

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Сербул О.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Хлєбніков М.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Ізовіта О.Л.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО РІЗНОРОЗМІРНОГО КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННИХ МЛИНІВ

У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності процесів подрібнення низькоякісних залізних руд у кульових млинах, які споживають 7–10% світового виробництва електроенергії та становлять один із найбільш енерговитратних етапів виробничого ланцюга. Проаналізовано основні збурюючі фактори, що впливають на ефективність роботи кульових млинів: оптимальне розрідження пульпи, збурення на вході млина та структуру кульового завантаження. Особливу увагу приділено кульовому завантаженню як ключовому чиннику, що визначає рівень енергоспоживання, інтенсивність подрібнення та продуктивність технологічного процесу в цілому. Детально проаналізовано сучасний стан технологій подрібнення та існуючі проблеми у галузі. Показано, що на операції подрібнення припадає близько половини усіх капітальних та експлуатаційних витрат збагачувальних фабрик. Проведено огляд сучасних підходів до автоматизації процесів подрібнення, включаючи використання штучного інтелекту, нейронних мереж, звукових сигналів помелу та інноваційних засобів контролю. Виявлено, що питання автоматизованого завантаження млинів молотильними тілами практично не досліджувалося, хоча саме воно суттєво впливає на енергоспоживання та якість готового продукту. Обґрунтовано необхідність розробки комп'ютеризованої системи керування завантаженням куль, яка забезпечить автоматичну стабілізацію оптимального різномірного кульового завантаження в умовах багатьох змінних параметрів. Запропоновано інноваційний двокомпонентний підхід: оцінювання кульового завантаження через непрямий прогностичний метод визначення спрацювання куль на основі енергетичного підходу, та оцінювання завантаження руди за ефективністю її подрібнення безпосередньо в барабані млина. Така система повинна своєчасно виявляти та виводити з процесу зношені або деформовані елементи. Підкреслено важливість підтримання різномірного складу куль для забезпечення належної якості подрібнення та попередження критичних режимів роботи. Розроблена комп'ютеризована система керування дозволить значно знизити енергоспоживання, продовжити строк експлуатації обладнання, зменшити знос футерівки та підвищити загальну ефективність переробки залізорудної сировини на всіх етапах виробництва.

Ключові слова: кульовий млин, енергоефективність, подрібнення руди, оптимальне різномірне кульове завантаження, комп'ютеризована система, збурюючі фактори.

Постановка проблеми. У нинішніх умовах розвитку гірничо-металургійної галузі дедалі більшої важливості набуває завдання ефективної обробки низькоякісних залізних руд, які нині становлять значну частину сировинної бази чорної металургії. Зменшення вмісту заліза у вихідному матеріалі зумовило активне застосування технологій збагачення, заснованих на процесах тонкого дроблення та подальшого вилучення цін-

ного мінералу. Одним із найбільш енерговитратних етапів цього виробничого ланцюга є початкове подрібнення у кульових млинах. Саме на цій стадії спостерігаються максимальні втрати електроенергії – 7...10% всього світового виробництва [1], зношування футерівки та молотильних тіл, що в кінцевому підсумку значно підвищує собівартість концентрату. У зв'язку з цим особливої ваги набувають заходи з підвищення енергоефек-

тивності цього процесу, зокрема шляхом оптимізації параметрів кульового завантаження та модернізації систем автоматизованого керування.

На ефективність процесу подрібнення впливають різні чинники, серед яких основними є оптимальне розрідження пульпи, вплив збурень на вході млина та правильне кульове завантаження. Особливу роль відіграє саме структура кульового завантаження – вона визначає рівень енергоспоживання, інтенсивність подрібнення та продуктивність технологічного процесу. Якщо склад завантаження не відповідає необхідним параметрам, це призводить до зниження ефективності роботи, прискореного зносу обладнання та погіршення якості кінцевого продукту. У зв'язку з цим особливо важливим є забезпечення стабільного та оптимального за масою і розміром завантаження куль, що досягається шляхом автоматизованого контролю і поповнення ними в реальному часі. Це дозволяє не лише зберігати оптимальні технологічні параметри, а й продовжити строк експлуатації обладнання.

Одним із важливих напрямів є створення комп'ютеризованої системи, що забезпечує стабілізацію оптимального завантаження млина в умовах багатьох змінних параметрів. Така система повинна не лише контролювати об'єм та розміри куль, а й своєчасно виявляти та виводити з процесу зношені або деформовані елементи. Відсутність подібного рішення спричиняє надмірне споживання електроенергії, падіння загальної продуктивності та порушення рівноваги у технологічному циклі. У свою чергу, запровадження інтелектуального керування, що враховує ступінь зносу куль, властивості сировини, стан футерівки та показники навантаження, дозволяє значно покращити ефективність виробничих процесів і знизити витрати.

У результаті розв'язання окреслених завдань можна досягти важливих теоретичних і практичних результатів. Це, зокрема, забезпечить подальше вдосконалення існуючих систем керування процесами рудопідготовки, дасть змогу раціональніше використовувати ресурси та сприятиме підвищенню загальної ефективності переробки залізорудної сировини на всіх етапах виробництва.

Дана робота виконана в межах тематики наукових досліджень Центральноукраїнського національного технічного університету за темами: «Автоматизована стабілізація оптимального різномірного кульового завантаження барабанних млинів при подрібненні вихідної руди

з пісками класифікатора» (реєстраційний номер 0124U003449), «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (реєстраційний номер 0115U003942) та «Оптимізація продуктивності стержневих млинів розімкнутого циклу по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (реєстраційний номер 0123U102622).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергоефективність процесу подрібнення рудної маси в кульовому млині визначається сукупністю кількох ключових чинників. Основними серед них є: досягнення оптимального розрідження пульпи, вплив збурень на вхідному етапі та правильне формування кульового завантаження. Питання регулювання ступеня розрідження пульпи детально розглядається в монографії [2], де кульові млини з їх комунікаціями були розглянуті як регульовані об'єкти. У ній подано алгоритмічні підходи до визначення співвідношення твердої та рідкої фаз у пульпі, а також розроблені засоби комп'ютерного керування цим параметром. Викладено результати експериментальних досліджень і реалізації цих систем, а також практичні аспекти їх впровадження.

У роботі [3] запропоновано шляхи покращення подачі руди в кульові млини через зменшення дії збурюючих факторів. Розглянуто сучасні підходи до рудопідготовки на залізорудних фабриках, початкове подрібнення та технології накопичення руди на перших етапах. Особливу увагу приділено автоматизованому контролю рудних потоків: підвищенню точності вимірювання масової витрати руди та оперативному визначенню крупності твердих частинок на вході в млин першої стадії. Продемонстровано впровадження цих рішень, що забезпечує стабільне живлення і, як наслідок, ефективне подрібнення сировини.

Створено алгоритми енергоефективного керування процесами подрібнення та класифікації руд [4], а також розроблено програмно-технічні засоби, на яких базується інформаційна платформа автоматизованого регулювання технологічних параметрів. Комплекс обладнано пристроями для вимірювання середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора й твердої фази на виході з кульового млина, а також інструментами непрямого визначення витрат піску в жолобі.

Підвищення енергоефективності кульових млинів при подрібненні руд є ключовим завдан-

ням у гірничодобувній промисловості, оскільки на їхню частку припадає значна частина (50–60%) загальних витрат на збагачувальних підприємствах і близько 5,2% світового споживання електроенергії [5]. Основними факторами, що впливають на енергоефективність, є кульове завантаження млина, властивості руди (твердість, щільність, вологість), швидкість обертання барабана та знос футерівки [6]. Оптимальний розподіл куль, відповідний розміру руди, дозволяє підвищити ефективність процесу подрібнення та знизити енергоспоживання. Знос футерівки, наприклад, може призвести до збільшення питомого споживання енергії на 5–6% [5]. Для підвищення енергоефективності пропонуються сучасні системи керування, зокрема адаптивні, які дозволяють системі реагувати на зміни властивостей руди в реальному часі, автоматично змінюючи параметри роботи млина (наприклад, вагу куль та струм збудження синхронного двигуна [5]) для досягнення необхідної продуктивності.

Контроль заповнення млина кулями та регулювання швидкості електродвигуна залежно від навантаження, також сприяють зниженню витрат електроенергії. Крім того, наголошується на важливості точного прогнозування та планування електроспоживання на гірничодобувних підприємствах загалом, використовуючи моделі режимів електроспоживання, отримані за результатами багатфакторного регресійного аналізу [7]. Основною метою є забезпечення стабільної роботи кульового млина та електродвигуна при повному завантаженні та оптимізація режимів роботи електроприводу.

Способи оптимізації роботи кульових млинів при збагаченні залізних руд активно досліджуються сучасними науковцями. Одним із напрямків, стало використання звукових сигналів помелу для визначення кульового завантаження [8]. Взаємозв'язок між звуковими сигналами і навантаженням на млин є складним, тому запропоновано метод, що поєднує алгоритми машинного навчання з технологією розпізнавання звуку для ідентифікації навантаження на млин.

Використання штучного інтелекту досліджується не тільки при мокрому кульовому подрібненні, але й для оптимізації процесів сухого подрібнення [9]. Запропоновано модель штучної нейронної мережі з кількома входами та виходами, яка застосовується для прогнозування результатів процесу. Використання нейронних мереж дає кращі результати, зменшуючи похибки

та час регулювання, що покращує надійність системи. Завдяки цьому методу, вдалося знизити перерегулювання на 79% та регулювання на 74,2%, для даного технологічного процесу.

У зв'язку з підвищенням цін на енергоносії, питання зменшення енергоспоживання в гірничодобувній промисловості стало актуальним. Дослідження [10] показали, що до 50% енергії на збагачувальних фабриках витрачається на подрібнення руди. Тому представлені централізовані схеми прогнозного керування за допомогою гібридної моделі (НМРС), що дозволяють знижувати енергоспоживання і стабілізувати роботу млинів, забезпечуючи необхідний розмір частинок при мінімальних витратах енергії.

Для оптимізації роботи збагачувальних фабрик, важливо забезпечити найкращі умови роботи млинів для ефективного вивільнення корисного компоненту. Інноваційний інструмент Sensomag, розроблений компанією Magotteaux, дозволяє забезпечувати точні онлайн-вимірювання ступеня заповнення млина і положення пульпи. Це дає змогу оперативно реагувати на зміни в процесі і підтримувати кульове завантаження на оптимальному рівні, що підвищує ефективність і знижує витрати енергії та знос обладнання.

Отже, з розглянутого видно, що питання завантаження кульового млина молотильними тілами практично не досліджувалося, але саме воно впливає на рівень енергоспоживання, якість подрібнення матеріалу та продуктивність технологічного процесу в цілому.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення збурюючих факторів, що впливають на роботу кульового млина при подрібненні руди та обґрунтування розробки комп'ютеризованої системи керування завантаженням куль в агрегат, що дозволить підвищити продуктивність роботи технологічного агрегату та якість готового продукту.

Виклад основного матеріалу. У процесах рудопідготовки найчастіше застосовують кульові млини, оскільки вони вирізняються значною продуктивністю, надійністю, легкістю обслуговування й зберігають працездатність навіть за суттєвого зношення. Водночас така технологія потребує багато енергії і демонструє невисокий ККД під час формування нової поверхні частинок [1]. У підсумку на операції подрібнення припадає близько половини – двох третин усіх капітальних та експлуатаційних витрат збагачувальних фабрик. На рис. 1 подано загаль-

ноприйнятту схему першої стадії подрібнення корисних копалин, поширену як у вітчизняній, так і у світовій гірничо-збагачувальній практиці. Технологічна схема вміщує операції подрібнення і класифікації. Такий замкнений цикл дає змогу отримати однорідний гранулометричний склад матеріалу та скоротити енергетичні витрати на подальшу переробку.

Більшість сучасних систем автоматизованого керування процесом подрібнення руди в кульовому млині, орієнтовані на вдосконалення технології оптимізації рівня рудного заповнення всередині нього. Додатково функціонують допоміжні системи, завданням яких є регулювання кількості подрібнювальних тіл (куль) у млині, контроль ступеня розрідження рудної маси та пульпи. Останнє особливо важливе в системі керування односпіральним механічним класифікатором, де забезпечується необхідний гранулометричний склад кінцевого продукту.

Розроблені також системи автоматичного регулювання процесу завантаження рудою кульового млина з урахуванням фізико-механічних характеристик сировини. До ключових контрольованих параметрів відносяться середньозважений розмір частинок руди, концентрація магнітного заліза, здатність матеріалу до подрібнення, обсяг циркулюючого навантаження, тиск масла в опорних підшипниках, показання радіоізотопних пристроїв, а також магнітна проникність пульпи. Проте деякі підходи не здобули широкого застосування, що властивості вихідного живлення кульових млинів виступа-

ють збурюючими діями на керований об'єкт. Ці збурення мають нестійкий характер і ускладнюють реалізацію ефективного керування.

Спроби стабілізації властивостей сировини шляхом осереднення окремих типів руд також широкого застосування не отримали [11]. Поєднання інерційності об'єкта керування та швидкості наростання збурюючих впливів створює труднощі при керуванні. Це ще сильно посилюється широкою гамою властивостей руди, які змінюються випадковим чином в широких межах і негативно впливають на показники подрібнення і класифікації. Тому нині доцільно вирішувати задачі удосконалення рудного живлення кульових млинів, спрямовані на ліквідацію збурюючих впливів.

Окрім рудного завантаження кульових млинів, суттєву роль відіграє розрідження пульпи, оскільки воно безпосередньо впливає на текучість рідкого матеріалу і ефективність кульового подрібнення твердих частинок. Згідно з виробничими спостереженнями, задовільна текучість пульпи досягається при вмісті води в межах 20...25%. Найвища продуктивність млина спостерігається, коли масова частка твердого в пульпі складає приблизно 60...65%. Це свідчить про те, що густина пульпи є ключовим фактором у досягненні оптимальної рудної продуктивності процесу подрібнення. Водночас встановлення точного рівня розрідження ускладнюється залежністю цього параметра від розміру вихідного матеріалу та фізико-механічних характеристик руди. Ці взаємозв'язки досі оста-

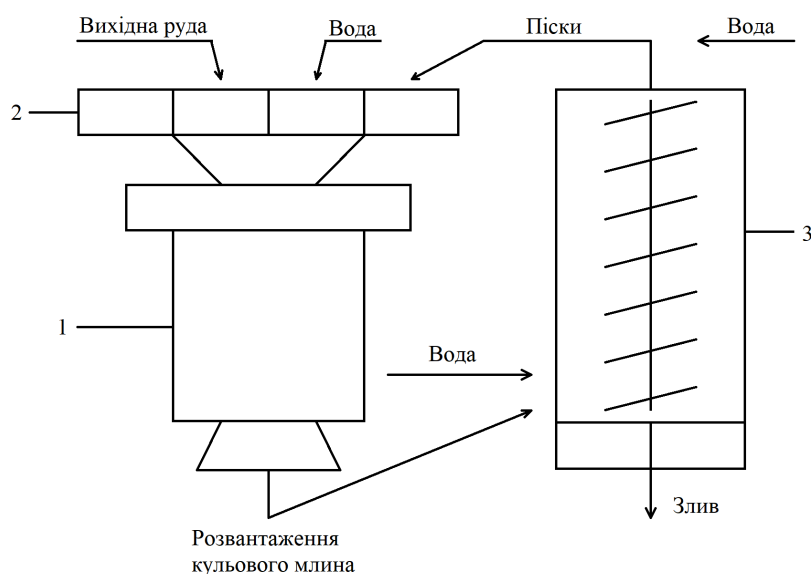


Рис. 1. Типова технологічна схема подрібнення руди у першій стадії:
1 – кульовий млин; 2 – завитковий живильник; 3 – механічний односпіральний класифікатор

точно не з'ясовані і через це у млинах першої стадії подрібнення підтримання оптимального рівня розрідження не забезпечується автоматично – його значення оператор задає на основі власного досвіду, оскільки універсального алгоритму для розрахунку в конкретних умовах поки що не існує.

Регулювання розрідження пульпи в процесах подрібнення-класифікації відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності цих технологічних операцій. Завдяки йому можливо підтримувати оптимальне циркулююче навантаження й підвищувати ефективність класифікації. Для покращення класифікації зазвичай знижують концентрацію пульпи у зливів, збільшуючи подачу води як у кульовий млин, так і в механічний односпіральний класифікатор. Для більшості технологічних різновидів руд оптимальним є розрідження зливу класифікатора при вмісті твердого 40...45%. Зі зменшенням розміру частинок твердого, відповідно, знижується і його концентрація в зливів. У замкнених схемах подрібнення іноді спостерігається накопичення значного об'єму готового продукту, який повторно повертається до млина, займаючи його робочий простір і знижуючи ефективність процесу. Щоб уникнути переподрібнення, необхідно налаштувати оптимальні режими, зокрема водний баланс класифікації, який дозволяє максимально ефективно виводити готову продукцію зі зливом. Найчастіше орієнтиром для цього є щільність пульпи в зливів МОК. Однак, як зазначають І. С. Конох та В. В. Найда, використання лише цього параметра не дозволяє точно контролювати крупність твердого. Повноцінне вирішення цього завдання можливе лише з використанням гранулометричного контролю, застосування якого на практиці наразі ускладнене.

Продуктивність кульового млина значною мірою визначається обсягом, структурою та якістю завантажених куль. Недовантаження куль або неправильно підібрані їх розміри та склад можуть призвести до помітного зниження питомої продуктивності агрегату й погіршення якості подрібнення. Практичні дослідження свідчать, що оптимальне завантаження кулями становить 45...47% об'єму для млинів із решіткою та 38...43% для млинів зливного типу. Це є ключовою умовою досягнення максимальної ефективності та високих економічних показників. Крім того, під час роботи важливо підтримувати різномірний склад куль, який забезпечує належну якість подрібнення та стабільну роботу

млина. Зазвичай такий склад визначається експериментальним шляхом. Оскільки в процесі роботи кулі поступово зношуються, то необхідно регулярно поповнювати їх запас кількома фракціями в певному співвідношенні.

Одним із ключових аспектів при вирішенні задачі створення та автоматичної стабілізації оптимального різномірного завантаження куль в барабанні млини під час подрібнення руди є забезпечення енергетичної ефективності руйнування сировини. Передусім слід уточнити, що мається на увазі під «енергетичною ефективністю» у контексті подрібнення. Існують два критичних режими: перший – коли обсяг поданої сировини недостатній, і другий – коли її кількість надмірна. У першому випадку кулі здебільшого б'ють по футерівці, не здійснюючи подрібнення, що призводить до інтенсивного зносу як футерівки, так і куль, при цьому енергія витрачається нерационально. У другому випадку надлишок матеріалу створює прошарок між кулями та футерівкою, через що руйнування руди майже не відбувається, а сам млин працює неефективно й наближається до перевантаження. Між розглянутими двома граничними випадками руда буде подрібнюватись більш ефективно. Саме тоді й досягається енергетична ефективність – коли руда дробиться з мінімальними витратами енергії, зносу куль і футерівки. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність рудопідготовки, особливо за умови автоматичного контролю й стабілізації оптимального складу кульового завантаження в млині, шляхом розробки комп'ютеризованої системи.

Аналіз відомих засобів та інформаційного забезпечення довантаження різномірних куль у барабанні млини показує, що їх можливо ефективно застосувати в перших стадіях подрібнення вихідної руди в замкнених циклах з односпіральним класифікатором. Однак, зважаючи на те, що це завдання не розв'язане, необхідно розробити новий підхід для дійсного оцінювання ситуації відносно кульового й рудного завантаження в млині, який би відповідав сучасним вимогам технологічного процесу подрібнення. Завдання доцільно розділити на два окремих – оцінювання кульового завантаження й руди різними підходами. Кульове завантаження можливо оцінити непрямым прогностичним визначенням спрацювання куль, на основі енергетичного підходу, а завантаження руди – за непрямым вимірюванням ефективності її подрібнення безпосередньо в барабані млина.

Висновки. Таким чином, проведений огляд збурюючих факторів і існуючих систем автоматичного керування окремими процесами у кульовому барабанному млині при подрібненні руди показує, що розроблені підходи не виконують приписані функції на оптимальному рівні. Такий стан речей є однією з причин підвищеної витрати електроенергії, куль і футерівки у вітчизняній рудопідготовці.

Однією з першочергових задач, які необхідно вирішити в майбутніх дослідженнях для покращення ситуації, є удосконалення молочної середовища технологічних агрегатів, зокрема, шляхом розробки комп'ютеризованої системи для забезпечення автоматичної стабілізації оптимального різномірного кульового завантаження барабанних млинів при подрібненні вихідної руди.

Список літератури:

1. Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів. Рівне: Видавництво СПД Зелепт, 2009. 282 с.
2. Кондратець В.О., Сербул О.М., Мацуй А.М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанними млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.
3. Кондратець В.О., Мацуй А.М., Сербул О.М. Удосконалення рудного живлення кульових млинів щодо ліквідації збурюючих впливів при подрібненні сировини. Монографія. Кропивницький: Видавництво «КОД», 2024. 216 с. ISBN 978-617-653-089-3.
4. Мацуй А. М. Методологічні засади енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / ВНЗ «Криворізь. нац. ун-т». Кривий Ріг, 2021, 386 с.
5. Mavlonov J., Mardonov D., Eshmirzayev M., Togayev I. Improvement of methods to ensure energy efficiency of ball mills functioning. *E3S Web Conf.* 2023. 417. 03014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341703014>.
6. Ishnazarov O., Mavlonov J., Mardonov D. Control of ball mill operation depending on ball load and ore properties. *E3S Web of Conf.* 2023. 461. 01091. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101091>.
7. Karshibayev A.I., Jumayev Z.I. Expanding the level of forecasting and operational planning of electric consumption at mining enterprise. *E3S Web Conf.*, 2023. 417. 03015. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341703015>.
8. Wang X., Sun K., Zhang H., Xiong W., Yang C.. Mill Load Identification Method for Ball milling Process Based on Grinding Signal. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54. Iss. 21. P. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.002>.
9. Al Bannoud M., Martins T.D., dos Santos B.F. Control of a closed dry grinding circuit with ball mills using predictive control based on neural networks. *Digital Chemical Engineering*. 2022. Vol. 5. 100064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100064>.
10. Estrada F., Cipriano A. Hybrid Model Predictive Control for Grinding Plants. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47, Iss. 3. P. 11512–11517. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02739>.
11. Lynch, A. J. Mineral Crushing and Grinding Circuits. Developments in Mineral Processing. Paris : Elsevier, 1977. 354 p.

Matsui A.M., Serbul O.M., Khlebnikov M.V., Izovita O.L. JUSTIFICATION OF THE DEVELOPMENT OF A COMPUTERISED SYSTEM FOR STABILISATION OF OPTIMAL MULTI-SIZE BALL LOADING OF DRUM MILLS

The paper considers the problem of improving the energy efficiency of grinding processes of low-quality iron ores in ball mills, which consume 7–10% of the world's electricity production and constitute one of the most energy-consuming stages of the production chain. The main perturbing factors affecting the efficiency of ball mills are analysed: optimal pulp liquefaction, perturbations at the mill inlet and the structure of ball loading. Special attention is paid to ball loading as a key factor determining the level of energy consumption, grinding intensity and productivity of the technological process as a whole. The current state of grinding technologies and existing problems in the industry are analysed in detail. It is shown that grinding operations account for about half of all capital and operating costs of beneficiation plants. The review of modern approaches to automation of grinding processes, including the use of artificial intelligence, neural networks, grinding sound signals and innovative means of control has been carried out. It is revealed that the issue of automated loading of mills with grinding bodies has not been practically investigated, although it significantly affects energy consumption and quality of the finished product. The necessity to develop a computerised ball loading control system that will provide automatic stabilisation of optimal multi-sized ball loading under conditions

of many variable parameters has been substantiated. An innovative two-component approach is proposed: assessment of ball loading through an indirect prognostic method for determining ball wear based on the energy approach, and assessment of ore loading by the efficiency of its grinding directly in the mill drum. Such a system should identify and remove worn or deformed elements from the process in a timely manner. The importance of maintaining a multi-sized ball composition is emphasised to ensure proper grinding quality and prevent critical operating modes. The developed computerised control system will allow to significantly reduce energy consumption, prolong equipment operation life, reduce lining wear and increase the overall efficiency of iron ore processing at all stages of production.

Key words: rod grinding load, cascade mode, modeling, natural slope angle, loosening, taper of rods.