

В.О. Кондратець, проф., канд. техн. наук, О.М. Рева, проф., д-р техн. наук, М.О. Карчевська, асп.

Кіровоградський національний технічний університет

Теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в млинах

У статті приведені результати теоретичних досліджень усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки у млинах. Встановлені оптимальні умови роботи млина та ідентифікації його завантаження рудою

кульовий млин, кульове навантаження, футеровка, ідентифікація завантаження рудою

Для подрібнення сипких матеріалів у неперервному режимі на рудозбагачувальних фабриках використовують кульові млини. Особливо в напруженому режимі вони працюють у першій стадії подрібнення. У даних технологічних агрегатах найбільш важливими технологічними параметрами є завантаження рудою та розрідження пульпи. Перезавантаження кульового млина рудою приводить його у аварійний стан, тому дані технологічні агрегати в основному працюють у недозавантаженому режимі. При цьому знижується продуктивність по готовому продукту та перевитрачаються електрична енергія, футеровка і кулі, що не відповідає здійсненню напряму реалізації ресурсозберігаючих технологій в промисловості, який передбачає законодавство України. Ці ж задачі вирішуються і в процесі виконання науково-дослідної роботи «Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням» (державний реєстраційний номер 0105U008334). В роботі [1] показано, що в конкретних умовах максимальний вихід готового продукту, а при цьому і мінімальні витрати електричної енергії, футеровки і мелючих засобів, можливо отримати лише при певному завантаженні кульового млина та певному співвідношенні руда/вода. Оскільки задача ідентифікації завантаження кульового млина рудою не розв'язана, тема статті є актуальною.

Даному науковому напрямку присвячено чимало робіт як зарубіжних, так і вітчизняних вчених. В Україні такі дослідження виконували С.А. Волотковський, В.А. Бунько, О.М. Марюта, Ю.Г. Гончаров, А.С. Давидкович, Б.Є. Гейзенблазен, Г.В. Гуленко та ін. З розроблених засобів ідентифікації завантаження кульового млина рудою розповсюдження отримав один, що реалізує звукометричний підхід вимірювання. Як показав проведений аналіз, не дивлячись на значні удосконалення, які вносилися в цей засіб, звукометричний метод не забезпечує необхідної точності ідентифікації технологічного параметра [2]. На даний чи інші підходи ідентифікації завантаження кульового млина рудою сильний вплив здійснює стан кульового навантаження та футеровки, однак системно дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в технологічному агрегаті ніхто не здійснював.

Метою даної роботи є системне теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в млинах, що подрібнюють вихідний продукт збагачувальних фабрик.

В процесі подрібнення руди кульовими млинами зношуються як кулі, так і футеровка. Зношену футеровку замінюють через 6...8 місяців експлуатації млина, оскільки її витрата при використанні сталених плит складає 0,3...0,6 кг/т руди [3]. В умовах

Криворізького басейну на НКГЗК по звичайній схемі збагачення цей показник склав 0,093, а по глибокій схемі – 0,122. На ПГЗК ці показники відповідно були 0,113 і 0,27 [4]. Під час заміни футеровки млин комплектується і новим кульовим навантаженням. Враховуючи, що кулі зношуються більш інтенсивно, в межах 0,75...1,25 кг/т для вуглецевої сталі (для НКГЗК відповідно 0,95 і 1,48, для ПГЗК – 2,01 і 1,88 [4]), і їх розмір порівняно незначний, молольні тіла додають у млин в процесі роботи.

Показник величини витрати куль з певного матеріалу на тону подрібненої руди не відрізняється стійкістю, оскільки він зв'язаний з продуктивністю млина, яка залежить від властивостей руди. Властивості ж руди змінюються в значних межах. Наприклад, магнетитові кварцити Криворізького басейну характеризуються коефіцієнтом міцності 12...20 [5]. В якості більш стійкого показника можна використати витрату куль, віднесену до одиниці енергії, яка витрачена на подрібнення [6]. Практично встановлено, що знос куль пропорційний витраті корисної енергії, споживаної кульовим млином. По виробничим даним встановлено, що середня витрата сталених куль складає 0,091 кг на 1 кВт·г корисної енергії [7].

Подрібнення молольних тіл залежить від багатьох факторів – матеріалу, способу виготовлення, розмірів, маси куль, діаметра та швидкості обертання барабана, характеристики подрібнюваного матеріалу, типу футеровки, густини пульпи та ін. При водопадному режимі роботи млина руда в основному руйнується ударом. Закономірність зносу металів відрізняється від закономірності руйнування руди. Металева куля є твердим в'язким тілом і в умовах млина працює з напругами, які значно нижчі тих, що можуть його зруйнувати. Однак в зоні контакту при ударі в залежності від його сили виникають відносно великі місцеві напруги, які можуть викликати значні фізичні зміни структури металу. При цьому в залежності від властивостей матеріалу може покращуватись або погіршуватись стійкість кулі до зносу. В таких умовах роботи втрата металу в основному відбувається за рахунок стирання поверхні кулі, що проявляється у зменшенні її діаметра.

Закономірності зносу куль у млинах досліджував ряд авторів. Існує кілька гіпотез відносно закономірності зносу куль у кульових млинах, зокрема, гіпотези Девіса, Мертсея, Прентіса і Бонда. Всі гіпотези узагальнив К.О. Разумов [7]. Він запропонував швидкість зносу куль визначати рівнянням

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

де G – маса кулі в момент початку зносу, кг;

k – коефіцієнт пропорціональності;

t – тривалість зносу;

D_M - початковий діаметр кулі, см;

m – величина, що змінюється в залежності від режиму роботи млина в межах 2...3.

Значення $m = 2$ відповідає зносу пропорціонально поверхні (при чисто каскадних режимах роботи). Значення $m = 3$ відповідає зносу пропорціонально масі при водопадному режимі роботи млина. Змішаним режимам роботи кульового млина відповідає значення показника степені, що знаходиться в проміжку між 2 і 3.

Розв'язок і аналіз рівняння (1) показує, якщо млин спочатку був завантажений кулями одного діаметра і в процесі роботи довантажувався молольними тілами того ж розміру, то через певний час, коли початкове подрібнююче навантаження зноситься, в технологічному агрегаті створиться суміш куль різних діаметрів, склад яких визначається закономірністю їх зносу [8]. При цьому склад суміші молольних тіл зберігається постійним весь час роботи агрегату, тобто, в млині створюється усталене кульове навантаження, в якому переважають крупні кулі. Така характеристика

кульового навантаження не забезпечує оптимальних показників по продуктивності і ефективності в наслідок невивантаження дрібних і середніх молольних тіл, які на одиницю об'єму забезпечують більшу поверхню [8].

Відповідно узагальненій гіпотезі щодо швидкості зносу куль у кульовому млині можливо для характеристики кульового навантаження по плюс D записати рівняння [7]

$$Z = 100 \left[1 - \left(\frac{D}{D_m} \right)^n \right] = 100 \frac{D_m^n - D^n}{D_m^n}, \quad (2)$$

де Z – вихід куль певного розміру;

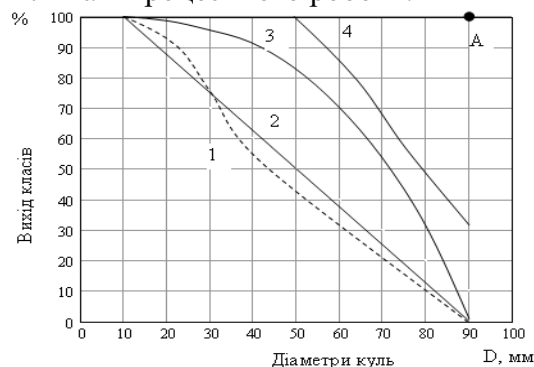
D_m - максимальний діаметр кулі;

D – діаметр кулі, що розглядається.

В залежності (2) $D < D_m$, $n=6-m$ [7]. Вона дозволяє будувати характеристики крупності молольного середовища після зносу початкового навантаження млина.

Ефективна робота кульового млина вимагає, щоб кульове навантаження містило в достатній кількості не лише крупні кулі для подрібнення крупних шматків руди, але і молольні тіла середнього розміру і навіть дрібні для стирання дрібних зерен. Для кожної крупності матеріалу, що має певну подрібнюваність, можливо підібрати характеристику крупності кульової суміші, яка забезпечує найбільш високу продуктивність млина. Характеристики крупності кульового навантаження, що забезпечує найбільшу продуктивність, підбирають дослідним шляхом. Однак накопичені і певні конкретні рекомендації щодо забезпечення таких кульових навантажень. Наприклад, для млина, що видає продукт крупності 0,2...0,3 мм, початкове значення кульового навантаження при подрібненні твердої руди крупністю 13 мм повинно містити по вазі 32 % куль діаметром 90 мм, 27 % - 75 мм, 23% - 65 мм, 18 % - 50 мм [7].

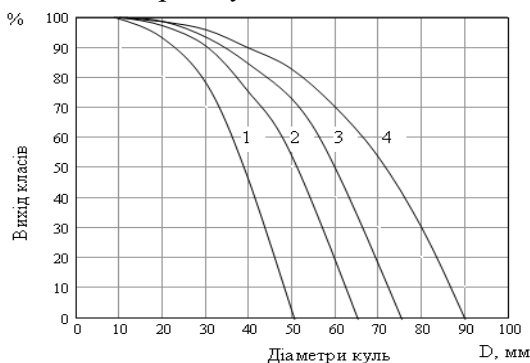
Для підтримання в кульовому навантаженні необхідного співвідношення між крупними, середніми та дрібними кулями застосовують раціональне довантаження, під яким розуміють подачу у млин порції молольних тіл різних розмірів. Розроблені графо-аналітичні методи [7] дозволяють визначати склад куль у порції довантаження. Звичайно така порція куль з визначеним складом за розмірами подається у технологічний агрегат один раз на добу, що не зовсім відповідає умовам побудови характеристик крупності кульового навантаження, збурює технологічний агрегат та змінює умови застосування методів визначення завантаження млина рудою. В зв'язку з цим необхідно дослідити можливість іншого підходу забезпечення бажаного складу кульового навантаження млина в процесі його роботи.



1 – сумарна при раціональному довантаженні куль; 2 – ідеалізована сумарна; 3 – усталена при початковому завантаженні кулями максимального розміру; 4 – початкового завантаження куль, що забезпечує максимальну продуктивність

Рисунок 1 - Характеристики крупності кульового навантаження млина

Характеристика крупності кульового навантаження млина, яка визначає найбільшу продуктивність в заданих умовах роботи, забезпечується сталевими кулями у ваговому складі: 90 мм – 32 %, 75 мм – 27 %, 65 мм – 23 %, 50 мм – 18 %. Вона побудована на рис. 1 (крива 4). Оскільки вона є опуклою, її доцільно порівняти з такою ж за видом характеристикою, що відповідає першопочатковому однорозмірному навантаженню і довантаженню однорозмірними кулями максимального діаметра при рівномірній їх подачі в агрегат. Якщо брати початкове завантаження кулями діаметром 90 мм, то його характеристика крупності буде представлена на рис. 1 точкою А. Такий режим роботи кульового млина нестійкий, оскільки при подрібненні руди кулі будуть зменшуватись у розмірі, а на заміну зношеній масі довантажуватися робочі тіла максимального розміру 90 мм. При зносі перших завантажених куль характеристика крупності кульового навантаження млина буде визначатися залежністю (2). Відповідно даній залежності на рис. 1 побудована крива 3. Вона також є опуклою і достатньо добре наближається до кривої 4. Однак крива 3 відповідає усталеному режиму роботи куль максимального діаметра при рівномірному їх дозавантаженні, а крива 4 характеризує лише початковий стан кульового навантаження млина, яке забезпечує найкращу продуктивність. В процесі роботи кулі будуть зношуватися і крива 4 змінить своє положення, зокрема, з'єднавшись з точкою, що відповідає 100 % на осі ординат і точкою, яка належить максимальному значенню розміру кулі 90 мм на осі абсцис. Тобто, на практиці при зносі куль і раціональному довантаженні робочими тілами млина характеристика 4 повинна наближатися до кривої 3. Однак крива 3 не відповідає найкращому поєднанню куль різних розмірів у навантаженні млина, оскільки в ньому переважають робочі тіла більш крупного розміру. Тому зміщення характеристики 4 при досягненні усталеного режиму роботи кульового навантаження повинно продовжуватись. Його границею буде сумарна характеристика крупності кульового навантаження при раціональному довантаженні молоткових тіл [7]. Її можливо подати у вигляді згладженої S-подібної кривої 1, яка розташована навколо ідеалізованої сумарної характеристики 2 (рис. 1). Отже, в усталеному режимі роботи кульового навантаження необхідно орієнтуватися не на характеристику 4, а на криву 1 (рис. 1). Необхідно знайти підхід формування усталеного кульового навантаження млина, яке б забезпечувало найкращу продуктивність в заданих умовах і не слугувало збурюючим фактором при роботі технологічного агрегату.



1 – при початковому розмірі 50 мм; 2 – 65 мм; 3 – 75 мм; 4 – 90 мм

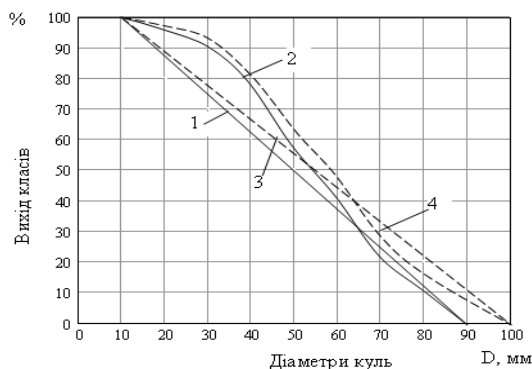
Рисунок 2 – Характеристики крупності усталеного кульового навантаження млина

Розглянемо кульове навантаження млина, що забезпечує найбільшу продуктивність. В процесі роботи технологічного агрегату всі типи молоткових тіл будуть зношуватися. Через певний проміжок часу, коли всі початкові кулі зносяться, встановиться незмінне за складом кульове навантаження. Воно буде певним в межах кожного типу куль при рівномірній їх подачі в процесі зносу. Таке кульове навантаження буде визначатися характеристиками крупності, поданими на рис. 2, які

визначаються за залежністю (2). Оскільки всі характеристики крупності усталеного навантаження опуклі, в ньому переважають крупні молольні тіла в кожному їх типі. Криві, зображені на рис. 2, дозволяють отримати сумарну характеристику крупності, яка характеризує все кульове навантаження млина в усталеному режимі, коли початкові молольні тіла повністю зносяться.

Дослідимо отримання усталеного кульового навантаження на прикладі млина МШР-40-50, який має робочий об'єм 56 м^3 [10]. При 50% заповненні млина об'єм, зайнятий молольним середовищем, складе 28 м^3 , а безпосередньо кулями при їх різних розмірах – $0,62$ загального простору, тобто, $17,36 \text{ м}^3$. Об'ємна вага сталевих куль у даному випадку буде $4,8 \text{ т/м}^3$, а маса кульового навантаження у млині складе $134,4 \text{ т}$. Ця маса куль в усталеному складі розподілиться відповідно їх початковому завантаженню. Тоді кулі, що відповідають максимальному розміру 90 мм , будуть мати масу 43 т , які відповідають діаметру 75 мм , - $36,29 \text{ т}$, діаметру 65 мм – $30,91 \text{ т}$, діаметру 50 мм – $24,20 \text{ т}$.

Характеристики крупності усталеного кульового навантаження млина (рис. 2) дозволяють визначити відносний склад куль за розміром у процентах, що відповідає кожному типу молольних тіл. Дані цих розрахунків зведено до табл. 1, де також наведено масовий склад куль за розміром у навантаженні, що відповідає кожному типу молольних тіл. По цим даним знайдено відносний склад куль за розміром у сумарному навантаженні, який дозволяє отримати сумарну характеристику крупності усталеного кульового навантаження млина.



- 1 – ідеалізована при максимальному діаметрі кулі 90 мм ; 2 – сумарна, що відповідає завантаженню, яке забезпечує найкращу продуктивність; 3 – ідеалізована при максимальному діаметрі кулі 100 мм ;
4 – сумарна, що відповідає більш крупному складу молольного середовища

Рисунок 3 - Характеристики крупності кульового навантаження млина при змішаному розмірі молольних тіл

Сумарна характеристика крупності куль в усталеному навантаженні млина, побудована за даними табл. 1, приведена на рис. 3 (крива 2). Для порівняння тут же наведена ідеалізована характеристика 1 крупності молольних тіл. Як видно характеристика 2 має S-подібну форму і розташовується відносно ідеалізованої характеристики 1. Порівняння характеристики 2 (рис. 3) і характеристики 1 (рис. 1) показує, що вони достатньо ідентичні. Отже, раціональне довантаження молольних тіл у кульовий млин, що здійснюється заданою сумішшю куль один раз на добу, можливо замінити їх поштучною подачею відповідно зносу кожного типу робочих елементів.

Прямолінійна характеристика 1, зображена на рис. 3, характеризує рівномірну крупність молольних тіл у складі навантаження млина [3]. Опукла ділянка кривої 2 вказує на те, що в розмірі куль від 10 до 60 мм переважають крупні класи. Вігнута ділянка кривої 2 засвідчує переважання в кульовому навантаженні $65 \dots 90 \text{ мм}$ більш

дрібних тіл. Розглянемо структуру усталеного кульового навантаження млина при більш крупному складі початкового молольного середовища порівняно з попереднім.

Прийmemo максимальний діаметр куль 100 мм. Нехай по вазі кулі діаметром 100 мм складають 32 %, діаметром 75 мм – 35%, 65 мм – 18 %, 50 мм – 15 %. Тоді у ваговому відношенні загальна маса куль 134,4 т розподілиться таким чином: кулі 100 мм – 43 т, 75 мм – 47,048 т, 65 мм – 24,192 т, 50 мм – 20,16 т. Відносний склад кожного типу куль у відсотках у навантаженні млина в усталеному режимі роботи молольного середовища, розраховані за залежністю (2), наведено в табл. 2. В цій же таблиці приведені дані визначення маси куль за розміром у кожному типі молольного середовища, а також масовий і процентний вміст кожного класу крупності тіл у навантаженні млина. Характеристика крупності кульового навантаження, побудована по даним розрахунків, наведена на рис. 3 (крива 4). Тут же нанесена ідеалізована характеристика 3 при максимальному розмірі кулі 100 мм. З рисунка видно, що у даному випадку S-подібна характеристика стає більш рівномірною. На діапазоні зміни діаметра куль 10...60 мм переважають більш крупні молольні тіла, а – 60...100 мм – більш дрібні. Такий склад молольного середовища може виявитися більш ефективним для певних умов подрібнення руди. Таким чином, змінюючи первинний склад молольного середовища, можна впливати на його характеристику крупності в усталеному режимі, підбираючи найкращу ефективність роботи млина. Усталене значення крупності кульового навантаження в процесі роботи млина змінюватися не буде.

Таблиця 1 - Відносний і масовий склад куль в усталеному навантаженні млина при раціональному складі молольного середовища

Діаметри куль, мм	Відносний склад куль (%) у навантаженні, що відповідає розмірам, мм				Масовий склад куль (т) у навантаженні, що відповідає розмірам, мм				Масовий склад куль у навантаженні, т	Відносний склад куль у навантаженні, %
	90	75	65	50	90	75	65	50		
10	1,0	1,7	2,5	5,6	0,430	0,61693	0,77275	1,3552	3,17488	2,36
20	2,6	4,5	6,9	15,3	1,118	1,63305	2,13279	3,7026	8,58644	6,39
30	5,1	8,8	13,5	29,9	2,193	3,19352	4,17285	7,2358	16,79517	12,50
40	8,4	14,4	22,3	49,2	3,612	5,22576	6,89293	11,9064	27,63709	20,56
50	12,4	21,6	33,3	-	5,332	7,83864	10,29303	-	23,46367	17,46
60	17,4	30,2	21,5	-	7,482	10,95958	6,64565	-	25,08723	18,67
70	23,2	18,8	-	-	10,019	6,82252	-	-	16,84152	12,53
80	29,8	-	-	-	12,814	-	-	-	12,814	9,53
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сума	100	100	100	100	43,0	36,29	30,91	24,2	134,4	100

Таблиця 2 - Відносний і масовий склад куль в усталеному навантаженні млина при більш крупному складі молольного середовища порівняно з раціональним

Діаметри куль, мм	Відносний склад куль (%) у навантаженні, що відповідає розмірам, мм				Масовий склад куль (т) у навантаженні, що відповідає розмірам, мм				Масовий склад куль у навантаженні, т	Відносний склад куль у навантаженні, %
	100	75	65	50	100	75	65	50		
10	0,7	1,7	2,5	5,6	0,301	0,799816	0,6048	1,12896	2,834576	2,11
20	1,9	4,5	6,9	15,3	0,817	2,11716	1,669248	3,08448	7,687888	5,72
30	3,7	8,8	13,5	29,9	1,591	4,140224	3,26592	6,02784	15,024984	11,18
40	6,1	14,4	22,3	49,2	2,623	6,774912	5,394816	9,91872	24,711448	18,39
50	9,1	21,6	33,3	-	3,913	10,162368	8,055936	-	22,131304	16,47
60	12,7	30,2	21,5	-	5,461	14,208496	5,20128	-	24,870776	18,50
70	16,9	18,8	-	-	7,267	8,845024	-	-	16,112024	11,99

Продовження таблиці 2

80	21,7	-	-	-	9,331	-	-	-	9,331	6,94
90	27,2	-	-	-	11,696	-	-	-	11,696	8,70
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сума	100	100	100	100	43,0	47,12	24,192	20,16	134,4	100,0

Вміст кульового млина біля завантажувального кінця знаходиться на більш високій відмітці порівняно з розвантажувальним. Це приводить до скоочування по укусу молольних тіл. При цьому дрібні кулі легко провалюються між більш крупними і далеко не скоочуються. Чим крупніші кулі, тим далі вони відкоочуються. Відбувається повздовжня сегрегація молольних тіл. В результаті сегрегації більш крупні кулі зосереджуються біля розвантажувального кінця, що зменшує ефективність їх роботи та повинно враховуватися при ідентифікації завантаження рудою. З огляду на це найкращі умови ідентифікації завантаження млина рудою будуть на певному віддаленні від завантажувальної горловини – деś приближаючись до середньої частини довжини барабана. Тут і крупність частинок руди буде осереднена і мати середній розмір та буде певне середнє значення розміру молольних тіл.

Рахуючи повздовжню сегрегацію молольних тіл ідеальною, можливо визначити їх розташування по довжині барабана. Довжина барабана млина МШР- 40 - 50 складає 5 м [10]. При загальному кульовому навантаженні 134,4 т питоме навантаження складе 26,88 т/м або 0,2688 т/см. Воно дозволяє визначити зони молольного середовища кульового млина за крупністю з залученням визначених мас куль різної крупності. Дані розрахунків приведені в табл. 3.

Таблиця 3 - Характеристика зон розподілу молольного середовища кульового млина за крупністю

Діаметр куль, мм	10	20	30	40	50	60	70	80
Маса куль, т	3,18	8,59	16,80	27,64	23,46	25,09	16,84	12,81
Довжина барабана, яку займають кулі даного розміру, см	11,81	31,94	62,48	102,82	87,29	93,33	62,65	47,67
Половина діапазону, зайнятого кулями одного розміру, см	5,90	15,97	31,24	51,41	43,64	46,67	31,32	23,84
Відстань від завантажувального кінця до середини діапазону, см	5,90	27,78	74,99	157,69	252,69	343,01	420,99	476,16

З даних таблиці видно, що у кульовому млині по довжині барабана створюються зони молольного середовища з наближено однаковою крупністю куль. Найбільш широкі зони відповідають кулям з діаметром 40 мм, 50 мм, 60 мм. Ці зони наближено мають однакову довжину, в них крупність куль знаходиться в межах 35...45 мм, 45 мм...55 мм, 55 мм...65 мм. Дані зони розташовані в середній частині барабана млина. Даний висновок підтверджується експериментально на діючих млинах, оскільки звукометричний сигнал в залежності від місця установки приймального пристрою суттєво змінює свої характеристики. Це можна пояснити лише тим, що в конкретній зоні по довжині барабана млина мають місце різні за розміром кулі і певний за крупністю склад руди.

Отриманий усталений склад кульового навантаження, при якому забезпечується найкраща продуктивність, не може підтримуватися сам по собі. Якщо завантажити початковий набір куль чотирьох розмірів, то оптимальний склад кульового навантаження створиться лише через певний час, коли перші кулі будуть повністю зношені. Тобто, буде відбуватися перехідний процес в системі формування кульового навантаження млина. Після його завершення, якщо виконувати умови подачі

додаткових куль, усталене середовище кульового навантаження змінюватися не буде, тобто, наступить усталений режим роботи.

Розрахунки тривалості зносу куль до діаметра 10 мм показують, що усталене за розмірами кульове навантаження в млині встановлюється через 1220,5 год. Враховуючи, що кульові млини на збагачувальних фабриках працюють неперервно, усталений режим кульового навантаження за складом молольних тіл встановиться через 1,695 місяці неперервної роботи. Такий тривалий термін перехідного процесу робить неефективними як роботу самого кульового млина (кульове навантаження не оптимальне за складом), так і процес ідентифікації його завантаження рудою при початковому наборі молольних тіл, які забезпечують його найкращу продуктивність. Тому набагато доцільніше початкове завантаження здійснювати відповідно усталеній структурі молольних тіл, склад якої відповідає характеристиці крупності, зображеній на рис. 3 (крива 2). Доцільність такого завантаження млинів молольними тілами пояснюється ще й тим, що перехідний процес триває 1,695 місяці, наступаючий після нього усталений режим – 4,3...6,3 місяці, оскільки середня тривалість експлуатації сталльної футеровки складає 6...8 місяців [7].

При початковому завантаженні млина кулями відповідно характеристиці 2 (рис. 3) відразу розпочинається усталений режим роботи, який забезпечує найкращу продуктивність технологічного агрегату по готовому продукту. Для підтримки такого режиму необхідно в млин додавати кулі діаметром 90 мм, 75 мм, 65 мм і 50 мм, компенсуючи їх знос. Однак при цьому необхідно обґрунтовувати підхід до завантаження млина кулями вихідних розмірів.

На багатьох збагачувальних фабриках кулі додають у млин один раз на добу [9]. Параметри в технологічних процесах у кульових млинах необхідно підтримувати з похибкою, яка не перевищує $\pm 3,0$ % [10]. Якщо кулі виготовлені з чавуну, то при середньому подрібненні до 0,15 мм знос куль складає 1,25 кг на тону руди. При продуктивності млина 180 т/год добова норма довантаження куль складає 4,22 %, що не відповідає вимогам, які пред'явлені до технологічного процесу. Крім того, це питання недостатньо вивчалось. Відсутність близько 4...5 % куль не може не знизити продуктивність млина на певну величину. Отже, кулі необхідно додавати не один раз на добу, а більш частіше, наприклад, наближено через одну годину роботи або подрібнення певного об'єму матеріалу.

Таблиця 4 - Дані дозавантаження млина кулями при переробці певного об'єму руди (160 т)

Діаметр куль, мм	90	75	65	50
Маса кулі, кг	2,9758	1,7221	1,121	0,5102
Маса всіх куль різних розмірів у завантаженні (134,4 т), т	43,00	36,29	30,91	24,20
Частка подрібненої руди відповідними кулями, т	51,17	43,19	36,78	28,86
Знос куль відповідного розміру при переробці 160 т руди і витраті куль 1 кг/т, кг	51,17	43,19	36,78	28,86
Еквівалентність зносу куль тілам вихідного розміру	17,20	25,08	32,81	56,57
Кількість куль вихідного розміру, яку необхідно додати після переробки 160 т руди, шт.	17	25	33	57

Рахуючи, що ефективність роботи куль різних розмірів наближено однакова, в табл. 4 наведені дані розрахунків складу порції куль, яку треба додати після

подрібнення 160 т руди при витраті 1 кг молольних тіл на тону руди і завантаженні у млин 134,4 т сталюого молольного середовища, що відповідає найкращій продуктивності подрібнення руди. З даних табл. 4 видно, що достатньо легко можна здійснити дозавантаження млина кулями, вивчивши умови переробки різних типів руд в млинах з певними кульовими середовищами. Наприклад, для умов, розглянутих в табл. 4, після переробки 160 т руди (наближено за годину) у млин треба завантажити 17 куль діаметром 90 мм, 25 – діаметром 75 мм, 33 – 65 мм, 57 – 50 мм. Це можна здійснити чотириканальними дозаторами, діючими за принципами, наприклад, викладеними в [12].

Утримання усталеного складу куль на заданому рівні дозволяє здійснити обґрунтування місця формування і знімання сигналу про завантаження млина рудою. Як вже відмічалось, такими зонами можуть бути перерізи барабана кульового млина, де розташовані кулі діаметром 40 мм, 50 мм і 60 мм. Зона, що відповідає середині довжини барабана відповідає середньому діаметру куль 50 мм. Тобто, стосовно діаметра куль переріз контролю повинен відповідати середньому значенню довжини барабана млина. Однак на вибір місця контролю параметра впливають ряд факторів.

Встановлено [7], що ефективність подрібнення матеріалу змінюється в залежності від вмісту крупного класу в подрібнюваному матеріалі в різних поперечних перерізах млина. Вміст крупного класу біля завантажувального кінця найбільш високий і тому ефективність подрібнення тут найбільш висока. В процесі переміщення матеріалу до розвантажувального кінця він поступово подрібнюється, вміст крупного класу в ньому неперервно зменшується і ефективність роботи куль падає. Біля розвантажувального кінця вміст крупного класу в подрібнюваному матеріалі буде найменшим, а умови роботи куль - найгіршими. Отже, умови ідентифікації завантаження млина рудою будуть різними в кожному поперечному перерізі млина по довжині барабана з віддаленням від завантажувальної горловини, крім того, буде зростати час запізнювання. З огляду на стан подрібнюваного матеріалу, склад куль, ширину зон їх розташування і запізнювання контролювати процес завантаження необхідно в межах $1/3 \dots 1/2$ довжини барабана кульового млина від завантажувальної горловини.

В процесі ремонту кульових млинів під футеровочні плити підкладають листи резини, прорезиненої тканини, прокладки з сухого дерева, пластики та інше. В наслідок неточностей при відливці проміжки між футерувальними плитами при складанні можуть доходити до 20 мм. Найбільш крупні проміжки при установці плит необхідно ретельно заповнювати сумішшю смоли з піском або забивати сухими клинами з дерева [7]. Отже, ремонт млина з заміною футеровки буде зв'язаний зі зміною умов передачі механічних і звукових діянь в наслідок неідентичності стану переходу футеровка – зовнішня поверхня барабана. Крім того, в кульових млинах використовують різні типи футеровки – з чавуну, марганцевої сталі, хромистої сталі, резини. Заміна типу футеровки та її знос також приводить до зміни умов передачі сигналу, який через неї проходить.

Після пуску нового кульового млина або після заміни старої футеровки відбувається швидке ослаблення її кріплення, що супроводжується появою течії через болтові отвори, коливаннями футерувальних плит. При цьому періодично підтягують болти через проміжки часу, які поступово збільшуються після пуску млина. Тому можна стверджувати, що в початковий достатньо тривалий період припрацювання млина весь час змінюються умови передачі сигналу по ланцюгу футеровка – прокладки – стінка барабана млина. Таким чином, з викладеного видно, що конструктивний вузол футеровка – стінка барабана виступає як достатньо сильний збурюючий фактор в передачі сигналу завантаження млина.

В якості футерувальних прокладок для кришок люків барабана кульового млина використовують ті ж матеріали, що і для барабана. Кришки люків на барабанах кульових млинів встановлюють на $1/3$ або $1/2$ їх довжини від завантажувального кінця [8], що відповідає зоні дії куль з середнім діаметром 40 мм або 50 мм. Кришку люка барабана кульового млина можливо футерувати весь час одним і тим же матеріалом, забезпечуючи одні і ті ж умови виконання даного вузла. Тоді сигнал про завантаження кульового млина на даній ділянці буде передаватися без перешкод і буде формуватися при практично незмінному діаметрі куль. Отже, найкращими умовами для ідентифікації завантаження кульового млина слід рахувати переріз барабана, де встановлена кришка люка.

Отже, кульові млини працюють в умовах неперервної зміни стану куль і футерівки, однак можна створити умови автоматичної стабілізації усталеного режиму найкращого кульового навантаження як за об'ємом, так і за складом. В межах $1/3 \dots 1/2$ довжини барабана від завантаження утворюються широкі зони з практично незмінним розміром куль і осередненим розміром шматків руди. Найкращим місцем для ідентифікації завантаження млина рудою є кришка його люка.

На підставі проведених досліджень відкривається перспектива удосконалення існуючих і розробки нових підходів ідентифікації завантаження кульових млинів рудою.

Список літератури

1. Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Чинаев П.И. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем. – М.: Машиностроение, 1967. – 292 с.
2. Кондратець В.О., Карчевська М.О. Аналіз характеристик звукометричних перетворювачів завантаження кульових млинів рудою // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету (Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація). – Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – с. 95-99.
3. Скоров В.А. Обогащение руд. – М.: Недра, 1969. – 276 с.
4. Остапенко П.Е., Карпов И.И. Глубокое обогащение железистых кварцитов. – Днепропетровск: Промінь, 1965. – 26 с.
5. Кармазин В.И., Денисенко А.И., Султанович Е.А., Шинкоренко С.Ф. и др. Повышение качества железорудных концентратов. - Днепропетровск: Промінь, 1969. – 84 с.
6. De Vaney F.D. and Coghill W.H. The Relation of Ball Wear to Power in grinding // Mining Eng. Journal. – 1937. –vol. 138. –р. 337 – 340
7. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
8. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. – М.: Машиностроение, 1965. – 183 с.
9. Производство концентрата на обогатительной фабрике ОАО «Полтавский ГОК» Технологическая инструкция ТИ-3-01-05. – Комсомольск на Днестре: ПГОК, 2005. – 63 с.
10. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1970. – 592 с.
11. Гончаров Ю.Г., Давидкович А.С., Гейзенблазен Б.Е., Гуленко Г.В. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1968. – 227 с.
12. Кондратець В.О. Системи керування технологічними та виробничими процесами і проектуванням. – К.: Вища школа, 1993. – 256 с. – (Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин: у 2 ч.; ч. II).

В статті приведені результати теоретических досліджень установившихся и переходных режимов работы шаров и футеровки в мельницах. Установлены оптимальные условия работы мельницы и идентификации ее загрузки рудой.

In the article the results of theoretical researches of the set and transitional modes of operations of balls and lining-up are resulted in mills. The optimum terms of work of mill and authentication of its load ore are set.