

УДК 001.57:681.5.015

А.М. МАЦУЙ, В.О. КОНДРАТЕЦЬ

Центральнокраїнський національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗКІВ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ З ПАРАМЕТРАМИ КОНЦЕНТРАЦІЇ КРУПНИХ ФРАКЦІЙ РУДИ

Результати математичного моделювання зв'язків показників процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди зводяться до наступного. В умовах незмінності маси падаючої кулі, швидкості падіння та жорсткості пружного елемента можливо визначити об'єм шматків руди певного типу подрібнюваності. Знайдені умови ефективного подрібнення твердого (руди) кулею та забезпечення точності контролю енергоефективності руйнування руди в кульовому млині. Чутливість вимірювання достатня практично в будь-якій точці вздовж барабана. Прогин пружного елемента в межах ефективного руйнування не залежить від розміру шматків руди, а визначається сумарним об'ємом матеріалу. Контроль енергетичної ефективності подрібнення руди краще здійснювати при переробці одного технологічного її різновиду, однак це можливо і у випадку змішаних типів руд.

Ключові слова: математичне моделювання, енергоефективне подрібнення, кульові млини, пружний елемент, точність контролю.

А.Н. МАЦУЙ, В.А. КОНДРАТЕЦЬ

Центральнокраїнський національний технічний університет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ПАРАМЕТРАМИ КОНЦЕНТРАЦИИ КРУПНЫХ ФРАКЦИЙ РУДЫ

Результаты математического моделирования связей показателей процесса измельчения с параметрами концентрации крупных фракций руды сводятся к следующему. В условиях неизменности массы падающего шара, скорости падения и жесткости упругого элемента возможно определять объем кусков руды определенного типа измельчаемости. Найдены условия эффективного измельчения твердого (руды) шаром и обеспечения точности контроля энергоэффективного разрушения руды в шаровой мельнице. Чувствительность измерения достаточна практически в любой точке вдоль барабана. Деформация упругого элемента в пределах эффективного разрушения не зависит от размера кусков руды, а определяется суммарным объемом материала. Контроль энергетической эффективности измельчения руды лучше осуществлять при переработке одного ее технологического типа, однако это возможно и в случае смешанных типов руд.

Ключевые слова: математическое моделирование, энергоэффективное измельчение, шаровые мельницы, упругий элемент, точность контроля.

A.N. MATSUI, V.A. KONDRATETS

Central Ukrainian National Technical University

THE MATHEMATICAL MODELING OF CONNECTIONS OF THE INDICATORS OF MILLING PROCESS WITH THE PARAMETERS OF CONCENTRATION OF LARGE FRACTIONS OF ORE

One of the effective ways to reduce the cost of magnetite concentrate is to improve the automatic control of the first grinding stage, which is carried out in ball mills. The purpose of this article is to simulate the mathematical relationships of grinding parameters with the parameters of the concentration of large fractions of solid as a basis for creating a means of monitoring the energy efficiency of the process. The method of generalizing the results of previous studies, analyzing the results obtained by the basic method, modeling, sensitivity theory, the method of describing the grinding process, and experimental methods for refining the theoretical results are used. In the conditions of invariability of the mass of the incident ball, the rate of fall, and the rigidity of the elastic element, it is possible to determine the volume of pieces of ore of a certain type of grindability. The conditions for effective grinding of a solid ball and ensuring the accuracy of control of energy-efficient ore destruction in a ball mill can be determined. The sensitivity of the measurement is practically sufficient at any point along the drum. The deformation of the elastic element within the effective fracture does not depend on the size of the pieces of ore, but is determined by the total volume of the material. It is better to control the energy efficiency of ore grinding when processing one of its technological types, but this is also possible in the case of mixed types of ores. The obtained mathematical models of the unloaded and loaded elastic element are ideally suited for conducting these studies. The dependences of the volume of the solid, under the pressure of the incident ball, the volume of the ore, which breaks down when the space is large in the area of action of the grinding body, and the volume of the residual undersized

solid are functions of the radius of the ball and the height of the pieces, which are constrained and allow the simulation of the interaction of the solid and the incident ball in a mill under conditions of maximum ore loading. The prospect of further research in this direction is the creation of a means of controlling the energy efficiency of grinding ore by a ball mill directly in its drum.

Keywords: mathematical modeling, energy-efficient grinding, ball mills, elastic element, control accuracy

Постановка проблеми

В Україні існує проблема зменшення собівартості магнетитового концентрату, який виробляють на рудозбагачувальних фабриках для потреб чорної металургії. Причиною цього в основному є значні перевитрати енергетичних і матеріальних ресурсів у рудопідготовці. Особливо вони вагомі у першій стадії подрібнення-класифікації. Одним з ефективних шляхів подолання цієї проблеми є удосконалення автоматичного управління першою стадією подрібнення, що здійснюється в кульових млинах і не можливе без знання зв'язків процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди. Враховуючи, що дана стаття присвячена дослідженню цих зв'язків, її тема є актуальною. Актуальність статті також підтверджується Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2013р. №603-р "Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020 року" та планами наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету, зокрема, теми: "Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди" (0109U007939).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматизацією рудопідготовки на збагачувальних фабриках займаються давно як за кордоном, так і в Україні, що видно, наприклад, з наукових праць [1–4], однак така робота продовжується і в теперішній час. В роботі [5] показано, що автоматизація першої стадії подрібнення, класифікації і магнітної сепарації є реальним шляхом підвищення ефективності збагачення залізних руд. На відсутність надійних засобів контролю необхідної точності та значну їх вартість вказується в роботі [6]. В останні роки створені ефективні ультразвукові інформаційні засоби [7], які можуть вимірювати крупність руди та інші технологічні параметри. Сприяти розвитку автоматизації збагачувального виробництва будуть і алгоритмічні методи визначення технологічних параметрів [8]. В роботі [9] звертається увага на необхідність удосконалення керування подрібненням руди в першій стадії на основі енергетичної ефективності процесу з вимірюванням даного параметра безпосередньо у барабані технологічного агрегату. Авторами даної статті запропоновано такий підхід контролю, однак зв'язків показників процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди ніхто не вивчав. Тому дана публікація присвячена розв'язанню саме цієї задачі.

Мета дослідження

Метою роботи є математичне моделювання зв'язків показників подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій твердого як основи для створення засобу контролю енергетичної ефективності технологічного процесу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Енергетичну ефективність подрібнення руди можливо оцінювати за допомогою пружного елемента, який деформується при руйнуванні на ньому крихкого матеріалу. Математичне моделювання можливо здійснити на пружному елементі, що у незавантаженому стані має рівняння:

$$x_1 = \frac{mg + \sqrt{mg(mg + 2ch)}}{c}, \quad (1)$$

де x_1 – деформація незавантаженого пружного елемента при падінні кулі; m – маса падаючої кулі; g – прискорення земного тяжіння; c – жорсткість пружного елемента; h – висота падіння кулі.

Математична модель навантаженого пружного елемента приймає наступний вигляд:

$$x_2 = \frac{mg + \sqrt{mg(mg + 2ch) - 2ckk_1V_p}}{c}, \quad (2)$$

де x_2 – деформація завантаженого пружного елемента; k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від міцності руди; k_1 – стала, що характеризує зв'язок загального і об'єму шматка руди, що деформується; V_p – об'єм шматка руди.

З залежності (2) видно, що при відсутності руди на пружному елементі ($V_p = 0$), x_2 відповідає x_1 . При зростанні об'єму шматка руди V_p зміщення пружного елемента x_2 буде зменшуватись. В умовах незмінності маси падаючої кулі, висоти падіння та жорсткості пружного елемента можливо визначити об'єм шматків руди певного типу подрібнюваності.

Відповідно до залежності (2) можливо визначити об'єм руди не лише одного, а і кількох шматків руди. При падінні кулі в зоні руйнування одночасно може в певних ситуаціях знаходитись один, два, три, чотири і т.д. шматків руди. Найбільший об'єм руди під кулею перед руйнуванням буде відповідати щільно

упакованим шматкам кубічної форми. Взаємодія падаючої кулі з крупними шматками руди показана на рис.1.

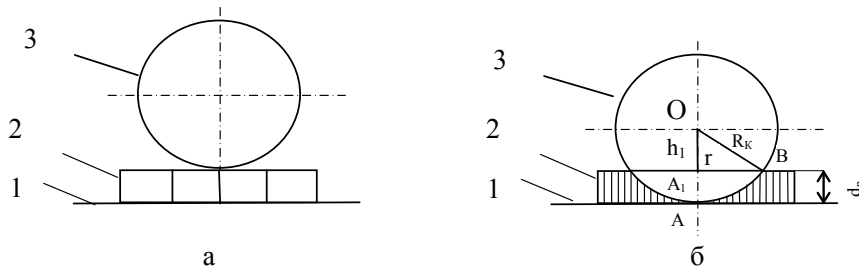


Рис. 1. Положення падаючої кулі перед руйнуванням (а) і після руйнування (б) руди:
1 – футеровка; 2 – шматки руди; 3 – куля

В умовах найбільшої концентрації крупних шматків руди в зоні руйнування буде знаходитися блок твердого 2 (рис.1, а) висотою в розмір одного кубічного шматка d_p . Блок твердого подамо циліндром висотою d_p і радіусом r (рис.1, б). Його об'єм дорівнює:

$$V_{PT} = \pi r^2 d_p \tag{3}$$

Він знаходиться під тиском падаючої кулі 3. З прямокутного трикутника A_1OB :

$$r^2 = d_p (2R_K - d_p), \tag{4}$$

де R_K – радіус кулі.

З врахуванням (4) об'єм твердого, що знаходиться під тиском падаючої кулі, дорівнює:

$$V_{PT} = \pi d_p^2 (2R_K - d_p). \tag{5}$$

Під дією падаючої кулі матеріал починає руйнуватися з центральної частини. Згодом включаються його периферійні частини, які чинять ще більший опір. Оскільки енергія падаючої кулі надлишкова, вона доходить своєю поверхнею практично до футеровки (рис.1, б). При цьому зруйнованим виявляється об'єм твердого, що дорівнює частині зануреної в тверде кулі. Об'єм руди, що руйнується під дією падаючої кулі, при найбільшому заповненні простору в зоні дії молярного тіла дорівнює:

$$V_{PP} = \frac{\pi d_p^2}{3} (3R_K - d_p). \tag{6}$$

Дрібні шматки руди у водному середовищі виштовхуються з-під кулі на периферію через проміжки між крупними класами. В об'ємі існувавшего рудного циліндра в основному залишаться недоподрібнені частки твердого, створені частковим руйнуванням крупних шматків руди на периферійних ділянках кулі. Об'єм залишкового недоподрібненого крупного твердого в зоні кулі можна визначити залежністю:

$$V_{P3} = \frac{\pi d_p^2}{3} (3R_K - 2d_p). \tag{7}$$

Об'ємами твердого V_{PT} , V_{PP} , V_{P3} можна наближено охарактеризувати процес взаємодії твердого і кулі в млині в умовах максимального завантаження рудою.

Для використання цих залежностей необхідно обґрунтувати обмеження, виходячи з умов можливого часткового руйнування шматків руди максимального розміру на периферійних ділянках кулі. Положення граничної точки на поверхні кулі, в якій ще буде відбуватися часткове руйнування великого шматка руди можливо обґрунтувати за допомогою рис.2. Для того, щоб відбувалося руйнування, необхідно створювати зусилля, яке б не відштовхувало при падінні кулі шматок руди на периферію.

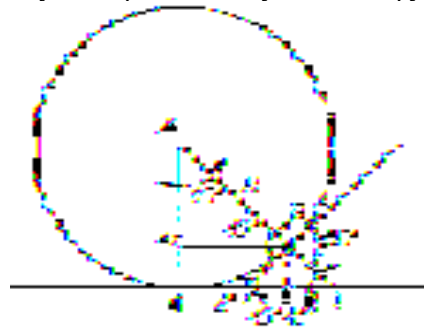


Рис. 2. Положення граничної точки на поверхні кулі, в якій ще буде відбуватися часткове руйнування великого шматка руди

Граничною точкою, коли це не відбувається, буде точка B на поверхні кулі (рис.2). Ця точка характерна тим, що дотична до поверхні кулі, проведена під прямим кутом до радіуса OB , повинна розташовуватися під кутом 45° до прямої AC . В точках, розташованих ліворуч від B , виникають зусилля, спрямовані на стиснення шматка руди, а праворуч від B – на його виштовхування. Тому точка B є граничною точкою і в ній можливо відшукати умови обмеження на розмір шматка руди. Найбільший розмір шматка руди буде дорівнювати довжині відрізка BE , тобто, $BE = d_p$.

З прямокутного трикутника A_1OB , де $A_1O = A_1B$, можливо записати

$$A_1O = A_1B = \frac{R_K}{\sqrt{2}}. \tag{8}$$

Максимальний розмір вздовж вертикалі зруйнованого шматка руди дорівнює:

$$d_{P\max} = R_K - A_1O = R_K \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right). \tag{9}$$

Отже, при використанні залежностей (5), (6), (7) необхідно для кожного діаметра куль використати обмеження (9). Однак його слід уточнити. Руда максимальної крупності знаходиться в перерізі під дією двох відрізків A_1B , тобто $2A_1B = \frac{2}{\sqrt{2}}R_K$. Точніше, на тверде буде діяти частина сфери висотою AA_1 . В перерізі вона

обмежена колом радіусом A_1B при максимальному розмірі твердого. Зменшення розміру твердого приводить до зменшення радіуса круга, який буде розташовуватись паралельно кругу радіусом A_1B . Тому найбільша кількість часток твердого в зоні руйнування визначається площею кругів, паралельних геометричній фігурі найбільшого радіуса A_1B . Радіус і площа круга визначаються розміром шматків твердого.

Залежності об'ємів руди, що знаходяться під тиском падаючої кулі, руйнуються і залишаються недоподрібненими від розміру шматків руди, представлені на рис. 3. З залежностей видно, що об'єми зруйнованого матеріалу і недоподрібнених шматків руди складають об'єм, що знаходиться під тиском падаючої кулі. Співвідношення між об'ємами подрібненого і недоподрібненого матеріалу не залишається при зміні розміру шматків руди незмінним. При зростанні розміру шматків руди частка недоподрібненого матеріалу зменшується. Це вказує на неоднозначність залежності об'єму зруйнованого матеріалу і матеріалу, що знаходиться під тиском падаючої кулі, тобто концентрації крупних класів.

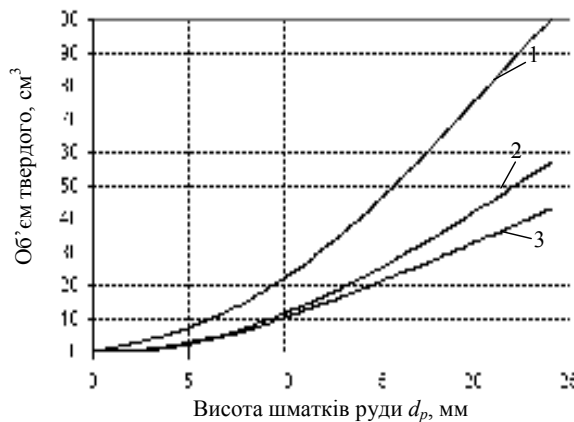


Рис. 3. Залежність об'єму твердого від розміру шматків руди:

- 1 – об'єм твердого, що знаходиться під тиском падаючої кулі; 2 – об'єм твердого, що руйнується під дією падаючої кулі;
- 3 – об'єм залишкового недоподрібненого твердого.

Вимірювальні можливості даного підходу можливо охарактеризувати співвідношенням об'ємів, яке витікає з залежностей (5) і (6):

$$V_d = \frac{V_{PP}}{V_{PT}} = \frac{3R_K - d_p}{3(2R_K - d_p)}. \tag{10}$$

Залежності зміни співвідношення об'ємів V_d від розміру куль і шматків руди приведені в табл.1. За базові значення співвідношення об'ємів V_d приймалися дані, що відповідають середині діапазону зміни d_p в табл. 1. З даних табл. 1 видно, що в центральній зоні руйнування незалежно від розміру кулі відношення об'єму зруйнованого матеріалу до об'єму, що знаходиться під тиском падаючої кулі, практично однакове і складає 0,515. З ростом діаметра кулі діапазон ефективного руйнування матеріалу відносно його висоти розширюється, однак на краях виникають суттєві невідповідності, де недоруйнування складає два або дещо більше відсотків. Це приводить до похибок при вимірюванні. Тобто, куля певного розміру повинна подрібнювати конкретний матеріал. Так, куля з $d_K = 30$ мм найбільш ефективно подрібнює шматки руди висотою 2...3 мм, з $d_K = 40$ мм – шматки руди висотою 2...5 мм, з $d_K = 50$ мм – шматки руди висотою 2...6 мм, з $d_K =$

60 мм – шматки руди 3...7 мм. Як видно, куля діаметром 50 мм має найкращі характеристики, охоплюючи діапазон і дрібних шматків, і більш крупних. Виходячи з цього, контролювати енергоефективність подрібнення руди необхідно на певній відстані від завантажувальної горловини млина, оскільки з віддаленням від неї крупність твердого зменшується, а діаметр куль збільшується.

Контролювати енергетичну ефективність подрібнення руди можливо при певній чутливості процесу. Перша похідна dV_{PP} / dd_p відповідно виразу (6) характеризує чутливість процесу. Вона дорівнює:

$$\frac{dV_{PP}}{dd_p} = \pi d_p (2R_K - d_p). \tag{11}$$

З даного виразу видно, що чутливість процесу залежить як від крупності d_p руди, так і розміру куль R_K . На вході млина чутливість забезпечується найбільшою крупністю шматків руди, але значно зменшується малим розміром куль. На певному віддаленні від завантажувальної горловини розмір руди зменшується, що знижує чутливість, але вона відновлюється значно більшими діаметрами куль у даних перерізах барабана. Тому можна стверджувати, що чутливість вздовж барабана змінюється в порівняно нешироких межах і є достатньою практично в будь-якому його перерізі.

Таблиця 1

Зв'язок об'єму зруйнованого матеріалу з об'ємом твердого, що знаходиться під тиском падаючої кулі при різних її розмірах і висоті шматків руди

Параметри	Висота шматків руди d_p , мм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Радіус кулі, мм (d_{pmax} , мм)	15 (4,39)								
V_d	0,5058	0,5119	0,5185	0,5256					
$\Delta V_d, \%$	-1,82	-0,64	+0,64	+2,02					
Радіус кулі, мм (d_{pmax} , мм)	20 (5,86)								
V_d	0,5043	0,5088	0,5135	0,5185	0,5238	0,5294			
$\Delta V_d, \%$	-2,27	-1,40	-0,48	0,48	1,51	2,60			
Радіус кулі, мм (d_{pmax} , мм)	25 (7,32)								
V_d	0,5034	0,5069	0,5106	0,5145	0,5185	0,5227	0,5271		
$\Delta V_d, \%$	-2,16	-1,48	-0,76	0	0,78	1,59	2,45		
Радіус кулі, мм (d_{pmax} , мм)	30 (8,79)								
V_d	0,5028	0,5058	0,5088	0,5119	0,5152	0,5185	0,5220	0,5256	0,5294
$\Delta V_d, \%$	-2,41	-1,82	-1,24	-0,64	0	0,64	1,32	2,02	2,76

Слід зауважити, що при встановленні у кульовому млині режиму, близького до найбільшого завантаження, відповідно залежності (6) можливо визначати крупність твердого. Залежності об'єму, що руйнується, від розміру твердого при певних діаметрах куль приведені на рис. 4. З рис. 4 видно, що при певній залежності, яка визначається розміром кулі, за відомим зруйнованим об'ємом твердого V_{PP} можливо визначити крупність руди в даному перерізі барабана. Розмір куль в конкретному перерізі барабана відомий і може підтримуватись незмінним.

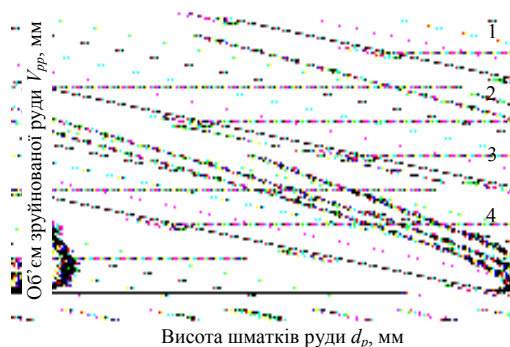


Рис. 4. Залежність об'єму твердого, що руйнується, від крупності руди при різних радіусах куль: 1 – 5 см; 2 – 4 см; 3 – 3 см; 4 – 2 см

Розглянуті залежності отримані при найбільшій концентрації твердого в зоні руйнування, яка на практиці виникнути не може. В реальних умовах концентрація твердого буде меншою. Однак розглянуті залежності описують даний процес, оскільки зменшення концентрації можливо врахувати, ввівши коефіцієнт розпушення. Тому отримані закономірності є справедливими і можуть бути реалізованими на практиці.

Об'єм зруйнованої руди можна визначати за величиною деформування пружного елемента відповідно залежності (2). Для встановлення зв'язків між деформацією x_2 пружного елемента, параметрами механічної системи та руди промодельємо процес за допомогою персонального комп'ютера. При цьому використаємо сталеву кулю діаметром 50 мм ($m = 0,51$ кг), пружний елемент з коефіцієнтом жорсткості $c = 35555555$ Н/м, руду міцністю $k = 3,2$ кГм/см³. Коефіцієнт k_1 приймемо на рівні 0,3. При моделюванні визначалися як абсолютна деформація x_2 пружного елемента, так і різниця відхилень $\Delta x = x_1 - x_2$ перетворювача без руди та з рудою.

Залежності величини деформацій пружного елемента від об'єму руди при незмінній міцності ($k = 3,2$ кГм/см³) та при різних висотах падіння кулі показані на рис. 5. З рис. 5, а видно, що сигнал пружного елемента сильно залежить від висоти падіння кулі. Деформація пружного елемента майже лінійно зменшується при зростанні об'єму руди, що руйнується. Чутливість при зменшенні висоти падіння кулі дещо зростає. При використанні різниці сигналів $\Delta x = x_1 - x_2$ чутливість значно вища при мінімальній висоті падіння кулі, тобто енергії молоткового тіла. Найнижча чутливість забезпечується при великих енергіях (крива 4). Це підтверджується фізично. При великих енергіях прогин пружного елемента значний, а відносна втрата енергії кулею на руйнування мала, тому різниця сигналів виходить незначною. Отже, при реалізації вимірювань доцільно використовувати найменші енергії, достатні для руйнування руди найбільшого можливого об'єму.

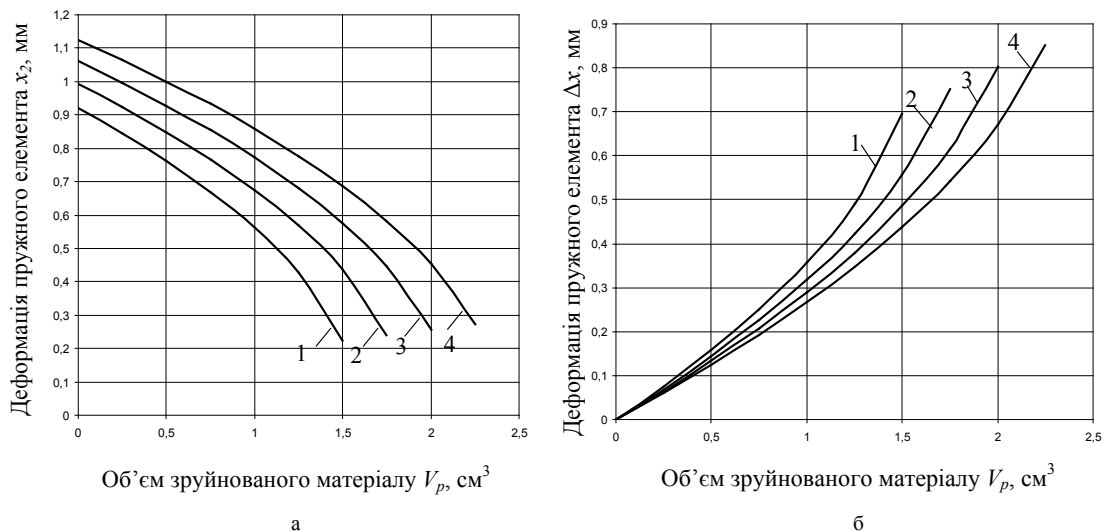


Рис. 5. Залежність деформації пружного елемента від об'єму руди, що руйнується, при різних висотах падіння кулі:
а – абсолютне значення деформації; б – різниця значень деформацій порожнього і заповненого перетворювачів:
1 – $h=3$ м; 2 – $h=3,5$ м; 3 – $h=4$ м; 4 – $h=4,5$ м

При дослідженні впливу міцності руди на роботу пружного елемента коефіцієнту k надавалися значення 2,88 кГм/см³, 3,2 кГм/см³ і 3,52 кГм/см³. Крупність руди складала 15 мм, а висота падіння кулі – 4,0 м. Залежності деформацій пружного елемента від об'єму зруйнованого матеріалу при різних міцностях наведені на рис. 6. З рис. 6, а видно, що прогин пружного елемента дещо зменшується з підвищенням міцності руди. Різниця прогинів Δx показана на рис. 6, б.

При зміцненні руди вона збільшується, що також пояснюється фізично. Оскільки при певному об'ємі руди під кулею на її руйнування буде витрачено тим більше енергії, чим більша міцність, різниця $\Delta x = x_1 - x_2$ буде зростати більше у випадку міцної руди, тому що x_2 при цьому зменшиться найбільше. Отже, вимірювання енергетичної ефективності руйнування руди найбільш доцільно здійснювати в умовах перероблення сировини певного технологічного різновиду.

Здійснимо тепер експериментальні дослідження руйнування однакової руди на тій же фізичній моделі з жорсткістю $c=35555555$ Н/м кулею діаметром 80 мм. Висоту падіння приймемо незмінною, а матеріал крупністю 5, 10, 15 і 20 мм наближено кубічної форми. Будемо фіксувати найбільшу амплітуду гармонічних сигналів.

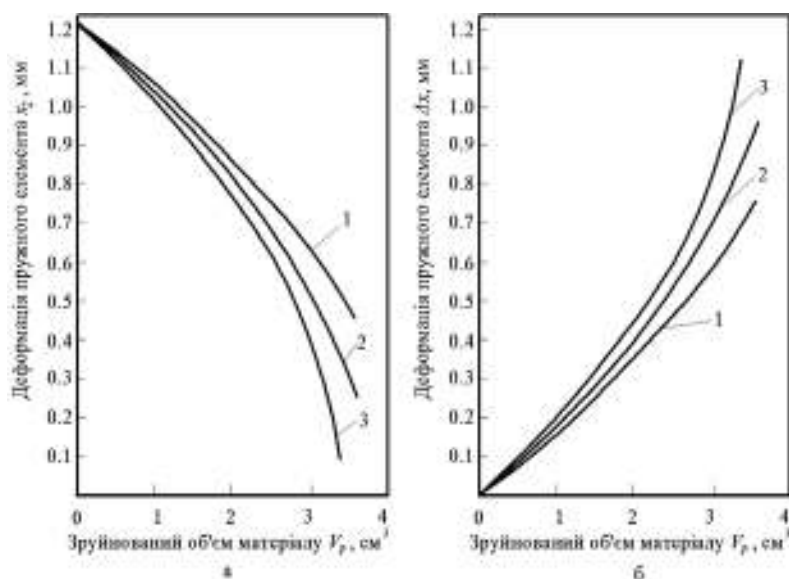


Рис. 6. Залежність сигналів пружного перетворювача від об'єму матеріалу, що руйнується, при різних його міцності:
 а – абсолютне значення деформації пружного елемента;
 б – різниця значень деформацій порожнього і заповненого перетворювачів;
 1 – $k = 2,88 \text{ кгГм/см}^3$; 2 – $k = 3,2 \text{ кгГм/см}^3$; 3 – $k = 3,52 \text{ кгГм/см}^3$

Залежність сигналів пружного елемента від об'єму руди, що руйнується, при різних крупностях показана на рис.7. В дослідях розглядалося руйнування шматків кожної крупності від одного до найбільшої кількості. Як видно з рис. 7, прогин пружного елемента в межах ефективного руйнування не залежить від розміру шматків, а визначається сумарним об'ємом матеріалу. При зростанні сумарного об'єму матеріалу в зоні руйнування сигнал пружного елемента зменшується. Залежність деформації пружного елемента від об'єму матеріалу, що руйнується, нелінійна (рис. 7, а), однак вона практично лінійна в діапазоні зміни об'єму від 0 до 2/3 найбільшого значення. Як видно, теоретичні і експериментальні залежності співпадають.

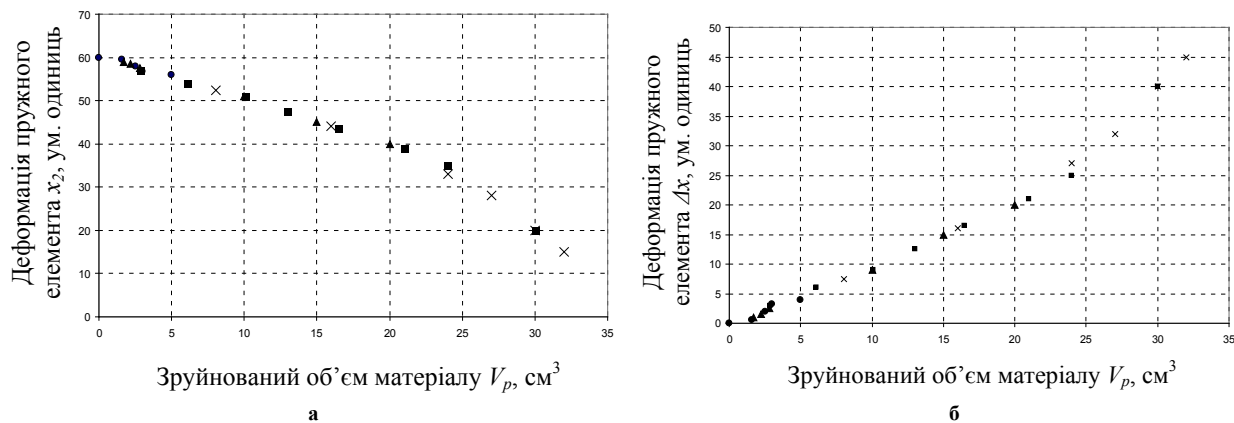


Рис. 7. Залежність сигналів пружного перетворювача від об'єму руди, що руйнується, при різних крупностях твердого:
 а – абсолютне відхилення; б – різниця відхилень;
 ● – 5 мм; ▲ – 10 мм; ■ – 15 мм; × – 20 мм

При визначенні різниці Δx деформацій пружного елемента діапазон зміни сигналу однаковий, але лінійність залежності дещо краща (рис. 7, б). Тут при збільшенні об'єму твердого, що руйнується, прогин зростає. Прямолінійність початкової ділянки залежностей (рис. 7) при малих значеннях об'єму твердого показує на необхідність контролю енергетичної ефективності руйнування руди в кульовому млині не в початковій зоні, а на певній відстані від завантажувальної горловини. Відповідно рівнянню кінетики подрібнення в певному поперечному перерізі барабана млина будуть повторюватися ті ж закономірності, лише це буде відбуватися на більш дрібному матеріалі, що представляє крупні класи. Найкраще використовувати різницю сигналів незавантаженого і завантаженого рудою пружного елемента.

Залежності, подані на рис. 7, побудовані в широкому діапазоні зміни крупності і об'єму твердого. В реальних умовах роботи кульового млина крупність верхніх класів змінюється порівняно в нешироких межах, порівняно у вузькому діапазоні змінюється і об'єм крупного твердого, що сприяє підвищенню точності контролю.

На вихідний сигнал пружного елемента в межах ефективного руйнування не впливає крупність руди, яка змінюється, і впливає її міцність. Тому контроль енергетичної ефективності подрібнення руди краще здійснювати при переробці одного технологічного типу руди. Керування процесом подрібнення руди на цій основі буде самим ефективним. Якщо ж за певних умов технологічні типи руд доцільно змішувати, то енергетичну ефективність визначати також можливо. При цьому процес роботи кульового млина необхідно налагодити на найменшу середньозважену крупність матеріалу в контрольованому перерізі при найменшій міцності твердого, тобто, за цих умов забезпечити найбільшу можливу концентрацію крупного твердого. Якщо крупність руди збільшиться, то сигнал пружного елемента зросте. Одночасно це буде свідчити про перевантаження. Зменшивши сигнал пружного елемента до попереднього значення, в зоні руйнування залишимо той же об'єм твердого, ліквідувавши тенденцію до створення перевантаження. Якщо в номінальному стані зросте міцність руди, то також створяться умови для виникнення перевантаження. Однак при цьому одночасно зросте і сигнал пружного елемента (крива 1, рис. 6, б). Зменшивши сигнал пружного елемента до номінального значення, ліквідуємо загрозу виникнення перевантаження. При цьому в зоні руйнування буде дещо менший об'єм крупних шматків руди, але більш міцніших.

Отже, практично у будь-якій технологічній ситуації можливо здійснити автоматичний контроль енергетичної ефективності подрібнення руди у кульових млинах.

Висновки

Математичним моделюванням зв'язків показників процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди встановлено:

- запропоновані математичні моделі розвантаженого і навантаженого пружного елемента ідеально підходять для проведення даних досліджень;
- в умовах незмінності маси падаючої кулі, висоти (швидкості) падіння та жорсткості пружного елемента можливо визначати об'єм шматків руди певного типу подрібнюваності;
- знайдені залежності об'єму твердого, що знаходяться під тиском падаючої кулі, об'єму руди, що руйнується при найбільшому заповненні простору в зоні дії молоткового тіла, та об'єму залишкового недоподрібненого твердого є функціями радіуса кулі та висоти шматків, на яку діють обмеження, і дозволяють моделювати процес взаємодії твердого і падаючої кулі в млині в умовах максимального навантаження рудою;
- отримане співвідношення об'єму зруйнованого твердого і руди, що знаходиться під тиском падаючої кулі дозволило промодельовати процес забезпечення точності контролю енергетичної ефективності подрібнення і обґрунтувати вибір крупності та розмір куль;
- контролювати енергоефективність подрібнення руди необхідно на певній відстані від навантажувальної горловини млина, оскільки з віддаленням від неї крупність твердого зменшується, а діаметр куль збільшується;
- чутливість контролю енергетичної ефективності руйнування визначається радіусом кулі й товщиною шматків і вздовж барабана змінюється в порівняно нешироких межах і є достатньою практично в будь-якому його перерізі;
- прогин пружного елемента в межах ефективного руйнування не залежить від розміру шматків руди, а визначається сумарним об'ємом матеріалу;
- контроль енергетичної ефективності подрібнення руди краще здійснювати при переробці одного технологічного її різновиду, однак це можливо і у випадку змішаних технологічних типів руд.

Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є створення засобу контролю енергетичної ефективності подрібнення руди кульовим млином безпосередньо в його барабані.

Список використаної літератури

1. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения [пер. с англ.] / А.Дж. Линч. – М.: Недра, 1981. – 342 с.
2. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / А.Н. Марюта. – М.: Недра, 1987. – 230 с.
3. Козин В.З. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках / В.З. Козин, А.Е. Троп, А.Я. Комаров. – М.: Недра, 1980. – 333 с.
4. Автоматизация управления обогатительными фабриками / Б.Д. Кошарский, А.Я. Ситковский, А.В. Красномовец и др. – М.: Недра, 1977. – 525 с.
5. 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. – 2014. – Вип. 36. – С. 276-280.
6. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / А.І. Купін. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204 с.

7. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / В.С. Моркун, В.Н. Потапов, Н.В. Моркун, Н.С. Подгородецкий. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
8. Кондратец В.А. Обеспечение идентификации соотношения руда/вода в мельницах с циркулирующей нагрузкой / В.А. Кондратец // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – 2013. – №11. – С.95-102.
9. Измельчение. Энергетика и технология / Г.Г. Пивняк, Л.А. Вайсберг, В.И. Кириченко и др.]. – М.: Изд. дом "Руда и Металлы", 2007. – 296 с.