

разливке-прокатке / А.Ю. Гридин // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2010. – Вып. 42. – С. 48–58.

10. The increase in efficiency of strips production process in foundry and rolling mill stand/ **Nikolay Berezhnoy, Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Valeriy Chubenko** // Metallurgical and Mining Industry. – 2016, № 4. – P. 296–300.

11. Патент України № 100153 МПК B21В1 Ливарно-прокатна кліть / **М.М.Бережний, В.А. Чубенко, А.А.Хіноцька, С.О. Мацишин, А.О. Шепель, В.А. Чубенко**, ДВНЗ «Криворізький національний університет». – заявл. 05.02.2015, опубл. 10.07.2015, Бюл.№ 13.

12. The increase in efficiency of strips production process in foundry and rolling mill stand/ **Nikolay Berezhnoy, Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Valeriy Chubenko** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015, № 12. – P. 296–300.

13. **Чубенко В.А.** Дослідження ефективності суспензійної розливки рідкої сталі у ливарно-прокатні кліті для виготовлення тонких смуг / **В.А.Чубенко, А.А. Хіноцька, В. Губенко** // Гірничий вісник, 2016. Кривий Ріг: КНУ. - Вип. 101. – С.183–186.

14. **М.М. Бережний.** Набуття сталлю реологічних властивостей при прокатуванні. Монографія / **М.М. Бережний, В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька** Кривий Ріг: Діоніс, 2014. – 150 с

15. Результати розрахунку об'єму осередку деформації при повздовжньому прокатуванні/ **М.М.Бережний, В.А.Чубенко, А.А.Хіноцька, А.Шепель** //Вісник Національного технічного університету України – Випуск 62. – 2011. – с.112–116

16. Час перебування металу в осередку деформації та утворення нової поверхні / **М.М.Бережний, В.А.Чубенко, А.А.Хіноцька, А.Глінкін** //Вісник Криворізького національного університету – Випуск 30. – 2012. – с. 171–174.

Рукопис подано до редакції 18.04.2017

УДК 681.5.015

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, д-р техн. наук, проф., **А.М. МАЦУЙ**, канд. техн. наук, доц.
Кіровоградський національний технічний університет

ДИНАМІЧНА КОРЕКЦІЯ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ ТА ЗАВАНТАЖЕННЯ КУЛЬОВОГО МЛИНА ПРИ ЗМІНІ КРУПНОСТІ РУДИ

Мета. Метою роботи є розробка підходу динамічної корекції розрідження пульпи і завантаження кульового млина при зміні крупності руди.

Методи дослідження. Задача розв'язувалася теоретичними методами описання процесу подрібнення та експериментальними методами уточнення теоретичних результатів.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в тому, що вперше запропоновано підхід динамічного коректування завантаження кульового млина рудою і розрідження пульпи в ньому в умовах зміни середньої крупності вихідного живлення.

Практична значимість. Показано, що продуктивність кульового млина можливо визначати за формулою з уточненим в промисловому дослідженні коефіцієнтом, виміряною середньою крупністю руди та відомою середньою крупністю подрібненого матеріалу. Визначена за запропонованою залежністю відповідно середній крупності дробленого матеріалу, погонному навантаженню руди та швидкості руху конвеєрної стрічки рухома площа поверхні дробленого матеріалу, помножена на умовну товщину водяної плівки на новому твердому, встановлену в промисловому експерименті, дає витрату води у кульовий млин. Така витрата води створює за будь-якої середньої крупності подрібнюваного матеріалу оптимальне розрідження пульпи у технологічному агрегаті, що гарантує отримання максимального виходу готового продукту. Практична значимість отриманих результатів вагома, оскільки суттєво зростає продуктивність кульового млина і не допускається перевитрата електричної енергії, куль і футеровки та зменшується втрата корисного компонента.

Результати. Запропонований підхід динамічної корекції стану рідкого матеріалу в кульовому млині, що подрібнює конкретний технологічний різновид руди, в умовах зміни крупності вихідного живлення базується на класичній теорії, що розглядає продуктивність технологічного агрегату у водоспадному режимі роботи, основні положення якої багаторазово підтверджувалися експериментально. Це засвідчує достовірність отриманих результатів. Крім того, зв'язок розрідження пульпи в кульових млинах при зміні середньої крупності неодноразово перевірявся в дослідженнях і на практиці. Зростання площі поверхні дробленого матеріалу при зменшенні його середньої крупності підтверджено теоретично на матеріалі сферичної форми незмінного розміру. Це також доведено і у випадку дробленого матеріалу через коефіцієнт розпушення. Точне значення коефіцієнта залежності продуктивності кульового млина від середньої крупності подрібнюваного матеріалу визначається за даними промислового експерименту.

Ключові слова: кульовий млин, корекція, крупність, завантаження, розрідження

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Основною складовою сировини чорної металургії України є магнетитовий концентрат, який отримують збагаченням бідних залізних руд. Перед збагаченням основну частку залізних руд подрібнюють у кульових млинах, які в першій стадії працюють у замкнутому циклі зі спіральним класифікатором. Значні перевитрати електричної енергії, куль і футеровки в першій стадії виступають чи не найважливішою причиною зростання собівартості магнетитового концентрату, що робить вітчизняну продукцію чорної металургії неконкурентоспроможною на світовому ринку. На розв'язання, зокрема, і цієї проблеми спрямована Галузева програма енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р., затверджена наказом Міністра промислової політики України №152 від 25.02.2009 року, та тематика наукових досліджень Кіровоградського національного технічного університету в межах держбюджетної теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942).

Аналіз досліджень і публікацій. До перших стадій подрібнення-класифікації на магнітозбагачувальних фабриках увага як вітчизняних [1-4], так і зарубіжних [5, 6] вчених повернута давно, однак ефективність подрібнювальних і класифікуючих агрегатів ще не була доведена до необхідного рівня. Тому до розв'язання тих чи інших задач вітчизняні вчені повертаються знову. В останні роки виходять роботи [7-10], спрямовані на покращення процесів керування подрібненням-класифікацією руди. Не дивлячись на значну кількість наукових праць в різні роки, задачу динамічної корекції стану рідкого матеріалу в системі оптимального керування розрідженням пульпи у кульовому млині в умовах зміни крупності вихідного живлення ніхто не розв'язував. Розв'язанню цієї задачі і присвячена дана стаття.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка підходу динамічної корекції стану рідкого матеріалу у кульовому млині та його завантаження при зміні середньої крупності вихідної руди з тим, щоб забезпечити найбільшу продуктивність за готовим продуктом при мінімальних перевитратах електричної енергії, куль і футеровки.

Викладення матеріалу та результати. На проблему зменшення витратності в рудопідготовці звернута увага в роботі [11]. Зокрема сказано, що зниження енергоємності процесів подрібнення і підвищення технологічної ефективності подрібнення слід розглядати як найбільш важливу складову на шляху інтенсифікації процесів рудопідготовки, що обумовлено як вибором оптимальної системи параметрів механічного режиму, так і набором технологічних параметрів, таких як: крупність вихідного живлення, співвідношення тверде/рідке, а також параметрами, що характеризують фізико-механічні властивості матеріалу, який переробляється. У роботі [12] стверджується, що оптимальну продуктивність подрібнювального агрегату, при якій забезпечується максимальний вихід готового продукту, можливо отримати лише при певному завантаженні кульового млина і певному співвідношенні тверде/рідке. Тобто, необхідно розв'язати ці задачі автоматичного пошуку і підтримання як завантаження, так і розрідження пульпи у кульовому млині.

Кульові млини на магнітозбагачувальних фабриках працюють у водоспадному режимі. На підставі теоретичних залежностей, викладених в [13], для водоспадного режиму роботи кульового млина можливо отримати залежність

$$Q_{PB} = 0,577 \frac{G k_P \delta_T \sqrt{D_M} \psi}{\varphi \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)} \cdot \left[\frac{9}{4} \psi^2 (1 - k_{MB}^4) - \frac{4}{3} \psi^6 (1 - k_{MB}^6) \right], \quad (1)$$

де G – кульове навантаження; k_P – подрібнюваність руди; δ_T – густина руди; D_M – діаметр кульового млина; ψ – швидкість обертання барабана; φ – степінь заповнення кулями; k_{MB} – відношення радіусів руху внутрішнього шару куль до зовнішнього; d – середня крупність руди, до якої вона подрібнюється; D – середня крупність вихідної руди.

Дана формула забезпечує завищені значення продуктивності, оскільки при падінні кульового навантаження здійснюється «віддача» частини його енергії на обертання барабана млина. Точно не встановлено, яка частина загальної енергії кульового навантаження здійснює такий вплив на барабан. Рахують, що на шкідливі опори-тертя в підшипниках, втрати в електродвигуні, витрати на завитковий живильник втрачається від 15 до 25% споживаної

електроенергії. Тому при використанні залежності (1) слід перевірити результати експериментально і внести поправку.

Залежність (1) виражає величину виграшу, тобто отримання найкращої продуктивності кульового млина по руді при подрібненні її до середньої крупності d . Вона отримана з фізичних міркувань, оскільки опирається на закон дроблення Рітгінгера. Тому її можливо розглядати в якості критерію оптимальності. Якщо переробляти певний тип руди, то k_P і δ_T будуть незмінними. Незмінними можуть бути і параметри кульового млина – k_{MB} , ψ , D_M , G і φ . У такому випадку при прийнятій середній крупності подрібненого матеріалу d продуктивність кульового млина буде залежати лише від середньої крупності вихідного живлення D . Однак критерій оцінювання якості функціонування млина по завантаженню дробленим матеріалом обов'язково необхідно скоректувати за результатами промислового експерименту при одній-двох середніх крупностях певного типу руди. Витримування в даному процесі заданої середньої крупності подрібненого матеріалу d поряд з найвищою продуктивністю кульового млина забезпечує мінімум втрат корисного компонента і мінімум перевитрачання електричної енергії, куль і футеровки.

Критерій оцінювання якості функціонування кульового млина за продуктивністю руди не враховує співвідношення тверде/рідке, хоч даний показник визначається крупністю матеріалу, типом руди і її густиною. З рекомендацій, висвітлених в літературних джерелах, видно, що розрідження пульпи сильно позначається на процесі подрібнення, є достатньо впливовим механізмом, однак не піддається розрахункам [14-17].

Розглянутий в роботах [18, 19] підхід встановлення необхідного розрідження пульпи у кульовому млині можливо застосувати у випадку переробки кількох типів руд при наявності в них сировини з середнім показником подрібнюваності, симетричною зміною подрібнюваності відносно середнього значення та показників інших руд, розташованих у проміжках між цими даними. Оскільки вірогідність реалізації даного підходу не досить висока, розроблявся більш ефективний прийом оцінювання співвідношення тверде/рідке в кульовому млині.

В ньому, на відміну від згаданого підходу, за основу взято кожний окремих тип руди у родовищі. При цьому фактори, що визначаються самим кульовим млином, приймаємо оптимальними і підтримуємо їх значення в процесі експлуатації. При цьому подрібнюваність руди також буде незмінною, а крупність d , до якої необхідно подрібнювати матеріал, буде визначатись вкрапленістю корисного компонента, тобто, буде відомою. Крупність вихідної руди залишиться змінною. За цих умов рівняння (1) можливо подати у вигляді

$$Q_{PB} = \frac{K_{PB}}{\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right)}, \quad (2)$$

де K_{PB} – незмінний коефіцієнт, який визначається прийнятими оптимальними параметрами кульового млина і характеристиками руди; d – відомий середній розмір руди, до якого вона подрібнюється, в залежності від вкрапленості корисного компонента.

Зміна середньої крупності вихідної руди буде потребувати корекції як продуктивності кульового млина, так і розрідження пульпи в ньому.

У кульовому млині вода з'єднується з твердим. Піски в технологічний агрегат надходять змоченими, але недостатньо розрідженими. Тому основна кількість води, яка подається у млин, зв'язується з його вихідним живленням. Чим дрібніше вихідне живлення, тим більше води необхідно подавати у кульовий млин, і навпаки, чим крупніша руда, тим будуть меншими витрати води. З іншого боку, чим менша середня крупність вихідної руди, тим більшою буде площа її поверхні. Отже, витрата води зв'язана з площею поверхні вихідної руди. Тобто, вода потрібна для створення умовної товщини плівки на поверхні нового твердого. Більше розрідження пісків можливо також віднести до умовної товщини плівки на новому твердому, оскільки при подрібненні руди певної середньої крупності створюється цілком визначене циркулююче навантаження і крупність твердого в ньому.

Площу поверхні рухомого дробленого матеріалу у завантаженні кульового млина можливо визначити відповідно залежності [20]

$$S_T(t) = \frac{6}{\delta_T g L} \cdot \frac{F(t) \cdot v(t)}{D}, \quad (3)$$

де $F(t)$ – погонне навантаження руди на конвеєрній стрічці, $v(t)$ – швидкість руху конвеєрної стрічки; g – прискорення земного тяжіння; L – базова відстань конвеєрних вагів.

Допустимо, що при найменшій середній крупності прийнятого типу руди D_{min} у промисловому експерименті на кульовому млині з оптимальними параметрами визначено найбільшу продуктивність Q_{PBdmin} і найкраще розрідження пульпи, що характеризується витратою води в технологічний агрегат Q_{Bmax} . Тоді відповідно (2), прирівнявши $Q_{PB}=Q_{PBmin}$, можливо визначити коефіцієнт K_{PB} , який точно враховує в залежності (1) характеристики кульового млина і руди. За формулою (1) при знайденому K_{PB} можливо точно встановлювати продуктивність кульового млина Q_{PB} при зміні середньої крупності вихідного живлення. Однак витрата води в кульовий млин при інших значеннях середньої крупності D вихідного живлення залишається не визначеною, оскільки умовна товщина водяної плівки за цих умов може суттєво відрізнятись від заданого значення, враховуючи найбільше відхилення циркулюючого навантаження і крупності матеріалу в ньому. Для цього необхідно провести промисловий експеримент при подрібненні даного типу руди при D_{max} з експериментальним визначенням найбільшої продуктивності і найкращого розрідження пульпи у кульовому млині. Допустимо, що в ньому отримані значення Q_{PBdmax} і Q_{Bmin} . Знайдене Q_{PBdmax} повинно відповідати розрахунковому значенню Q_{PB} при $D=D_{max}$, визначеному за (1), однак в експерименті може бути допущена похибка і ці величини можуть дещо відрізнятись. Дещо зміщеною може бути і оцінка витрати води у кульовий млин при D_{max} .

Експериментально знайдене найбільше значення витрати води у кульовий млин дорівнює

$$Q_{Bmax}(t) = \frac{F_A(t) \cdot v_A(t)}{K_{(T/P)min}}, \quad (4)$$

де $F_A(t) \cdot v_A(t)$ – експериментально визначена витрата руди при D_{min} ; $K_{(T/P)min}$ – експериментально отримане менше значення співвідношення тверде/рідке при D_{min} .

З рівняння (3) можна записати

$$F_A(t) \cdot v_A(t) = \frac{S_T(t)gL\delta_T D_{min}}{6}. \quad (5)$$

Підставивши (5) в (4), отримаємо масову витрату води в млин при D_{min} , виражену через рухому площу поверхні дробленого матеріалу

$$Q_{Bmax}(t) = \frac{S_{Tmax}(t)gL\delta_T D_{min}}{6K_{(T/P)min}}. \quad (6)$$

Поділимо ліву і праву частини рівняння (6) на g , L , δ_T і отримаємо об'ємну витрату води в кульовий млин при D_{min}

$$Q_{VBmax}(t) = \frac{D_{min}}{6K_{(T/P)min}} \cdot S_{Tmax}(t), \quad (7)$$

де $S_{Tmax}(t)$ – найбільша площа рухомої поверхні матеріалу при D_{min} .

Найменшу об'ємну витрату води в кульовий млин при D_{max} визначимо аналогічно

$$Q_{VBmin}(t) = \frac{D_{max}}{6K_{(T/P)max}} \cdot S_{Tmin}(t), \quad (8)$$

де $S_{Tmin}(t)$ – найменша площа рухомої поверхні матеріалу при D_{max} ; $K_{(T/P)max}$ – найменше розрідження пульпи, що відповідає середній крупності кускового матеріалу D_{max} .

У рівняннях (7) і (8) коефіцієнти $D_{min}/6K_{(T/P)min}$ і $D_{max}/6K_{(T/P)max}$ при $S_T(t)$ являють собою умовну товщину плівки води на поверхні твердого при найменшій і найбільшій середній крупності вихідної руди. Вони являють собою відношення розміру твердого до співвідношення тверде/рідке при даній середній крупності. Оскільки зростання середньої крупності дробленої руди потребує збільшення K_{TP} , то можливо припустити, що коефіцієнти при $S_T(t)$ у розглянутих залежностях суттєво змінюватись не будуть, що дозволяє визначати витрату води в кульовий млин на першій і другій половині діапазону зміни середньої крупності руди відповідно за рівняннями

$$Q_{VB1}(t) = \Delta_1 \cdot S_{T1}(t), \quad (9)$$

$$Q_{VB2}(t) = \Delta_2 \cdot S_{T2}(t), \quad (10)$$

де Δ_1 , Δ_2 – відповідно умовна товщина плівки води на твердому у першому і другому під діапазонах крупності; $S_{T1}(t)$, $S_{T2}(t)$ – відповідно рухома площа поверхні твердого в межах першого і другого піддіапазонів крупності.

Запропонований підхід динамічної корекції стану рідкого матеріалу в системі оптимального керування розрідженням пульпи у кульовому млині в умовах зміни крупності вихідного живлення базується на класичній теорії, що пояснює продуктивність технологічного агрегату у водоспадному режимі роботи, основні положення якої багаторазово підтверджувалися експериментально. Показано, що експериментальні дані в ході розробки цього підходу дозволяють отримувати достовірні результати. Зв'язок розрідження пульпи в млинах при зміні середньої крупності неодноразово перевірявся в дослідженнях і на практиці. Зростання рухомої площі поверхні дробленого матеріалу при зменшенні його середньої крупності підтверджено теоретично на матеріалі сферичної форми незмінного розміру. Його також доведено і у випадку дробленого матеріалу через коефіцієнт розпушення. Зафіксована в промисловому експерименті продуктивність млина буде відповідати виразу (2), а витрата води в технологічний агрегат – розрідженню пульпи, яке характеризує весь масив твердого в барабані.

Промодельюємо даний процес, використовуючи розглянуті залежності, при $D_{\min}=6$ мм, $D_{\max}=12$ мм, $\delta_T=3300$ кг/м³ і даних, отриманих в промисловому експерименті $Q_{PBd\min}=185$ т/год, $Q_{PBd\max}=175,1$ т/год, $Q_{VB\max}(t)=92,41$ м³/год, $Q_{VB\min}(t)=40,273$ м³/год. Результати моделювання подані на рисунках. Відповідно уточненим значенням $K_{P/B}$ за залежністю (2) на рис.1 побудовані криві. Вони точно відповідають реальному процесу, оскільки проходять через точки A і B , для яких продуктивності отримані в процесі експерименту. З них видно, що продуктивність кульового млина при зростанні середньої крупності руди зменшується. Теоретично точки A і B на рис.1 повинні знаходитись на одній кривій. Розходження, зафіксовані на рис.1, пояснюються похибками в експерименті. Тому найкращий результат буде отримано, якщо крива зміни продуктивності пройде через середню точку A_1 (крива 3) при зафіксованих витратах руди в млин у точках A і B (рис. 1).

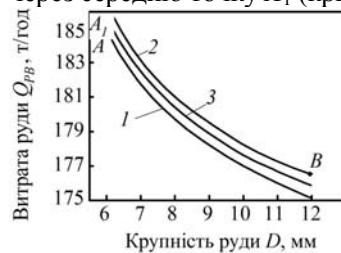


Рис.1. Залежність витрати руди в кульовий млин при зміні її середньої крупності: 1 – відповідно експериментальним даним при $D=6$ мм; 2 – при $D=12$ мм; 3 – осереднена залежність

Відповідно кривій 3 (рис.1), за залежністю (3) на рис. 2а побудовано графік зміни рухомої площі поверхні дробленої руди від її середньої крупності, де зафіксоване суттєве зменшення площі поверхні твердого при зростанні його розмірів. Враховуючи, що умовна товщина водяної плівки на поверхні твердого вихідного живлення змінюється порівняно в нешироких межах, витрата води у кульовий млин в основному буде визначатись зміною площі поверхні дробленого матеріалу.

Відповідно отриманим товщинам водяної плівки на твердому Δ_1 і Δ_2 на рис. 2б побудовані залежності витрати води у кульовий млин від середньої крупності вихідної руди. Залежність 1 охоплює піддіапазон середньої крупності від 6 до 9 мм. Для нього характерною є товщина водяної плівки Δ_1 . Якщо Δ_1 застосувати і для піддіапазону середньої крупності 9-12 мм, то отримаємо залежність 2 на рис. 2б, однак її використовувати менш логічно, оскільки при $D=12$ мм отримана умовна товщина водяної плівки Δ_2 . Вона буде більш характерною для піддіапазону середньої крупності 9-12 мм.

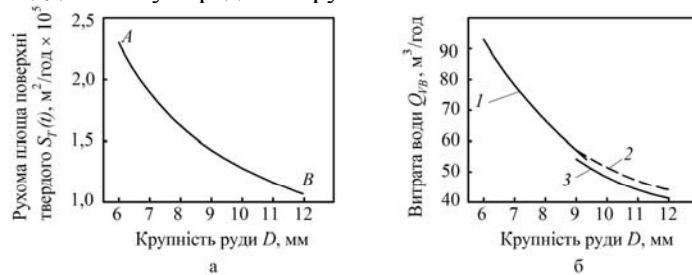


Рис. 2. Залежність площі поверхні твердого а і витрати води в кульовий млин б від середньої крупності вихідної руди, мм: 1, 2 – при умовній товщині плівки, що відповідає середній крупності дробленого матеріалу 6 мм; 3-12 мм

Зафіксовані в промисловому експерименті витрати води в кульовий млин при $D=6$ мм і $D=12$ мм однозначно зв'язані з витратами руди в технологічний агрегат, її середньою крупністю і рухомою площею поверхні твердого. При цьому забезпечується оптимальне завантаження кульового млина рудою і найкраще розрідження пульпи, які відповідають згаданим середнім крупностям руди.

У випадку, наприклад, зростання середньої крупності дробленої руди відповідно (2) буде закономірно зменшена продуктивність кульового млина і відповідно рухома площа поверхні твердого, а, як наслідок, і витрата води в технологічний агрегат, яка при певній середній крупності кускового матеріалу створить оптимальне розрідження пульпи.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отже, розроблено підхід динамічної корекції стану рідкого матеріалу в системі оптимального керування розрідженням пульпи у кульовому млині в умовах зміни середньої крупності вихідного живлення.

Він передбачає використання кульового млина з експлуатаційними параметрами, які забезпечують оптимальну продуктивність, проведення промислового експерименту на конкретному типі руди і кульовому млині для коректування теоретичної залежності продуктивності від середньої крупності подрібнюваного матеріалу і встановлення витрати води у технологічний агрегат при конкретних продуктивностях і найменшій та найбільшій середніх крупностях твердого в умовах найкращого розрідження пульпи.

За даними промислового експерименту визначають точне значення коефіцієнта залежності продуктивності кульового млина від середньої крупності подрібнюваного матеріалу та умовну товщину водяної плівки на новому твердому на початковій і кінцевій ділянках діапазону середньої крупності руди.

Вимірюючи середню крупність вихідної руди та знаючи середню крупність, до якої її подрібнюють, визначають та вводять завдання на продуктивність кульового млина.

За відомою середньою крупністю руди та вимірними її погонним навантаженням і швидкістю руху конвеєрної стрічки знаходять рухома площу поверхні твердого, перемноження якої на відповідну товщину водяної плівки визначає витрату води у кульовий млин на першому та другому піддіапазонах крупності.

Така витрата води створює за будь-якої середньої крупності подрібнюваного матеріалу оптимальне розрідження пульпи у технологічному агрегаті, що гарантує отримання максимального виходу готового продукту.

Перспективою подальших досліджень є розробка системи оптимального керування розрідженням пульпи у кульовому млині з його динамічною корекцією при зміні середньої крупності вихідної руди.

Список літератури

1. **Марюга А.Н.** Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / **Марюга А.Н.** – М.: Недра, 1987. – 230с.
2. **Процудо В.С.** Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / **Процудо В.С.** – М.: Недра, 1987. – 253 с.
3. **Моркун В.С.** Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами / **Моркун В.С., Цокуринко А.А., Луценко И.А.** – Кривой Рог: Минерал, 2005. – 261с.
4. **Назаренко М.В.** Исследование корректности построения математических моделей процесса переработки сырья горно-обогатительным комбинатом / **Назаренко М.В.** // Разработка рудных месторождений: Респ. міжвідомчий наук.-техн. зб. Мін. освіти і науки України.– Кривий Ріг, 2005. – №88. – С.132-135.
5. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / **Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. и др.**. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2013. – 512с.
6. **Линч А. Дж.** Циклы дробления и измельчения / **Линч А. Дж.**: [пер. с англ.]. – М.: Недра, 1981. – 342с.
7. **Моркун В.С.** Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе H_{∞} -нормы / **В.С. Моркун, Н.В.Моркун, В.В.Тронь** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». – 2014. – Вип. 98. – С. 83-85.
8. **Тронь В.В.** Формування адаптивного керування процесом подрібнення залізорудної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта / **В.В. Тронь, К.В.Маєвський** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». – 2015. – Вип. 99. – С. 27-32.
9. **Азарян А.А.** Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / **А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 36. – С. 276-280.
10. **Купін А.І.** Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / **Купін А.І.** – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204с.
11. **Маляров П.В.** Основы интенсификации процессов рудоподготовки / **Маляров П.В.** – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 320с.

12. **Бонч-Бруевич А.М.** Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем / **Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Чинаев П.И.** – М.: Машиностроение, 1967. – 292 с.
13. **Андреев С.Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / **Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В.** – М.: Недра, 1980. – 415 с.
14. **Зверевич В.В.** Основы обогащения полезных ископаемых / **В. Зверевич, В. Перов.** – М.: Недра, 1971. – 216с.
15. **Божко М.П.** Машинист мельницы / **М. Божко, В. Маргулис.** – М.: Госнаучтехиздат лит. по горному делу, 1962. – 100 с.
16. **Скоров В.А.** Обогащение руд / **Скоров В.А.** – М.: Недра, 1969. – 276 с.
17. **Вальтер А.К.** Автоматический контроль плотности железорудной пульпы гамма-лучами / **Вальтер А.К., Плаксин И.Н., Гольдин М.Л.** – Харьков: Изд. ХГУ, 1962. – 244 с.
18. **Кондратец В.О.** Теоретичне обґрунтування системи адаптивного керування подрібненням руди кульовими млинами / **В.О. Кондратец, М.О. Карчевська** // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць.- 2011. – Вип.28. – С.196-200.
19. Пат. 62052 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення / **Кондратец В.О., Карчевська М.О.**: заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- №u201100657; заявл. 20.01.11; опубл. 10.08.11, Бюл.№7.
20. **Kondratets V.A.** Adaptive control of ore pulp thinning in ball mills with the increase of their productivity // *Metalurgical and Mining Industry.* – 2014, №6. – P.12-15.

Рукопис подано до редакції 18.04.2017

УДК 621.365.5, 621.314.5

Д. И. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц., Донбасский государственный технический университет

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ИНДУКТОРОВ В УСТАНОВКАХ ЗОННОГО НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗАГОТОВОК

Цель работы. Исследование вариантов питания индукторов в установках зонного нагрева с использованием изменения ферромагнитных свойств материала заготовок при различных температурах.

Методы исследования. На основании зависимостей активного и индуктивного сопротивлений от температуры магнитной заготовки параллельной схемы замещения индуктора и зависимостей добротности от температуры определялись параметры схем замещения четырех индукторов установки зонного индукционного нагрева. На схематической модели силовой части индукционной установки с питанием индукторов от одного преобразователя с параллельным включением индукторов определялось значение мощностей.

Научная новизна. Мощность индукторов природным образом, согласно свойствам материала заготовок, распределяется так, что заготовка с меньшей температурой потребит на нагрев большую мощность. Такое естественное распределение мощностей может использоваться в установках зонного нагрева. Однако для более точного нагрева необходимо иметь возможность регулировать мощность индукторов последних ступеней.

Результаты. Параметры эквивалентных электрических схем замещения изменяются таким образом, что при включении индукторов параллельно и питании их от одного преобразователя частоты мощности, потребляемые индукторами, при увеличении температуры уменьшаются. Однако для обеспечения оптимального распределения мощностей и точного нагрева индукторы последних ступеней должны иметь или другую конструкцию, с увеличенным числом витков, или получать питание от отдельного преобразователя частоты.

Практическое значение. В установках зонного индукционного нагрева первые индукторы могут быть одинаковыми и получать питание от одного преобразователя, а значит, количество преобразователей может быть меньше количества индукторов.

Ключевые слова: индуктор, зонный нагрев, схема замещения, модель, мощность.

Введение. В настоящее время индукционные установки с высокой производительностью строятся многоиндукторными с непрерывным перемещением нагреваемых заготовок последовательно через несколько индукторов. Каждый индуктор осуществляет нагрев части заготовок в определенной зоне пространства – такой способ нагрева называется зонным. При этом оптимальной программы нагрева и требуемой конечной температуры возможно достичь, обеспечив передачу заготовке соответствующей мощности каждым индуктором (в каждой зоне) отдельно. Такой подход ставит задачи формирования индукторами требуемой мощности, решение кото-