

5. Ступник Н.И., Калинин В.А., Федько М.Б., Мирченко Е.Г. Влияние напряженно-деформированного состояния массива горных пород на технологию отбойки урановых руд / Научный вестник Национального горного университета. – Днепропетровск. – 2013. – № 2. – С. 11-16.
6. Мельников Н.В. Повышение полезной работы взрыва при отбойке полезных ископаемых / Взрывное дело, № 54/11 - М.: Недра, 1964. - С. 7-34.
7. Ефремов Э.И. Опыт использования простейших ВВ на карьерах Украины / Украинский союз инженеров горняков. Информационный бюллетень №4, 2010, с. 9-11.
8. Совершенствование ассортимента промышленных взрывчатых веществ в зарубежных странах / В.М.Скоробагатов, Б.Н. Кукиб, З.Г. Поздняков и др. – Взрывное дело, 87/44. –М., Недра,1985. –С. 174-182.
9. Демидюк Г.П., Дубнов Л.В., Стоянов В.В. и др. и др. Техника и технология взрывных работ на рудниках. – М., Недра, 1978. -238с.
10. Захаренко Е.И. Состояние взрывного дела на Украине. Государственный надзор в сфере обращения со взрывчатыми материалами промышленного назначения / Украинский союз инженеров горняков. Информационный бюллетень №4, 2010. - С. 3-8.
11. <http://www.ukr-prom.com/nomid3398/>.
12. Шиман Л.Н., Устименко Е.Б., Кириченко А.Л., Подкаменная Л.И. Оценка влияния условий применения смесевых вв на их взрывчатые характеристики при проведении взрывных работ / Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1 /2010(5), с. 60-68.
13. Факторы безопасного применения водосодержащих взрывчатых веществ с продуктами утилизации твердого ракетного топлива / Е.Б. Устименко, Л.Н. Шиман, Л.И. Подкаменная // Вестник КГПУ им. Михаила Островского - 2008 - №5 (часть 2) - с. 158 - 161.
14. Дубнов Л.В. Современное состояние и перспектива развития взрывчатых веществ для горной промышленности //Сб. Взрывное дело, № 49/6, М.: Недра, 1962. - С. 5-17.

Рукопис подано до редакції 29.03.2021

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори технічних наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асист.,
І. А. ГАПОНЕНКО, А. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники
Криворізький національний університет

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

Метою дослідження є розроблення методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи (продуктивності, концентрації твердої фази, вмісту контрольного класу крупності часток твердої фази), який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

Методи дослідження. У роботі використані наступні методи: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду; методи аналітичного конструювання та комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання для синтезу та аналізу математичної моделі; методи математичної статистики і теорії ймовірності для обробки результатів експериментів.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методу комплексного ультразвукового вимірювання характеристик потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора. Запропонований метод дозволяє оцінити продуктивність, концентрацію часток твердої фази і вміст контрольного класу крупності часток твердої фази.

Практичне значення полягає в тому, що використання запропонованого підходу дозволяє отримати додаткову інформацію про параметри потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

Результати. Розрахунок характеристичної функції дисперсії ультразвукового сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи, на основі вимірювання початкової інтенсивності та інтенсивності прийнятого сигналу дозволяє визначити вміст контрольного класу крупності часток твердої фази залізорудної пульпи. Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора доцільно застосовувати джерело хвиль Лемба, що працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі). Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Рамплера.

Ключові слова: магнітна сепарація, ультразвукові вимірювання, залізорудна пульпа, математична модель

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-10-15

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. При переробленні залізорудної сировини здійснюють моніторинг характеристик технологічних потоків між технологічними операціями. До контрольованих параметрів відносять такі: продуктивність потоку, концентрація часток твердої фази і гранулометричний склад часток залізорудної сировини. Водночас, здійснення контролю названих параметрів у робочих ємностях технологічних агрегатів є складним завданням. Водночас, можливість контролювати параметри потоку рудного матеріалу всередині магнітного сепаратора у різних робочих умовах дозволить вибрати оптимальний режим функціонування і підвищити як ефективність роботи сепаратора, так і якість вихідного продукту.

Аналіз досліджень і публікацій. Процес мокрої магнітної сепарації характеризують такі основні параметри: продуктивність, кількість пустої породи у концентраті, втрати магнітного матеріалу у хвостах і загальне споживання води у даному процесі [1]. Водночас існує велика кількість режимних параметрів, які впливають на роботу магнітного сепаратора. Наприклад, у роботі [2] розглянуті такі параметри: швидкість подачі магнітного матеріалу, частка магнітного матеріалу у рудній сировині, концентрація твердих часток, конструкція магнітного вузла сепаратора і конструкція резервуару сепаратора. Також на продуктивність впливають такі параметри сепаратора як: рівень пульпи у сепараторі, кут магнітного вузла, зазори між барабаном і резервуаром і швидкість обертання барабана.

Дослідження [3] показали, що основним механізмом вилучення дрібних часток магнетиту є магнітна флокуляція в робочій ємності сепаратора, для здійснення якої необхідно підтримувати досить високу концентрацію магнітного матеріалу в живленні сепаратора. При роботі з більш грубозернистим матеріалом швидкість потоку твердих часток є фактором, який вимагає зменшення продуктивності по твердій фазі пульпи [1]. Також, важливим фактором, який впливає на концентрацію твердих часток у концентраті і на якість концентрату, є кількість рудного матеріалу всередині сепаратора.

Для вимірювання продуктивності потоку пульпи використовують такі ультразвукові методи [4]: фазовий, частотний, часоімпульсний. У основі фазового методу знаходиться процес формування двох ультразвукових коливань, спрямованих по потоку рідини і проти нього, і подальшого вимірювання різниці фазових зсувів цих коливань [4,5]. Недоліком даного методу є необхідність використання чотирьох пар п'єзоелементів замість двох, що здорожує конструкцію. Використання частотного методу передбачає імпульсну модуляцію ультразвукових коливань з подальшим вимірюванням їх частот [4]. Дані ультразвукові коливання формуються одночасно у напрямку руху потоку середовища і проти руху, а різниця їх частот є пропорційною величині витрати рідини. Часоімпульсний метод ґрунтується на тому, що швидкість поширення звукової хвилі в рухомому середовищі дорівнює векторній сумі швидкості звуку у нерухомому середовищі і швидкості середовища [4,6]. Підхід до організації вимірювань величини витрати рідини в потоці запропоновано у роботі [7]. У основі даного підходу знаходиться залежність швидкості потоку вимірюваного середовища від різниці часу переміщення коротких ультразвукових імпульсів.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи (продуктивності, вмісту твердої фази, вміст контрольованого класу крупності часток твердої фази), який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

Викладення матеріалу і результати. Оцінимо дисперсію високочастотних об'ємних ультразвукових коливань, що пройшли через пульпу. Інтенсивність ультразвукового сигналу при проходженні їм фіксованої відстані у пульпі має такий вигляд [8]

$$\xi = I_0 \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^k \sigma(r_i) Z \right\}, \quad (1)$$

де $\sigma(r_i)$ – перетин погашення часток радіуса r_i .

На основі виразу для умовного математичного сподівання для фіксованого числа часток k подрібненого матеріалу у контрольованому об'ємі отримано середнє значення величини сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи V

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^\infty \exp \left(-\frac{1}{V} \sigma(r)Z \right) F(r) dr \right) \right\}. \quad (2)$$

Дисперсія цієї величини при проходженні ультразвуковим сигналом шару пульпи товщиною Z визначимо з виразу [9]

$$D\xi = I_0^2 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^\infty e^{\left(-\frac{2}{V} \sigma(r)Z \right)} F(r) dr \right) \right\} - I_0^2 \exp \left\{ 2nV \left(1 - \int_0^\infty e^{\left(-\frac{1}{V} \sigma(r)Z \right)} F(r) dr \right) \right\} \quad (3)$$

Представимо складові отриманого виразу у вигляді

$$\int_0^\infty F(r) e^{\left(-\frac{2}{V} \sigma(r)Z \right)} dZ \approx \int_0^\infty F(r) \left[1 - \frac{2}{V} \sigma(r)Z + \frac{4\sigma^2(r)Z}{2V^2} \right] dZ, \quad (4)$$

$$\int_0^\infty F(r) dr \cdot e^{\left(-\frac{1}{V} \sigma(r)Z \right)} = 1 - \frac{Z}{V} \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr + \frac{Z^2}{V^2} \int_0^\infty F(r) \sigma^2(r) dr. \quad (5)$$

Введемо позначення

$$\psi = \exp \left\{ \frac{nZ^2}{V} \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr \right\}, \quad (6)$$

тоді

$$D\xi = I_0^2 \exp \left\{ 2nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} [\psi^2 - \psi]. \quad (7)$$

Визначимо відносну величину

$$\frac{\sqrt{D\xi}}{\langle \xi \rangle} = \left(I_0 \exp \left\{ -nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi^2 - \psi} \right) / \left(I_0 \exp \left\{ -nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi} \right). \quad (8)$$

Враховуючи що $\sqrt{\psi} \approx 1$, отримаємо

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ \left(-ZW \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right) / \left(\int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 F(r) dr \right) \right\}, \quad (9)$$

і, отже

$$\ln \frac{I_0}{\langle \xi \rangle} = ZW \left(\int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right) / \left(\int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 F(r) dr \right). \quad (10)$$

Визначимо характеристичну функцію

$$S' = \frac{\ln \psi}{\ln \left(I_0 / \langle \xi \rangle \right)} = \frac{Z}{V} \left(\int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr \right) / \left(\int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right). \quad (11)$$

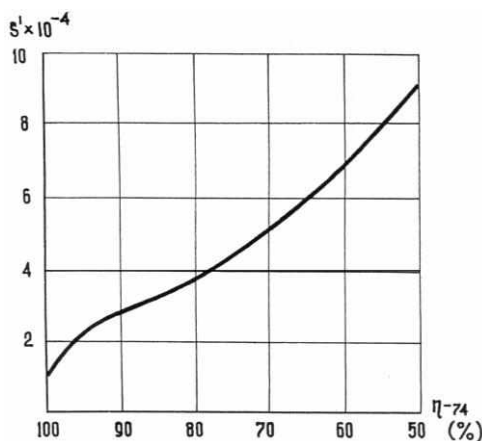


Рис. 1. Залежність $S' = f(\omega_{74})$

З останнього виразу видно, що величина S' є функцією крупності часток твердої фази у пульпі. Отже, при відомій залежності (11), на основі вимірювання параметрів I_0 , $\langle \xi \rangle$, $D\xi$ і обчислення параметра S' , можна визначити вміст контрольного класу крупності, наприклад ω_{74} . На рис. 1 приведена розрахункова залежність $S' = f(\omega_{74})$.

Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізородної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора: продуктивності, вмісту твердої фази, вміст контрольного класу крупності часток твердої фази; пропонується схема, представлена на

рис. 3. Відповідно до даної схеми джерело хвиль Лемба працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізородній пульпі).

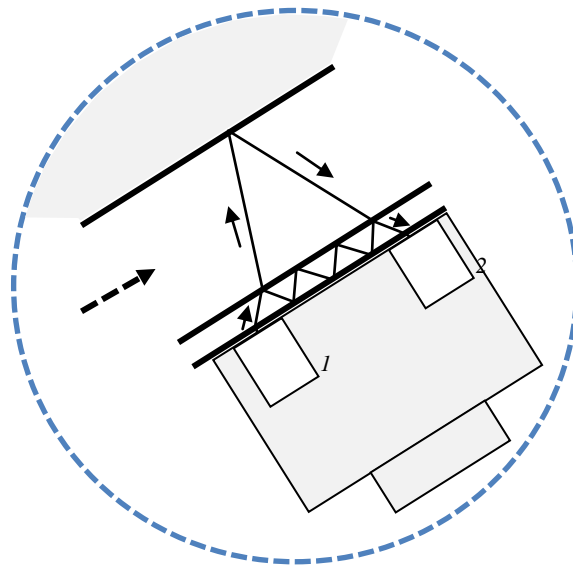


Рис. 2. Схема ультразвукового вимірювального каналу: 1 - джерело ультразвуку; 2 - приймач ультразвуку

Для моделювання процесів поширення ультразвукових хвиль використано спеціалізований програмний пакет Waveform Revealer [10]. При проведенні розрахунків товщина стінки магнітного сепаратора, в якій здійснюється поширення ультразвукових хвиль прийнято такою, що дорівнює 5 мм. Як приймачі сигналів використано п'єзоелектричні напівпровідникові активні датчики. Результати моделювання вихідного сигналу представлені на рис. 3а і рис. 3б відповідно.

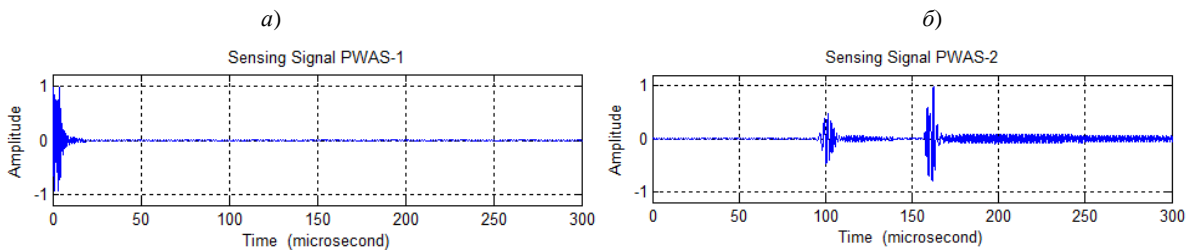


Рис. 3. Вхідний 5-періодний сигнал збудження синусоїдальної хвилі 5 МГц (а) та прийнятий сигнал (б) на відстані 10 см від джерела

Частотні характеристики пакетів S0 і A0 представлені на рис. 4. Криві дисперсії фазової швидкості ультразвуку в сталевій пластині представлені на рис. 4,а. Частотні характеристики хвильового пакета показані на рис. 4,б.

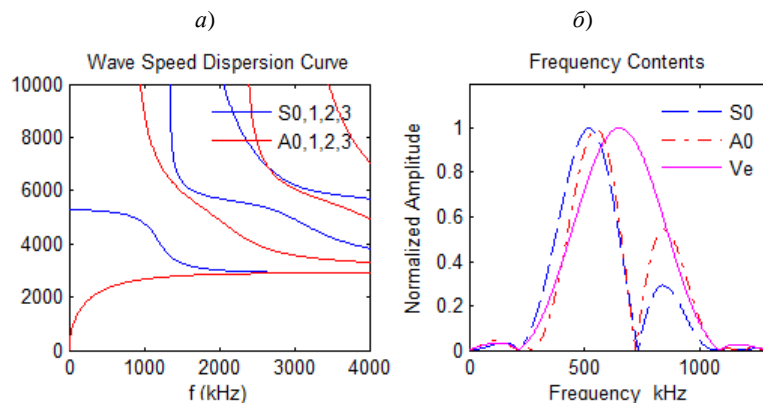


Рис. 4. Частотні характеристики хвильового пакета

Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера [11]. Сумарний вихід фракцій визначено за такими формулами: для фракції $r[d_1]$ – $R[>d_1]=r[d_1]$, для фракції $r[d_i]$ – $R[>d_i]=r[d_1]+r[d_2]+\dots+r[d_i]$; для фракції $r[d_m]$ – $R[>d_m]=1$. У процесі дослідження розглянуті такі фракції крупності рудних часток: +3, 3+1, 1+0.5, 0.5+0.25, 0.25+0.125, 0.125+0.071, 0.071+0.056, 0.056+0.044, 0.044+0. Для визначення коефіцієнтів рівняння Розіна-Раммлера використаний метод найменших квадратів. Результати ідентифікації коефіцієнтів рівняння Розіна-Раммлера для математичного моделювання розподілу часток руди за класами крупності представлені на рис. 5.

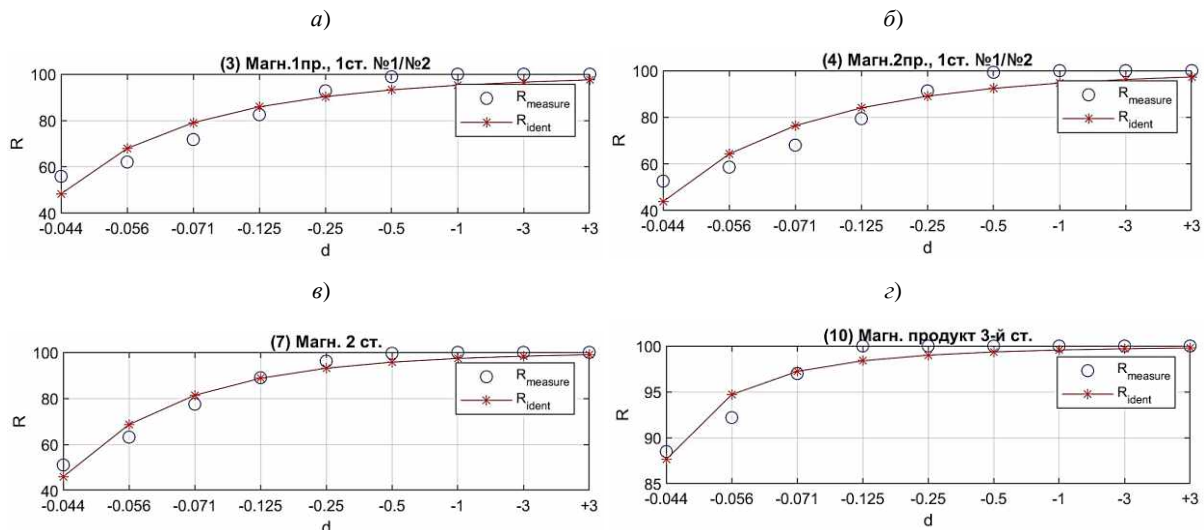


Рис. 5. Результат ідентифікації параметрів рівняння Розіна-Раммлера

Для ідентифікації залежностей, які не можуть бути описані аналітично доцільно використовувати гібридний підхід із застосуванням нечітких моделей Такагі-Сугено.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Розрахунок характеристичної функції дисперсії ультразвукового сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи, на основі вимірювання початкової інтенсивності та інтенсивності прийнятого сигналу дозволяє визначити вміст контрольного класу крупності часток твердої фази залізорудної пульпи.

Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора доцільно застосувати джерело хвиль Лемба, що працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі).

Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера.

Список літератури

1. Stener, J.F., Carlson, J.E., Palsson, B.I., & Sand, A. (2016). Direct measurement of internal material flow in a bench scale wet low-intensity magnetic separator. *Minerals Engineering*, 91, 55-65. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.10.021.
2. Morgan, D. G., & Bronkala, W. J. (1993). The selection and application of magnetic separation equipment. Part II. *Magnetic and Electrical Separation*, 4(3), 151-172.
3. Rayner, J. G., & Napier-Munn, T. J. (2000). The mechanism of magnetics capture in the wet drum magnetic separator. *Minerals Engineering*, 13(3), 277-285. DOI:10.1016/S0892-6875(00)00007-8
4. Бондарь А.И., Дегтярь С.М., Павленко С.А., Смоляков В.А., Юдин А.Ю. (2010). Измерение расхода жидкости с помощью ультразвукового расходомера. *Механіка та машинобудування*, 2, 189-193.
5. Trosnikov, D., & Zhuk, V. (2008). Raskhodometry: printsipy raboty i opyt ekspluatatsii [Flow: operating principles and operating experience]. *Energetika i TEK [Power and Energy]*, 2008, 4(61).
6. Yeung, H. (2003). Editorial to: multiphase flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14, 137. DOI: 10.1016/S0955-5986(03)00043-8.

7. **Khlebnova, V.I.** (2016). Methods and instruments for measuring the rate of liquids and gases: prospects of application of ultrasonic transducers with a wide measuring beam. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 9 (678). 45-52. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-45-52.
8. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp. Metallurgical and Mining Industry. 2014. 6(6), с. 8-11.
9. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A..** (2015) The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp. Ultrasonics, Volume 56, p.p. 340-343.
10. **Splichal, J., & Hlinka, J.** (2018). Modelling of health monitoring signals and detection areas for aerospace structures. Proceedings of 13th Research and Education in Aircraft Design. 170-188.
11. **Шупов Л. П.** Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. М.: Недра, 1980. 288 с.

Рукопис подано до редакції 29.03.2021

УДК 658.652.64.622.3

А.А. АЗАРЯН, В.С. МОРКУН, доктори технічних наук, професори, Д. В. ШВЕЦЬ, ст. викл., О. В. ЧЕРКАСОВ, ст. наук. співроб., А.М. ГРИЦЕНКО, О.В. ШВИДКИЙ, наукові співробітники Криворізький національний університет

ПОШУК ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ І РОЗУБОЖЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Мета. Аналіз існуючих та виявлення оптимальних шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини.

Методи дослідження. Пропонується для зниження втрат та розубоження залізорудної сировини застосовувати комплекс організаційно-технічних заходів, що складається з вибору системи відпрацювання родовища, буропідричних робіт, випуску руди з дучок, каротажу вибухових свердловин та інклінометрії.

Наукова новизна. Основним елементом зазначеного комплексу організаційно-технічних заходів є застосування електронного інклінометра з модулем, який являє собою сукупність акселерометра, гіроскопа і магнітометра. Додатково в ньому розміщений мікроконтролер управління модулем, який відповідає за виконання математичних розрахунків для передачі готових даних з датчика. Акселерометр відповідає за вимірювання проекції прискорення та кута нахилу пристрою, гіроскоп застосовується для стабілізації вихідного сигналу нахилу, магнітометр реалізує вимірювання вмісту магнітного заліза в залізорудній сировині. Додатково використовується окремий, незалежний пристрій зі спеціально розробленим програмним забезпеченням, що дозволяє по протоколу обміну і з використанням механізму переривань здійснювати взаємозв'язок з модулем, що містить акселерометр, гіроскоп та магнітометр. Взаємозв'язок цих пристроїв дозволяє проводити налаштування як в цілому модуля, так і окремо акселерометра, гіроскопа та магнітометра, проводити калібрування модуля, а також отримувати результати проведених вимірювань і розрахунків.

Практичне значення. Для оптимізації технологічних параметрів залізорудної сировини в умовах підземного видобутку при використанні похилих свердловин для буровибухових робіт необхідне застосування інклінометрії. Запропонований інклінометр із застосуванням акселерометра, гіроскопа та магнітометра дозволяє збільшити точність вимірювань та підвищити інформативність процесу інклінометрії.

Результати. Розроблено функціональну схему інклінометра із застосуванням акселерометра, гіроскопу та магнітометра. Попередні розрахунки дозволяють прийти до висновків, що застосування інклінометрії при підземному видобутку руд дозволить знизити планові показники засмічення на 3,0%, втрати руд на 5,0%, і забезпечити підвищення вмісту заліза на 2,0%.

Ключові слова: залізорудна сировина, інклінометрія, розубоження, акселерометр, гіроскоп, магнітометр.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-15-19

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Частка України в світовому виробництві залізної руди становить близько 6%. На території України знаходиться 20% світових запасів залізної руди. За запасами залізорудної сировини Україна посідає перше місце в світі, а за обсягами виробництва – сьоме.

Кривбас є центром гірничо-металургійного комплексу України. Економічний потенціал нашої держави в значній мірі залежить від стану гірничо-металургійної промисловості [1, 2].

Річний обсяг відкритого і підземного видобутку залізорудної сировини в Кривбасі сягає понад 60 млн. тонн. Разом з тим, високі темпи розвитку промисловості вимагають збільшення обсягів видобутку руд. Балансові запаси багаті руди Кривбасу із середньою масовою часткою заліза 56,7% складають 1,5 млрд тонн, а залізистих кварцитів із середньою масовою часткою заліза 34,3% - 18 млрд тонн.