

11. Колосов В.А. Современное состояние и перспективы развития предприятий по добыче и переработке железорудного и флюсового сырья в Украине / В.А. Колосов, В.П. Воловик, Н.И. Дядечкин // Горн. журн. – М. : МГУ, 2000. – №6. – С. 162-168.
12. Черных А.Д. Комплексная разработка рудных месторождений / А.Д. Черных, В.А. Колосов, О.С. Брюховецкий и др.; Под ред. А.Д. Черных. – К. : Техніка, 2005. – 376 с.
13. Бовин А.А. Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых на больших глубинах / А.А. Бовин, М.В. Курленя, Е.И. Шемякин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – М.: [б. и.], 1983. – № 3. – С. 64-73.
14. Tarasyutin V.M. Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2015. Issue 1. P. 54–60.
15. Khomenko O. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2012. Issue 4. P. 44–54.
16. Лебедев И.М. Определение объемов горно-капитальных выработок при экономико-математическом моделировании схем вскрытия//Разработка рудных месторождений: республик. межвед. науч.-техн. сборник. – К.: Техніка. – 1978. – Вип. 26. – С. 17-20.
17. Фаустов Г.Т. Определение оптимальной величины I ступени вскрытия месторождений Кривбасса/Фаустов Г.Т., Лебедев И.М. //Разработка рудных месторождений: республик. межвед. науч.-техн. сборник. – К.: Техніка. – 1977. – Вип. 24. – С. 13-16.
18. Малахов Г.М. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах./ Г.М.Малахов, А.П.Черноус // М.: Госгортехиздат, 1960. – 300 с.

Рукопис подано до редакції 02.04.2018

УДК 681.5.015.23:681.5.015.24

А.М. МАЦУЙ, канд. техн. наук, доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗНОРОЗМІРНОГО КУЛЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА ПЕРШОЇ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ ВИХІДНОЇ РУДИ

Мета. Метою роботи є математичне моделювання різномірного кульового навантаження млина першої стадії подрібнення руди для удосконалення механізму впливу на сумарні характеристики при досягненні його оптимального раціонального значення, що забезпечує найвищу продуктивність.

Методи дослідження. Базувалися на теорії математичного моделювання, теорії спрацювання куль, побудови характеристик кульового навантаження, режимів роботи кульових млинів, теорії та практиці раціонального довантаження куль у технологічні агрегати.

Наукова новизна. Полягає в тому, що удосконалено механізм впливу на сумарні характеристики різномірного кульового навантаження млинів, що дає можливість більш ефективно досягати його оптимального раціонального значення, яке забезпечує найвищу продуктивність технологічного агрегату за готовим продуктом.

Практична значимість. Полягає в тому, що відкривається перспектива більш швидкого отримання обгрунтованої за параметрами сумарної характеристики кульового навантаження і спрощення вартісних експериментальних досліджень щодо забезпечення підвищення максимальної продуктивності технологічного агрегату за готовим продуктом.

Результати. Встановлено, що при виборі характеристики кульового навантаження необхідно враховувати режим роботи млина. Характеристики крупності розглядалися при чотирьох початкових розмірах куль, однак їх можливо брати і більше. Більше п'яти початкових розмірів куль на практиці не використовують. При виборі складу куль, що претендує на оптимальний раціональний, необхідно характеристику розпочинати з максимального розміру кулі та розташовувати її практично паралельно ідеалізованій та реальній характеристиці, що відповідає обраному режиму роботи. Початкові характеристики визначають характер сумарних характеристик. Рівномірність розташування S-подібних сумарних характеристик відносно ідеалізованих залежить від положення останніх. Змінюючи положення початкових характеристик кульового навантаження млина, можливо впливати на сумарні характеристики. Вибір початкових характеристик кульового навантаження млина відрізняється широкими можливостями. На них можливо впливати вибором максимального розміру кулі у кульовому навантаженні, кількості обраних розмірів куль, процентного вмісту обраних молоткових тіл у навантаженні. Це дозволяє виконати правильний вибір первинного кульового навантаження млина, який необхідно підтвердити експериментальною перевіркою щодо забезпечення максимальної продуктивності за готовим продуктом.

Ключові слова: різномірне кульове навантаження; ідеалізована, початкова, сумарна характеристики; моделювання

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-8-14

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Проблемою гірничо-видобувних галузей є завищена собівартість залізного концентрату в наслідок значних перевитрат електроенергії, куль і футеровки, особливо в перших стадіях подрібнення руди. На цю проблему постійно звертається увага в Урядових документах, її розробляють наукові колективи. Зокрема, вона знаходить відображення і в науковій тематиці Центральноукраїнського національного технічного університету у вигляді держбюджетних тем «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942), «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (0109U007939). Однією з важливих причин такого положення є неоптимальність і нестабільність кульового навантаження в млинах першої стадії подрібнення руди. Оскільки ця задача не розв'язана, тема даної статті є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Покращенням показників роботи першої стадії подрібнення займалися давно як в нашій країні, так і за кордоном в основному автоматизацією технологічних процесів, що видно, наприклад, з наукових праць [1-7], однак така робота продовжується і в теперішній час. Наприклад, в роботі [8] показано, що автоматизація першої стадії подрібнення, класифікації і магнітної сепарації є реальним шляхом підвищення ефективності збагачення залізних руд. В роботі [9] вказано на відсутність надійних засобів контролю необхідної точності та значну їх вартість. Ефективні ультразвукові інформаційні засоби [10], створені в останні роки, можуть вимірювати крупність руди та інші технологічні параметри. Не дивлячись на це, не вдалося ефективно розв'язати задачу стабілізації роботи кульового навантаження млина. Розвивався також і практичний підхід стабілізації кульового навантаження млинів. Доведено, що найвищу продуктивність кульового млина можливо досягти при заповненні барабана кулями на 50% [11]. Встановлено, що суміш куль різного розміру більш продуктивна порівняно з однаковими тілами. Вона забезпечує на 10...15% більш високу продуктивність [12]. Рахують, що існує оптимальна характеристика крупності кульової суміші, що забезпечує максимальну продуктивність. Максимальний розмір молольних тіл і характеристику їх крупності уточнюють експериментальним шляхом [5]. Є приклади підбору суміші куль для конкретних технологічних агрегатів, умов їх роботи і матеріалу [11, 13, 14]. Якщо забезпечити стабілізацію оптимального кульового навантаження, то у країнах з розвинутою гірничо-видобувною промисловістю можливо економити мільярди грошових одиниць на рік [15]. Однак нині теоретично не розроблені прийоми визначення початкової оптимальної характеристики крупності куль, її стабілізації в процесі роботи шляхом додавання нових молольних тіл на зміну спрацьованим.

Постановка завдання. Метою роботи є математичне моделювання різнорозмірного кульового навантаження млина першої стадії подрібнення руди для удосконалення механізму впливу на сумарні характеристики при досягненні його оптимального раціонального значення, що забезпечує найвищу продуктивність.

Викладення матеріалу та результати. При подрібненні руди в кульових млинах спрацьовуються як кулі, так і футеровка. Кулі спрацьовуються більш інтенсивно порівняно з футеровкою, тому її замінюють наближено один раз у півроку, а молольні тіла додають у млин в процесі роботи. Спрацювання молольних тіл залежить від ряду факторів – подрібнюваного матеріалу, матеріалу та способу виготовлення, розмірів, маси куль, швидкості обертання барабана, характеристики подрібнюваного матеріалу, типу футеровки, густини пульпи та інше. Втрата матеріалу в кулях відбувається в основному за рахунок стирання їх поверхні, що приводить до зменшення діаметра. Практикою встановлено, що спрацювання куль пропорційне витраті корисної енергії, яка споживається кульовим млином. Однак інколи спрацювання куль відносять і до тони подрібненої руди. Цей показник достатньо ефективний за умов незмінності технологічного різнотипу руди і її характеристики крупності.

Відомо кілька гіпотез закономірності спрацювання куль у млинах, які узагальнив К.О. Разумов [11], запропонувавши швидкість спрацювання куль визначати відповідно рівнянню

$$\frac{dG}{dt} = -kD_k^m, \quad (1)$$

де G – початкова маса кулі, кг; k – коефіцієнт пропорціональності; t – тривалість спрацювання; D_k – початковий діаметр кулі, см; m – величина, що змінюється в залежності від режиму роботи млина в межах 2...3.

У залежності (1) $m=2$ при каскадному режимі роботи, що відповідає спрацюванню поверхні. У водоспадному режимі $m=3$, оскільки спрацювання куль відбувається пропорціонально їх масі. У змішаних режимах роботи показник m приймає значення дещо більші 2 і дещо менші 3.

З рівняння (1) слідує, що при початковому завантаженні млина молотильним середовищем одного розміру і в процесі роботи довантаженні його тілами того ж розміру, після спрацювання початкового молотильного навантаження в технологічному агрегаті створиться суміш куль різних розмірів, склад яких відповідає закономірності їх спрацювання. Цей склад молотильних тіл зберігається незмінним в процесі роботи млина, але в ньому переважають крупні кулі. Тому така характеристика кульового навантаження не забезпечує оптимальної продуктивності [16].

Відповідно (1) можливо для характеристики кульового навантаження за плюс D записати рівняння [11]

$$Z = 100 \cdot \frac{D_k^n - D^n}{D_k^n}, \% \quad (2)$$

де Z – вихід куль певного розміру; D_k – максимальний діаметр кулі; D – діаметр кулі, що розглядається.

У рівнянні (2) $D < D_k$, $n=6-m$ [11]. Цю залежність використовують для побудови характеристики крупності молотильного середовища після зносу початкового навантаження кульового млина.

Відомо, що для кожної крупності матеріалу з певною подрібнюваністю можливо підібрати характеристику крупності кульової суміші, яка забезпечує найбільш високу продуктивність млина. Це здійснюють дослідним шляхом, однак нині накопичені і певні практичні рекомендації щодо створення таких кульових навантажень. В останні роки склалася тенденція більш дрібно подрібнювати руду в дробильному відділенні збагачувальної фабрики і в кульові млини подавати матеріал крупністю близько 13 мм. Наприклад, на одній з вітчизняних збагачувальних фабрик вихідна руда має середньозважену крупність 10,10 мм, 9,74 мм, 7,97 мм, 8,51 мм [17]. Експериментально встановлено [11] оптимальне раціональне початкове значення кульового навантаження при подрібненні твердої руди крупністю 13 мм до 0,2...0,3 мм у наступному ваговому складі: кулі 90 мм (32%), 75 мм (27%), 65 мм (23%), 50 мм (18%). Це кульове навантаження можливо прийняти як оптимальне і при подрібненні руди вказаних розмірів у кульовому млині МШЦ 4,5×6,0.

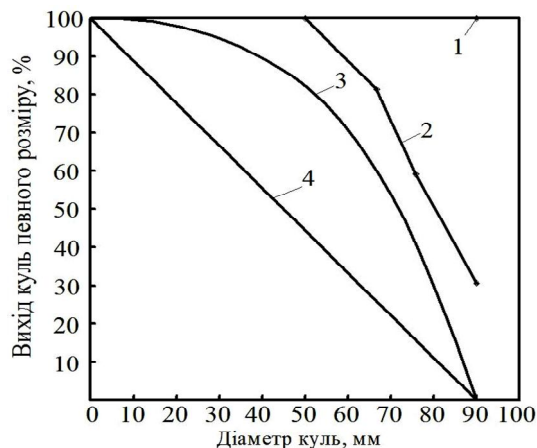


Рис.1. Проміжні характеристики крупності кульового навантаження млина: 1 – при крупності 90 мм; 2 – початкового навантаження з куль чотирьох розмірів; 3 – усталеного навантаження при повному спрацюванні початково завантажених куль максимального розміру; 4 – ідеалізована сумарна, до якої прагне характеристика 2 при повному спрацюванні різнорозмірного початкового навантаження

Вказана характеристика крупності кульового навантаження млина забезпечує найбільшу продуктивність при даних розмірах молотильних тіл, тобто без спрацювання. В процесі роботи кулі усіх розмірів будуть спрацьовуватися, а характеристика змінюватися. Порівняємо її з більш простим випадком, коли кульове навантаження складене з однакових

максимальних куль 90 мм. Характеристика крупності такого кульового навантаження буде подана точкою 1 на рис.1, а оптимального змішаного – графіком 2. Якщо однорозмірне вихідне кульове навантаження, поповнюючись такими ж кулями 90 мм, повністю спрацюється, характеристику крупності молотильного середовища млина можливо визначати відповідно залежності (2). Вона, розрахована за виразом (2), зображена на рис.1 кривою 3. Дана характеристика є опуклою і достатньо добре схожа на характеристику 2, притаманну початковому оптимальному кульовому навантаженню. Як стверджує Д.К. Крюков [16], характеристика 3 не забезпечує оптимальних показників кульового млина, оскільки в такому молотильному середовищі не вистачає дрібних і середніх куль. Ідеалізована характеристика 4, що з'єднує граничні точки залежності 3, відповідає оптимальному складу кульового навантаження, оскільки відрізняється рівномірним

вмістом куль від самих дрібних до самих крупних. Виходячи зі сказаного, характеристика 2, що відповідає оптимальному складу куль, також не забезпечує найкращих показників роботи кульового млина. При спрацюванні вихідного різнорозмірного кульового навантаження і його компенсації кулями такого ж розміру, характеристика 2 своїми кінцями примкне до точок з граничними крупностями. Далі, досягнувши усталеної крупності за складом куль, вона займе наближене до характеристики 4 місце.

Кульові млини можуть працювати у каскадному, водоспадному та змішаних режимах роботи, що визначається показником m в залежності (2). Збільшимо максимальне значення розміру кулі до 100 мм і відповідно (2) побудуємо характеристики крупності усталеного кульового навантаження, показані на рис.2, при різних режимах роботи технологічного агрегату. З'єднавши граничні точки залежностей між собою, отримаємо ідеалізовану усталену характеристику 7 кульового навантаження. Порівнюючи характеристику 4 (рис.1) і характеристику 7 (рис.2), помічаємо, що друга характеристика 7 більш похила і має більш широкий діапазон зміни крупності куль. Характеристики 1-6 (рис.2) – опуклі, в них переважають крупні кулі. Вони суттєво віддалені від ідеалізованої характеристики 7, однак характеристика 6 водоспадного режиму є найбільш наближеною. Тобто, при виборі характеристики кульового навантаження необхідно враховувати режим роботи млина. З іншого боку, збільшення максимального діаметра кулі дозволяє змінювати нахил ідеалізованої характеристики крупності і по можливості забезпечувати більш широкий набір розмірів молоткових тіл. При виборі складу куль, що претендує на оптимальний раціональний, необхідно характеристику розпочинати з максимального розміру кулі та розташовувати її практично паралельно ідеалізованій та реальній характеристиці, що відповідає обраному режиму роботи.

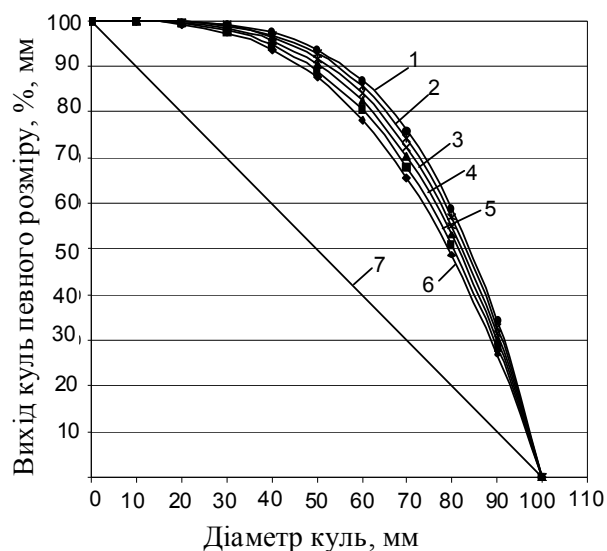


Рис.2. Характеристики крупності усталеного кульового навантаження млина при початковому завантаженні кулями максимального розміру 100 мм в різних режимах роботи при: 1 – $m=2$ (каскадний); 2 – $m=2,2$; 3 – $m=2,4$; 4 – $m=2,6$; 5 – $m=2,8$ (змішані); 6 – $m=3$ (водоспадна); 7 – ідеалізована характеристика крупності

Результуюча характеристика змішаного кульового навантаження є наслідком часткових характеристик окремих куль відповідно їх розмірам. Такі характеристики визначаються виразом (2). Оскільки вони залежать від показника m , то будуть дещо відрізнятися при різних режимах роботи кульового млина. Ці часткові характеристики дозволяють отримати сумарну характеристику крупності, що характеризує все кульове навантаження млина в усталеному режимі роботи, коли початкові молоткові тіла повністю зносяться.

Дослідимо отримання усталеного кульового навантаження на прикладі кульового млина МШЦ 4,5×6,0, який має робочий об'єм 81 м^3 і працює у водоспадному режимі. При 50% заповненні барабана об'єм, зайнятий молотковим середовищем, складає $40,5 \text{ м}^3$, а безпосередньо кулями при різних розмірах – $0,62$ загального простору, тобто $25,11 \text{ м}^3$. Об'ємна вага сталевих куль в даному випадку дорівнює $4,8 \text{ т/м}^3$, а маса кульового навантаження у млині – $194,4 \text{ т}$. Дана маса куль в усталеному режимі розподіляється відповідно початковому завантаженню. Тоді кулі, які відповідають найбільшому розміру 90 мм, мають масу $62,2 \text{ т}$, діаметр яких дорівнює 75 мм – $52,5 \text{ т}$, 65 мм – $44,7 \text{ т}$, 50 мм – $35,0 \text{ т}$.

Відповідно оптимальному раціональному складу куль з розмірами 90, 75, 65 і 50 мм за (2) побудовані частинні характеристики крупності усталеного кульового навантаження млина, які дозволяють визначити відносний склад куль за розміром у процентах, що відповідає кожному типу молоткових тіл. За розрахунками за (2) знайдено відносний склад куль відносно кожного їх розміру у сумарному навантаженні, що дозволяє отримати сумарну характеристику крупності усталеного кульового навантаження технологічного агрегату.

Сумарна характеристика крупності куль в усталеному навантаженні млина показана на

рис.3 (крива 2). Ідеалізована характеристика крупності кульового навантаження на цьому ж рисунку показана прямою 1. З рис.3 видно, що характеристика 2 має S-подібну форму і розташована відносно ідеалізованої характеристики 1. Прямолінійна характеристика 1 відповідає рівномірній крупності молотильних тіл у складі навантаження технологічного агрегату. Опукла ділянка характеристики 2 свідчить про те, що в розмірі куль від 0 до 65 мм переважають більш крупні тіла. Увігнута ділянка характеристики 2 підкреслює переважання в кульовому навантаженні 65...90 мм більш дрібних куль. Як видно з рис.3, відмічені ділянки є несиметричні з перевагою на більш крупні тіла.

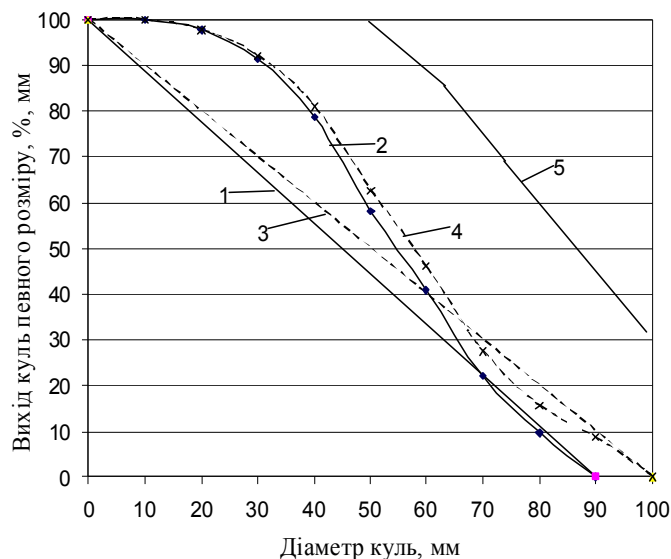


Рис.3. Характеристики крупності кульового навантаження млина при змішаному розмірі молотильних тіл: 1 – ідеалізована при максимальному діаметрі кулі 90 мм; 2 – сумарна, що відповідає кульовому навантаженню з максимальним діаметром 90 мм, яке забезпечує найкращу продуктивність; 3 – ідеалізована при максимальному діаметрі кулі 100 мм; 4 – сумарна, що відповідає більш крупному складу молотильного середовища; 5 – початкова характеристика кульового навантаження млина при збільшеній до 100 мм крупності куль

Дослідимо структуру усталеного кульового навантаження млина при більш крупних максимальних діаметрах куль. Прийmemo найбільший розмір кулі 100 мм, останні розміри залишивши незмінними. Нехай вагова частка куль діаметром 100 мм складає 32%, діаметром 75 мм – 35%, діаметром 65 мм – 18%, діаметром 50 мм – 15%. Тоді загальна маса куль $194,4 \cdot 10^3$ кг розподілиться наступним чином: кулі 100 мм – $62,21 \cdot 10^3$ кг, 75 мм – $68,04 \cdot 10^3$ кг, 65 мм – $34,99 \cdot 10^3$ кг, 50 мм – $29,16 \cdot 10^3$ кг. Дані складу куль у навантаженні млина в усталеному режимі роботи молотильного середовища при більших початкових розмірах визначені за формулою (2). Характеристика крупності усталеного кульового навантаження наведена на рис.3 (крива 4), де також показана ідеалізована характеристика 3, що відповідає кульовому навантаженню зі збільшеною до 100 мм величиною крупних куль. В діапазоні зміни розміру куль 0...65 мм (крива 4) переважають більш крупні молотильні тіла, а в діапазоні 65...100 мм – більш дрібні. В цілому S-подібна характеристика 4 стає більш рівномірною. Тому такий усталений склад куль може виявитися більш ефективним в певних умовах подрібнення руди. Як видно, характеристика 4 усталеного кульового навантаження млина відповідає початковій характеристиці 5 кульового навантаження.

Порівнюючи рис. 1 і рис. 3, робимо висновок, що початкові характеристики 2 (рис.1) і 5 (рис.3) визначають характер сумарних характеристик 2 і 4 (рис.3). Тому, змінюючи положення початкових характеристик кульового навантаження млина, можливо визначати сумарні характеристики, а провівши промислові випробування – ефективність подрібнення певного технологічного різнотипну руди.

Вибір початкових характеристик кульового навантаження млина відрізняється широкими можливостями. Перш за все враховують режим роботи технологічного агрегату, оскільки його визначено першочергово і він впливає на характеристики крупності, що характеризують усталене кульове навантаження млина, які дещо змінюються, як це видно з рис.4. Характеристики крупності розглядалися при чотирьох початкових розмірах куль, однак їх можливо брати і більше, як показано на рис.4. Нині формується на практиці тенденція збільшення максимального розміру куль навіть до 120 мм. Більше п'яти початкових розмірів куль не використовують. Значні можливості криються і в процентному складі початкового навантаження молотильного середовища. Як видно, ці заходи в широких межах можуть змінювати положення і форму сумарної характеристики усталеного кульового навантаження млина. Залишається лише експериментально перевіркою встановити найкращий вид характеристики, що забезпечує максимальну продуктивність технологічного агрегату за готовим продуктом.

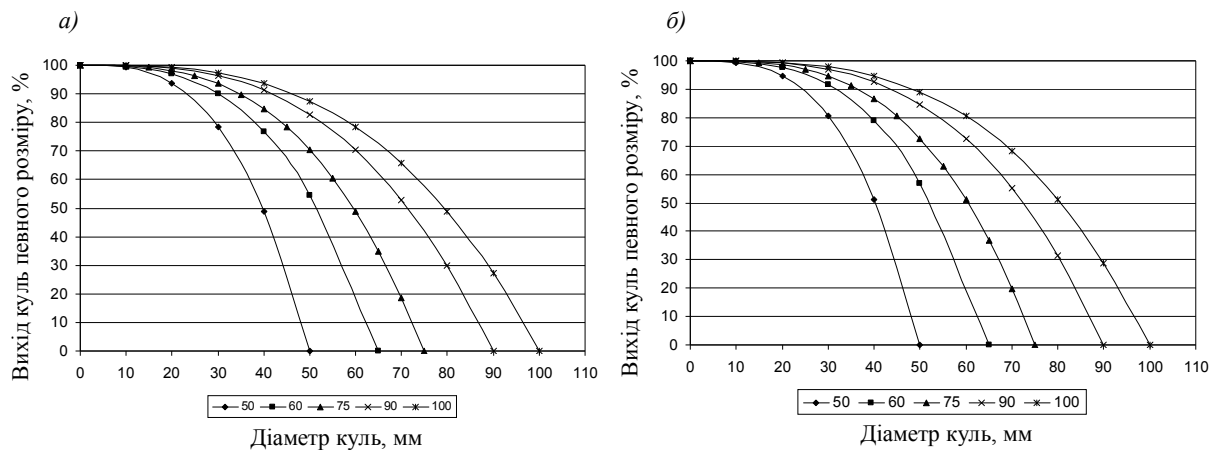


Рис.4. Характеристики крупності, що характеризують усталене кульове навантаження млина у водоспадному режимі (а) і змішаному режимі роботи млина (б) при $m=2,8$

Висновки та напрямок подальших досліджень. В роботі на основі відомої теоретичної залежності К.О. Разумова щодо швидкості спрацювання куль в млинах, виразу для характеристики кульового навантаження та даних практичного досвіду виконано математичне моделювання сумарних характеристик крупності усталеного оптимального раціонального кульового навантаження млина при змішаному розмірі молоткових тіл.

Встановлено, що при виборі характеристики кульового навантаження необхідно враховувати режим роботи млина. Характеристики крупності розглядалися при чотирьох початкових розмірах куль, однак їх можливо брати і більше. Більше п'яти початкових розмірів куль на практиці не використовують. При виборі складу куль, що претендує на оптимальний раціональний, необхідно характеристику розпочинати з максимального розміру кулі та розташовувати її практично паралельно ідеалізованій та реальній характеристиці, що відповідає обраному режиму роботи. Початкові характеристики визначають характер сумарних характеристик. Рівномірність розташування S-подібних сумарних характеристик відносно ідеалізованих залежать від положення останніх. Змінюючи положення початкових характеристик кульового навантаження млина, можливо впливати на сумарні характеристики. Вибір початкових характеристик кульового навантаження млина відрізняється широкими можливостями. На них можливо впливати вибором максимального розміру кулі у кульовому навантаженні, кількості обраних куль та процентного вмісту обраних молоткових тіл у навантаженні. Це дозволяє виконати правильний вибір первинного кульового навантаження млина, який необхідно підтвердити експериментальною перевіркою щодо забезпечення максимальної продуктивності за готовим продуктом.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що удосконалено механізм впливу на сумарні характеристики різнорозмірного кульового навантаження млина, що дає можливість більш ефективно досягати його оптимального раціонального значення, яке забезпечує найвищу продуктивність технологічного агрегату за готовим продуктом.

Практична цінність роботи полягає в тому, що відкривається перспектива більш швидкого отримання обґрунтованої за параметрами сумарної характеристики кульового навантаження і спрощення вартісних експериментальних досліджень щодо підтвердження забезпечення максимальної продуктивності технологічного агрегату за готовим продуктом.

Перспективою подальших досліджень є розробка підходів отримання ідеалізованої характеристики кульового навантаження млина, яка б при певній початковій характеристиці кульового навантаження забезпечувала б найкраще сходження сумарної та ідеалізованої характеристик.

Список літератури

1. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / Марюта А.Н. – М.: Недра, 1987. – 230 с.
2. Моркун В.С. Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами / В.С. Моркун, А.А. Цокурено, И.А. Луценко. – Кривий Ріг: Минерал, 2005. – 261 с.
3. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт.техн.наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / О.В. Поркуян. – Кривий Ріг, 2009. – 36 с.

4. **Моркун Н.В.** Розподілене оптимальне керування взаємопов'язаними процесами збагачувального виробництва на основі динамічної просторово-часової моделі: дис. ... доктора техн.наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / **Моркун Наталія Володимирівна**. – Кривий Ріг, 2017. – 357 с.
5. Измельчение. Энергетика и технология / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. – 296 с.
6. **Линч А. Дж.** Циклы дробления и измельчения / **Линч А. Дж.**: [пер. с англ.]. – М.: Недра, 1981. – 342с.
7. 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. – 512 с.
8. **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.
9. **Купін А.І.** Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / **Купін А.І.** – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204с.
10. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / [Моркун В.С., Потапов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С.]. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
11. **Андреев С.Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / **С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов**. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
12. **Баатархуд Ж.** Об одном из путей интенсификации процесса измельчения в шаровых мельницах МШЦ-5500х6500 на комбинате «ЭРДЭНЭТ» / **Ж. Баатархуд, Г. Даваацэрэн, Л.Ф. Биленко** // Обогащение руд. – 2000. – №3. – С. 3-5.
13. **Гольшев Л.В.** Метод формирования шаровой загрузки барабанной мельницы / **Л.В. Гольшев, Т.Ю. Кравец** // Энергетик. – 2014. – №11. – С. 54-55.
14. **Qingfei X.** Optimization study to the ratio of primeval ball loading in $\phi 4.0 \times 6.0$ m overflow ball mill of Yingshuang Gold Mine / **Qingfei X., Huaibin K., Bo L., Chunmei L.** // AASRJ Procedia. – 2014. – №7. – pp. 14-19.
15. **Яценко А.А.** О повышении эффективности работы шаровых мельниц на основе использования комбинированной мелющей загрузки / **Яценко А.А.** // Обогащение руд. – 2011. – №3. – С.3-5.
16. **Крюков Д.К.** Футеровки шаровых мельниц / **Крюков Д.К.** – М.: Машиностроение, 1965. – 183 с.
17. **Мацуї А.М.** Моделювання середньозваженої крупності твердого в завантаженні кульового млина рудою і пісками класифікатора / **А.М. Мацуї, В.О. Кондратець** // Математичне моделювання. – 2017. – №1 (36). – С. 59-66.

Рукопис подано до редакції 04.04.2018

УДК 622.831

О.В. СОЛОДЯНКІН, д-р техн. наук, проф., І.В. ДУДКА, канд. техн. наук,
О.Є. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук, доц., О.А. СОЛОДЯНКІНА, наук. співробітник,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ВДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ У ВИРОБКАХ З МЕТАЛЕВИМ АРОЧНИМ КРІПЛЕННЯМ

Мета. Метою роботи є вдосконалення традиційної методики проведення натурних вимірювань в шахтних умовах, що дозволяє зменшити трудомісткість операцій, підвищує безпеку виконання робіт та точність визначення поточних геометричних параметрів металевих арочних кріплень.

Методи. Розглянуті методики шахтних досліджень, що використовують для комплексної оцінки стану гірничої виробки, приконтурного масиву порід, деформацій металевих рамних кріплень та напрямки їх вдосконалення. Для визначення переваг методик та приладів, що застосовують при проведенні шахтних досліджень, використані методи узагальнення, аналізу та оцінки їх організаційних та технологічних показників.

Наукова новизна. Запропонована спрощена методика визначення площі поперечного перерізу виробки для дослідження закономірностей зміни її величини у часі або за довжиною виробки під впливом зовнішніх навантажень.

Практична значимість. Запропонований комплекс обладнання, новий пристрій та технологія проведення вимірів у виробці дозволяють підвищити безпеку виконання робіт, збільшують точність вимірювань, істотно зменшують їх трудомісткість, дають можливість виконання вимірів однією людиною. Аналіз отриманих результатів дозволяє об'єктивно оцінити поточний стан металевих кріплень виробки, оперативно визначити причини та ступінь її деформації, обґрунтувати раціональні способи підвищення стійкості виробок, закріплених металевим або рамно-анкерним кріпленням.

Результати. Розроблений пристрій для виміру геометричних параметрів внутрішнього контуру виробки та удосконалена методика проведення інструментальних вимірювань для виробок з металевим арочним кріпленням. Запропонована спрощена методика визначення поточного поперечного перерізу виробки з металевим арочним кріпленням. Виконана оцінка методів проведення шахтних інструментальних досліджень за різними параметрами. Визначені їх недоліки і переваги. Наведені результати шахтних випробувань запропонованого пристрою та методики проведення натурних досліджень. За результатами комплексу виконаних робіт отриманий патент на корисну модель,