

В. О. КОНДРАТЕЦЬ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1411-168X

А. М. МАЦУЙ

доктор технічних наук, професор,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-5544-0175

О. М. СЕРБУЛ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-1836-5529

Р. В. ТИХИЙ

студент кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0009-0005-3062-6666

ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КУЛЬОВОГО МЛИНА ЯК КЕРОВАНОВОГО ОБ'ЄКТА В ПРОЦЕСІ РУДОПІДГОТОВКИ

Внаслідок недостатньо ефективного перемішування матеріалу в початковій частині барабана кульового млина подрібнююче середовище втрачає ефективність роботи, що приводить до перевитрати електричної енергії, куль і футерівки. Дослідженням даного процесу займався ряд авторів в Україні і за кордоном, починаючи з середини 70-х років минулого століття. Запропоновані моделі досліджень, критерій перемішування у вигляді імовірного коефіцієнта, який може змінюватися в межах 0...1. Однак нині задачі перемішування матеріалу в кульових млинах до кінця не вирішені. Відсутня загальна оцінка пульсацій матеріалу в барабані, не оцінено стан матеріалу на початковій ділянці і не запропоновано підходів до його покращення. Зрозуміло, що вихід з даної ситуації можливо знайти в удосконаленні кульового млина шляхом покращення його характеристик. Дослідження виконані в межах реалізації теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах», яка входить до наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. З погляду на це тема статті є актуальною. Метою даної роботи є зменшення перевитрат електроенергії, куль і футерівки в процесі подрібнення сировини покращенням характеристик кульового млина удосконаленням завантаження руди, пісків спірального класифікатора та води на основі оцінювання пульсацій матеріалу на початковій ділянці барабана. В процесі досліджень використано метод порівняння, аналізу, методи теорії кульових млинів, теорії автоматичного керування, теорії імовірностей, математичної статистики, теорії випадкових процесів. За допомогою комп'ютерної обробки масиву даних за спеціальною програмою отримані області зміни коливальних параметрів на вході кульового млина по твердому і воді, при яких відносні відхилення маси матеріалу в агрегаті не перевищують $\pm 3,0\%$, що гарантує нормальний хід технологічного процесу. Встановлено, що як по твердому, так і по воді самими небезпечними є коливання з надто малою частотою і значними амплітудами. Важливою є проблема перемішування матеріалу в початковій частині барабана кульового млина, оскільки тут низька ефективність осереднення. Найбільш доцільним є шлях, спрямований на покращення умов перемішування ліквідацію існуючих недоліків. По-перше, перед входом руди в млин її необхідно змочити частиною потоку води, а піски перед входом в завитковий живильник максимально розрідити другою частиною потоку води. Третю частину потоку води в млин необхідно розбризкати в широкій зоні входження руди в технологічний агрегат. Такі операції забезпечують ефективне перемішування і подрібнення матеріалу вже в початковій ділянці барабана млина. Збурюючі впливи по потоку руди не порушують технологічний режим кульового млина.

Ключові слова: кульовий млин, подрібнення руди, покращення характеристик, перемішування матеріалу, початкова ділянка, коливання маси.

V. O. KONDRATETS

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-1411-168X

A. M. MATSUI

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Associate Professor at the Department of Production Process Automation
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0001-5544-0175

O. M. SERBUL

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Production Process Automation
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0003-1836-5529

R. V. TIKHYI

Student at the Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0009-0005-3062-6666

IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE BALL MILL AS A CONTROLLED OBJECT IN THE ORE DRESSING PROCESS

Due to insufficient mixing of the material in the initial part of the ball mill drum, the grinding media loses efficiency, resulting in a waste of electrical energy, balls and liner. This process has been investigated by a number of authors in Ukraine and abroad since the mid-1970s. Research models, mixing criterion in the form of probability coefficient, which can vary within 0...1, have been proposed. However, at present the problems of material mixing in ball mills have not been fully solved. There is no general assessment of material pulsation in the drum, the condition of the material in the initial section has not been evaluated and no approaches for improvement have been suggested. It is clear that the way out of this situation can be found in improving the ball mill by improving its performance. The research was carried out as part of the implementation of the topic «Optimisation of ball mill productivity for ore and finished product with minimum energy and material overruns», which is part of the scientific theme of the Central-Ukrainian National Technical University. From this point of view the topic of the article is actual. The aim of this work is to reduce the overuse of energy, balls and liners in the raw material grinding process by improving the performance of the ball mill by improving the loading of ore, spiral classifier sands and water, based on the assessment of material pulsation in the initial section of the drum. In the process of research, methods of comparison, analysis, ball mill theory, automatic control theory, probability theory, mathematical statistics, and random process theory were used. By means of computer processing of the data array using a special programme, areas of variation of the vibrational parameters at the ball mill inlet for solids and water, at which the relative mass deviations of the material in the unit do not exceed $\pm 3.0\%$, are obtained, which guarantees the normal course of the technological process. It has been found that for both solids and water, oscillations with too low a frequency and large amplitudes are the most dangerous. The problem of mixing the material in the initial part of the ball mill drum is important, because here the efficiency of averaging is low. The most sensible way is to improve the mixing conditions by eliminating the existing disadvantages. Firstly, before the ore enters the mill it should be wetted with part of the water flow, and the sands before entering the coil feeder should be thinned as much as possible with a second part of the water flow. A third of the water flow into the mill has to be sprayed over a wide area where the ore enters the process unit. Such operations ensure efficient mixing and grinding of the material already in the initial section of the mill drum. Exciting influences along the ore flow do not disturb the process flow of the ball mill.

Key words: ball mill, ore crushing, performance improvement, material mixing, initial section, mass fluctuations.

Постановка проблеми

Україна відноситься до країн з розвинутою залізорудною промисловістю та чорною металургією. Інтенсивне видобування залізних руд впродовж тривалого часу привело до зменшення в них вмісту корисного компоненту. Тому все більше отримують сировини для чорної металургії з бідних залізних руд шляхом їх збагачення. В Україні діє сім найбільш потужних у світі комбінатів по видобуванню та переробці бідних залізних руд з отриманням якісних концентратів. Частина залізорудних концентратів споживається вітчизняною чорною металургією, інша частина направляється на експорт. На світовому ринку вітчизняні залізорудні концентрати поступаються аналогічній продукції в наслідок їх більшої собівартості вироблення. Це зв'язано з рядом причин, основними з яких

є перевитрачання електроенергії, куль і футерівки на подрібнення руди, особливо в першій стадії рудопідготовки. Аналіз показав, що вплинути на це можливо удосконаленням технологічного обладнання та систем автоматичного керування даними процесами. Оскільки дана стаття спрямована на покращення характеристик технологічного обладнання (об'єктів керування), то її тема є актуальною. Робота виконана в межах дослідження за темами: «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942) та «Оптимізація параметрів завиткового живильника кульового млина пульпою як керованого об'єкта в рудопідготовці за двостадійним циклом» (0123U102951), які є складовими плану наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо, що в кульових млинах в основному подрібнюється більш крупний матеріал при високих вмістах твердого. Для цього тверде в пульпі повинно бути добре осередненим. Лише за таких умов відбувається ефективне подрібнення більш крупних часток руди. Якщо тверде в зоні удару кулі сильно сконцентровано, сила удару зменшується. У випадку недостатньої концентрації твердого в зоні удару здебільшого руйнуються кулі і футерівка. Тому матеріал в барабані кульового млина необхідно добре перемішувати, досягаючи якісного осереднення. Ефективному осередненню матеріалу в барабані сприяють як рівномірність подачі руди, води і пісків у млин, так і спеціальні заходи, наприклад встановлення осереднюючих пристроїв. Оскільки кульовий млин добре перемішує матеріал, то спеціальні пристрої перед ним не встановлюють. Застосування інших прийомів осереднення матеріалу в кульових млинах також не досліджувалося. Тому ефективність подрібнення руди в наслідок впливу таких причин знижувалась.

Для потреб технологічних процесів збагачення розроблялися способи змішування матеріалів у циклах подрібнення в цілому і окремо в кульових млинах. Осереднення матеріалу безпосередньо в кульових млинах досліджують В.А. Аршинський, Д.Ф. Келсел, А.Дж. Лінч, Е.В. Прокоф'єв, А.Ю. Троп. Вони розглядають кульовий млин як агрегат, на виході якого отримують перемішаний продукт. Відомо, що осереднений в результаті перемішування продукт ефективно подрібнюється, включаючи в активну роботу практично всю довжину барабана млина. В той же час задача перемішування матеріалу вздовж барабана млина ніким не розглядалася, хоч є достатньо важливою. Її важливість доводиться і в роботі [1].

Детально розглядалися і динамічні характеристики перемішувачів з рециклом, куди входить кульовий млин і спіральний класифікатор. Доведено, що при збільшенні циркулюючого навантаження і транспортного запізнювання ефективність роботи перемішувача зростає. В роботі [2] І.Г. Грінман, розглядаючи схему перемішування, яка відповідає циклу подрібнення, також стверджує, що амплітуда випадкових коливань на вході млина суттєво зменшується з ростом циркулюючого навантаження. Він одночасно відмічає, що перемішування всередині об'єму барабана млина, яким ми нехтували, приводить до згладжування коливань, періоди яких менше власного часу технологічного агрегату.

При завантаженні кульового млина рівномірне перемішування матеріалу не досягається. Такий стан відповідає певній довжині барабана кульового млина. Ефективність подрібнення погіршується ще й в наслідок того, що в початковій частині барабана знаходяться кулі малих розмірів. Тому важливою є проблема перемішування матеріалу саме в початковій частині барабана кульового млина, а не в точці розвантаження.

Кульовий млин можливо розглядати як змішувач, в якому відбувається руйнування частинок. Уайтен прийняв допущення, що кульовий млин можливо подати однією ділянкою перемішування, що суттєво спрощує розрахунки [3], однак не дає відповіді на стан початкової ділянки технологічного агрегату. Якщо час перебування твердої фази дорівнює часу перебування води в барабані млина, то він веде себе як ефективний перемішувач [4]. Це відбувається при значних густинах пульпи, які відповідають показнику, встановленому при експлуатації кульових млинів. Автор роботи [3] пропонує подрібнювальний агрегат розглядати як такий, що складається з ряду поперечних ділянок, в кожній з яких міститься однакова кількість матеріалу. При такому поданні матеріал, що міститься в кінцевій ділянці, виявляється еквівалентним за складом продукту млина. Введено авторами Е.Ф. Прокоф'євим, А.Е. Тропом, В.М. Аршинським поняття імовірнісного коефіцієнта R_{ll} , який може змінюватись в межах 0...1, зв'язує густину пульпи в розвантаженні млина з густиною пульпи в його барабані. Це дозволяє розширити можливість дослідження перемішування матеріалу вздовж барабана млина, однак їх ніхто не виконував.

Отже, нині задачі перемішування матеріалу в кульових млинах до кінця не вирішені. Відсутня загальна оцінка пульсацій матеріалу в барабані, не оцінено стан матеріалу на початковій ділянці і не запропоновано підходів до його покращення.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є зменшення перевитрачання електроенергії, куль і футерівки в процесі подрібнення сировини покращенням характеристик кульового млина удосконаленням завантаження руди, пісків спірального класифікатора та води на основі оцінювання пульсацій матеріалу на початковій ділянці барабана.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідженням кульового млина як керованого об'єкта по каналу розрідження пульпи знайдена його математична модель. Вона дозволяє отримати перехідні та частотні характеристики кульового млина. При автоматичному

регулюванні завантаження млина рудою та розрідження пульпи в ньому на вході технологічного агрегату будуть створюватися керуючі впливи за витратами руди або води. Тому важливим стає дослідження фільтруючих властивостей кульового млина при проходженні таких впливів.

Фільтруючі можливості кульового млина досліджувалися за його амплітудними частотними характеристиками стосовно технологічного агрегату МШЦ при зміні витрати вихідної руди від 220 т/год до 260 т/год, а циркулюючого навантаження в межах 100...200%. Встановлено, що при малих колових частотах амплітудна частотна характеристика залежить від витрати вихідної руди, величини циркулюючого навантаження. При колових частотах, більших $0,015 \text{ с}^{-1}$, керований об'єкт пригнічує коливання і режим його роботи (витрату руди) можливо не враховувати.

Коливальні процеси на вході кульового млина приводять до відносних коливань маси в об'єкті

$$\Delta_M, \% = \frac{M_3}{M_{II}} 100\%, \quad (1)$$

де M_3, M_{II} – відповідно змінне та постійне значення маси матеріалу в кульовому млині.

Коливання маси матеріалу в кульовому млині будуть залежати від частоти і амплітуди коливань на вході. Параметр $\Delta_M(1)$ буде функцією двох змінних. З використанням спеціальної програми на персональному комп'ютері отримані просторові діаграми відносного коливання маси матеріалу в кульовому млині від амплітуди і частоти впливів на його вході по руді і воді. З них встановлено, що як по твердому, так і по воді самими небезпечними є коливання з занадто малою частотою і значними амплітудами. За допомогою комп'ютерної обробки масиву даних за спеціальною програмою отримані області зміни коливальних параметрів на вході кульового млина по твердому і воді, при яких відносні відхилення маси матеріалу в агрегаті не перевищують 3,0%, що гарантує нормальний хід технологічного процесу. Області зміни коливальних параметрів приведені на рис. 1. Якщо частоти і амплітуди коливань на вході кульового млина по руді і воді не будуть виходити за межі вказаних областей, то відхилення маси і розрідження пульпи в технологічному агрегаті будуть знаходитись в допустимих межах. Границі знайдених областей зміни параметрів на вході кульового млина повинні слугувати обмеженнями при реалізації автоматичного керування.

Розглянемо роботу кульового млина з точки зору пригнічення коливань матеріалу, які виникають у його барабані. Це в основному стосується живлення млина на вході, руху піскового матеріалу з спірального класифікатора та роботи завиткового живильника.

У кульовому млині перш за все подрібненню підлягають лише крупні частинки пульпи. Оскільки на вхід кульового млина однозначно надходять вихідна дроблена руда, циркулюючі піски класифікатора та вода, цей матеріал необхідно осереднити перемішуванням. Враховуючи, що кульові млини є ідеальним перемішувачами з одночасним подрібненням, попередні агрегати такого призначення перед ними не встановлюють. В той же час доведено, що при завантаженні кульового млина рівномірне перемішування матеріалу не досягається. Такий стан відповідає певній довжині барабана млина. Не осереднений на цій ділянці барабана матеріал відрізняється тим, що в ньому існують зони, де крупні частинки руди сконцентровані надмірно (перевантаження) і де вони сконцентровані значно менше (недовантаження). Такий стан не відповідає номінальному завантаженню руди. Імовірність виникнення зон з номінальною концентрацією крупних частинок майже виключається. Це означає, що кулі працюють не ефективно, оскільки при великій концентрації зменшується сила удару, а при малій вони співударяються практично з футерівкою і сусідніми кулями, марно руйнуючи одне одного. При цьому збільшуються і відносні коливання матеріалу, значно виходячи за межі $\pm 3,0\%$. Ефективність подрібнення погіршується ще й внаслідок того, що в початковій частині барабана знаходяться кулі малих розмірів. Тому важливою є проблема

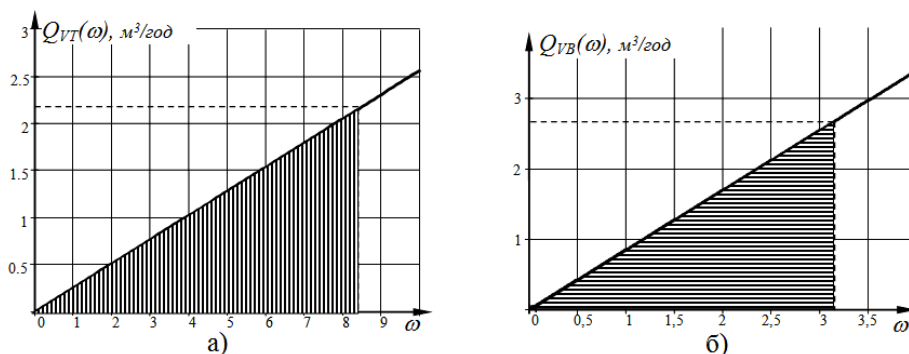


Рис. 1. Області зміни коливальних параметрів на вході кульового млина по руді (а) та воді (б), при яких відношення зміни маси матеріалу в агрегаті не перевищує 3,0%

перемішування матеріалу саме в початковій частині барабана кульового млина, а не в точці його розвантаження. Це вимагає дослідження процесу перемішування матеріалу в кульовому млині з метою його удосконалення.

Кульовий млин можливо розглядати як змішувач, в якому здійснюється руйнування частинок. Перемішування матеріалу відбувається в основному за рахунок обертання барабана та поздовжнього руху пульпи, викликаного різницею в рівнях завантаження і розвантаження та динамічного тиску потоку, що падає на її поверхню. Додаткове перемішування пульпи здійснюється при обертанні барабана, оскільки її частина захоплюється кулями і транспортується на верхню відмітку. При цьому створюється спадний потік матеріалу, який повертається разом з падаючими кулями у вихідний об'єм пульпи, здійснюючи таким чином її замкнений рух. Такий рух приводить до того, що частина пульпи переміщується по спіралеподібній кривій до розвантажувального кінця. Інтенсивне перемішування пульпи у кульовому млині разом з подрібненням твердого приводить до ефективного осереднення вмісту різних частинок руди в одиниці об'єму матеріалу не в розвантаженні технологічного агрегату, а значно раніше – на початкових ділянках руху складної суміші від завантажувальної горловини.

Густина пульпи у розвантаженні млина зв'язана з густиною пульпи в його барабані через імовірнісний коефіцієнт РП, який знаходиться в межах 0...1. Перше граничне теоретичне значення РП=0 відповідає повному розшаруванню твердої та рідкої фаз пульпи перед розвантаженням, а друге – РП=1 – ідеальному перемішуванню. Якщо РП=1, кульовий млин веде себе як ефективний перемішувач [4]. Це відбувається при значних густинах пульпи, що відповідає співвідношенню тверде/рідке близько 81...82%. Оскільки у виробничих умовах кульові млини експлуатують при високих вмістах твердого, що робить пульпу достатньо в'язкою, то вони є ідеальними перемішувачами. В них при розвантаженні матеріал добре осереднений і пульпа має рівномірно розподілені частинки твердого різних розмірів у її об'ємі.

Початкова ділянка барабана кульового млина має свої особливості, які полягають у тому, що піски в технологічний агрегат входять зі зв'язаною водою, яка від них не відділяється. Крім того, на вхід млина подається суха дроблена руда і вода. Промодельємо процес перемішування матеріалу в першій ділянці кульового млина при $QP=50$ кг/с (180 т/г), циркулюючому навантаженні 50; 100 і 150%, густині пульпи в млині 2200 кг/м³, густині твердого 3300 кг/м³ і незмінній вологості пісків 12%.

В результаті моделювання встановлено наступне. В залежності від умов перемішування час перебування води в першій зоні може змінюватись від найменшого значення до часу перебування в ній твердої фази. Імовірнісний коефіцієнт РП має достатньо низьке значення, що підкреслює низьку ефективність перемішування матеріалу на початковій ділянці барабана млина. Низька ефективність перемішування буде і на сусідніх ділянках, оскільки з першої вода витісняється суцільним потоком, який погано розповсюджується у масиві твердого. Коефіцієнт РП прийме значення, що дорівнює 1, лише десь під кінець довжини барабана млина. Це означає, що більш-менш ефективна робота куль в наслідок вирівнювання і розрідженості, і концентрації крупного твердого буде забезпечуватись після половини довжини барабана кульового млина.

Аналіз показує, що імовірнісний коефіцієнт РП в якості критерію оцінювання перемішування матеріалу в кульовому млині відображає лише один бік процесу – утримання сумішшю води. Однак видно, що при РП=1 матеріал може бути зовсім не осередненим за концентрацією крупної фракції. Тому для оцінки осереднення матеріалу при перемішуванні необхідний інший критерій. Давно використовують критерій, що полягає в урівноваженні моментів опору руху кожної лопаті механізму, який перемішує матеріал. Широке розповсюдження отримав критерій, що полягає в досягненні однорідної суміші матеріалів. Однак вказані критерії стосовно кульового млина прямо використати не можливо. Найбільш доцільним буде шлях, спрямований на покращення умов перемішування. При цьому стоїть перша задача затримання води в початковій ділянці барабана кульового млина, тобто вирівнювання часу перебування в ній твердого і води, та друга задача, що полягає безпосередньо в перемішуванні того ж матеріалу до забезпечення найкращої однорідності в первинній ланці процесу.

Потоки руди і води в кульовий млин відрізняються певною нестабільністю. Вихідна руда на конвеєрній стрічці вимірюється вагами з базовою площиною довжиною один метр. В наслідок нерівномірності завантаження конвеєрної стрічки та випадкового характеру розташування матеріалу показання вагів є випадковою функцією часу. Випадковою функцією часу може бути і витрата води в кульовий млин в наслідок коливання тиску в магістралі. Зважаючи на достатньо високі частоти цих коливань і порівняно невеликі амплітуди зміни ці збурюючі впливи не порушують технологічний режим кульового млина, що видно з рис. 1.

Розв'язання вказаних двох задач дозволить стрімко низити коливальність матеріалу в барабані, підвищити ефективність роботи куль в початковій та найближчих до неї ділянках барабана. Це забезпечить підвищення продуктивності кульового млина, якості подрібнення та неперевитрачання електричної енергії, куль і футерівки.

В процесі розв'язання поставлених задач найбільш ефективним є шлях усунення недоліків, які мають базові умови перемішування матеріалу в млині. Перший основний недолік – це створення обводнених зон в початковій ділянці та витіснення води у сусідню ділянку барабана млина. Відмічені недоліки можливо ліквідувати зв'язуванням води з твердим матеріалом на вході в першу ділянку або до неї. Зв'язана з твердим вода не може бути витісненою в сусідню ділянку. На процес цього зв'язку сильно впливає поверхня твердого. Змочене тверде

стає рухливим, оскільки ефективно діє змащення і взаємне переміщення частинок стає набагато легшим. У такому стані тверде відразу включається в перемішування і ефективно осереднюється вже в першій ділянці барабана, не впливаючи негативно на сусідні ділянки. Посилити ефект перемішування в першій ділянці, крім того, можливо за допомогою крупних куль, які необхідно вводити на вхід млина, компенсуючи зношені молотильні тіла та футерівку.

Показник вологості продуктів збагачення вміщує гравітаційну, капілярну, плівкову та гігроскопічну вологу. Гігроскопічна волога зв'язана з продуктом. У даному випадку діє так звана вільна (зовнішня) волога – це плівкова, капілярна і гравітаційна. Плівкова волога утримується на поверхні твердих частинок руди у вигляді плівок молекулярними силами зчеплення між молекулами твердого і води. Капілярна волога заповнює частково або повністю пори – капіляри, які утворилися в просторі між окремими частинками продукту збагачення. Вода тут утримується під впливом сил поверхневого натягу увігнутих водних менісків в капілярах. Кількість вологи, що утримується в капілярах, залежить від пористості масиву продукту збагачення. Гравітаційна волога заповнює некапілярні проміжки між частинками маси продукту збагачення. Ця волога не піддається впливу молекулярних капілярних сил і рухається між частинками твердого під дією сил тяжіння. Утримання води матеріалом в значній мірі визначається вологоутримуючою здатністю продуктів збагачення. Вона в основному залежить від гранулометричного складу і змочуваності поверхні твердого. Гранулометричний склад твердого обумовлює пористість і розвиток поверхні маси частинок. Чим дрібніші частинки твердого, тим більше створюється капілярів, в яких утримується волога. Тому найбільш проблематичною є початкова ділянка барабана млина, де крупність продукту найбільша. Високі густини пульпи в млинах сприяють створенню розгалуженої системи капілярів. Змочуваність характеризує молекулярну взаємодію води з поверхнею частинок і визначає можливість утримувати капілярну вологу. Руди певного родовища володіють конкретним значенням цього показника. Крім того, рухома пульпа може утримувати значну кількість води без розшарування.

Піски класифікатора містять певну кількість вологи. Для забезпечення руху пульпи у пісковий жолоб додають додаткову кількість води. Такий потік пульпи легко проходить через завитковий живильник і поступає в кульовий млин. Руда надходить у кульовий млин сухою, окремо подається вода. Ці два потоки необхідно частково об'єднати. Враховуючи, що плівкова волога залежить від поверхні твердого, а поверхні частинок утворюють капіляри, пропорційно поверхні вихідної руди перед завантаженням у кульовий млин необхідно подати частину загального потоку води. Вона створить плівкову, капілярну і гравітаційну вологу, яка надійно буде утримуватись потоком вихідної руди. Другу частину загального потоку води слід додати до пісків класифікатора перед входженням їх у приймальний пристрій завиткового живильника. Розріджені до максимально можливого рівня піски добре будуть контактувати з крупним продуктом вихідного живлення, легко пропускати крупні і дрібні шматки руди у своє середовище. Залишкову частину загального потоку води, яка повинна забезпечити задане розрідження пульпи, необхідно подати в центральну частину барабана млина, але розбризкуючи її в широкій зоні завантаження вихідної руди. Такі операції забезпечують ефективно перемішування і подрібнення матеріалу вже в початковій ділянці барабана млина.

Висновки

Таким чином, знайдені умови невиходу коливальних процесів матеріалу в барабані кульового млина за межі $\pm 3,0\%$ при дії збурюючих впливів з різною частотою та амплітудою по руді і воді. Встановлено, що при завантаженні кульового млина вихідною рудою, пісками механічного односпірального класифікатора та водою значна початкова частина барабана майже до його середини містить не осереднений матеріал, подрібнення якого здійснюється при перевитраті електроенергії, куль і футерівки. Попереднє змочення вихідної руди частиною води, максимально можливе розрідження пісків перед завантаженням та розбризкування залишкової води в зоні завантаження сильно покращують умови подрібнення. Показано, що для досягнення ефективного осереднення матеріалу в барабані кульового млина є шлях, спрямований на покращення умов перемішування. Зважаючи на достатньо високі частоти коливальних при подачі руди в млин і порівняно невеликі амплітуди зміни маси твердого ці збурюючі впливи суттєво не порушують технологічний режим роботи подрібнюючого агрегату.

Перспективою подальших досліджень є перевірка впливу завиткового живильника на коливальність матеріалу в барабані кульового млина при завантаженні піскового продукту механічного односпірального класифікатора.

Список використаної літератури

1. Кондратець В.О., Карчевська М.О. Моделювання розподілу крупного твердого з метою ідентифікації завантаження кульових млинів. *«Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту»*: Міжн. наук. конф. (Євпаторія, 18–22 трав. 2009 р.). Євпаторія. 2009. Т. 1. С. 68–70.
2. Грінман І.Г. Автоматизація процесів збагачення руд кольорових металів. Київ: Наукова Думка, 1964. 212 с.
3. Lynch A.J. Mineral Crushing and Grinding Circuits. *Developments in Mineral Processing*. Paris: Elsevier, 1977. 354 p.
4. Kellsall D.F.A. Study of breakage in a small continuous open-circuit wet ball mill. *Canad Mining J.* 1965. № 10. p. 25–29.

References

1. Kondratecj V.O., Karchevs'jka M.O. (2009) Modeljuvannja rozpodilu krupnogho tverdogho z metoju identyfikaciji zavantazhennja kuljovykh mlyniv. [Modeling the distribution of coarse solids to identify ball mill loading]. *"Intelektualjni systemy pryjnjattja rishenj ta problemy obchysljuval'nogho intelektu"*: Mizhn. nauk. konf. (Jevpatorija, 18–22 trav. 2009 r.). Jevpatorija, T. 1, pp. 68–70. [in Ukrainian].
2. Ghrinman I.Gh. (1964) Avtomatyzacija procesiv zbaghachennja rud koljorovykh metaliv [Automation of enrichment processes for non-ferrous metal ores]. Kyiv: Naukova Dumka, 212 s. [in Ukrainian].
3. Lynch A.J. (1977) Mineral Crushing and Grinding Circuits. Developments in Mineral Processing. Paris: Elsevier, 354 p.
4. Kellsall D.F.A. (1965) Study of breakage in a small countinuons opencircuit wet ball mill. *Canad Mining J*, no. 10, pp. 25–29.