 2014. № 2 (49). С. 42-50.
8. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 3. С. 42-50.

Kondratets V.O., Matsui A.M., Fedotova M.O., Khlebnikov M.V. MATHEMATICAL MODELLING AND COMPOSITION METHODS IN ENERGY-EFFICIENT ORE MILLING AND CLASSIFICATION MANAGEMENT METHODOLOGY

A constant reduction in the mineral content of ores, including iron ores, leads to an equally rapid expansion of enrichment. Before beneficiation, the ore must be ground to the micron size, which corresponds to the size of the mineral inclusions. In iron ore beneficiation plants, feed ore of 25-0 mm or 12-0 mm in size is milled in drum ball mills, which currently have no alternative and have a low efficiency of 1 to 2%. In addition, ball mills consume a huge amount of electricity. It is greatest in the first stage of ore preparation, where in Ukraine a ball mill and a mechanical single-spiral classifier (MSC) are mainly used. It is possible to improve the performance of the first stage of the ore dressing process by automating this process, which is currently imperfect and hardly covers a number of important processes - ball loading, separation of solids in the classifier, etc. This state of affairs has come about because little attention has been paid to methodologies for improving the automatic control of this process. Therefore it is proposed to carry out mathematical modelling of the processes of the grinding-categorization cycle, define mathematical models of controlled objects and on their basis create local automated control systems, and by composing the systems into a single whole to obtain a complex covering all processes with automatic control. It is shown that mathematical modelling needs to cover fifteen processes, of which three mathematical models are known. Twelve processes should be controlled on the basis of new mathematical models to be obtained. It is established that it is possible to obtain these models and it is also possible to create automated control systems for the relevant processes on the basis of these models. Each of these automated systems has its own specific functions and from this point of view is autonomous. By combining the individual components into a coherent whole, we get a complex for the implementation of energy-efficient control of ore milling and classification as part of the ACS of the first stage of ore preparation. It consists of nine process automation systems for different applications. Three of these - the automated control system for ball mill stabilisation, classifier sand liquefaction, classifier solids separation and the auxiliary system for radio-method gain stabilisation - are fully autonomous. A radio method is used to transmit information from sensors mounted on rotating parts of the equipment. It has been shown that microprocessor based control is the most efficient and cheapest possible. It is most efficient to use averaging raw materials in combination with such a control system. This opens the prospect of transferring ore dressing in the first stage to a qualitatively new level with a guaranteed receipt of both social and economic efficiency.

Key words: grinding and classification of ores, ball mill, spiral classifier, energy efficient automatic control, methodology, mathematical modelling, composition, complex, ASC TP, first stage.