

DOI: 10.31319/2519-8106.1(46)2022.258442

УДК 622.271:622.236

П.М. Щербаков, к.т.н., доцент, shcherbakov.p.m@nmu.one

О.О. Сдвижкова, д.т.н., професор, sdvyzhkova.o.o@nmu.one

С.Є. Тимченко, к.т.н., доцент, tymchenko.s.ye@nmu.one

Д.В. Клименко, к.т.н., доцент, klymenko.d.vol@nmu.one

НТУ «Дніпровська політехніка», кафедра вищої математики, м. Дніпро

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ДРОБЛЕННЯ І ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Досліджено основні характеристики процесів руйнування залізної руди при одночасному застосуванні до неї механічного навантаження та електричного поля ультрависокої частоти на підставі аналізу математичної моделі, що описує фізичні процеси, які виникають при цьому у кристалах кварцу. Проведено порівняння з випадком застосування лише механічного навантаження. Теоретично доведено, що при наявності двох руйнівних сил (в першому випадку) кристали кварцу накопичують більше енергії, причому цей ефект проявляється найбільше при резонансі. Запропоновано метод механічного дроблення і подрібнення залізної руди з використанням електричного поля ультрависокої частоти. Зроблено гранулометричний аналіз продуктів дроблення і подрібнення залізної руди. За результатами теоретичних та численних експериментальних досліджень обґрунтовано продовження науково-дослідних та конструкторських робіт з адаптації запропонованої щокрової дробарки до виробничих умов.

Ключові слова: дроблення і подрібнення, гранулометричний аналіз, щокрова дробарка.

The main characteristics of the destruction processes of iron ore with its simultaneous effect by mechanical load and electric field of ultra-high frequency to it are studied based on the mathematical model analysis. The model describes the physical processes that arising in this case in quartz crystals. A comparison is made with the case of effect only a mechanical load. It is proved that in the presence of two destructive forces (in the first case), quartz crystals accumulate more energy. This effect is more pronounced at resonance. A granulometric analysis of the crushing and grinding products of iron ore was fulfilled. A method is proposed for mechanical crushing and grinding of iron ore using an electric field of ultra-high frequency. The continuation of research and development work on the proposed jaw crusher adaptation to production conditions is justified on the results of theoretical and experimental studies.

Keywords: crushing and grinding, granulometric composition, jawcrusher.

Постановка проблеми

Механічне дроблення та подрібнення залізної руди є енергоємним процесом, що вимагає використання великих ресурсів гірського підприємства, тому його вдосконалення є актуальним (особливо подрібнення). У процесі збагачення залізної руди процеси дроблення та подрібнення застосовуються для розкриття зростків (з'єднань) породи, щоб полегшити та збільшити вихід заліза з концентрату. Розрізняють кілька способів дроблення: механічний, пневматичний, аеродинамічний (струменевий) та ультразвуковий. Найбільш поширений механічний спосіб дроблення залізняку в силу технологічності в умовах потужних гірничорудних підприємств. Рационально метод дроблення підбирати, виходячи з властивостей та цінностей мінеральних зерен, що входять до складу залізної руди.

Моделювання інтенсифікації дроблення та подрібнення залізної руди з урахуванням взаємодії породи з електромагнітним полем УВЧ дозволяють оцінити характеристики процесів дроблення та подрібнення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Попит на вдосконалення методів дроблення та подрібнення скельних порід, оптимізацію управління цими технологічними процесами зазначає та підтримує Маринич І.А.[1]. Велику увагу при цьому приділяє оптимізації управління процесом дроблення, що забезпечує необ-

хідне значення параметрів вихідних руди. Методи дроблення, що використовуються при цьому: механічний і пневматичний на різних стадіях дроблення [1, 2].

Визначення гранулометричного складу гірських порід надають достатнього значення та враховують при виборі типу та параметрів технологічного обладнання китайські фахівці зі збагачення залізняка [3, 4].

Управління процесами дроблення на основі контролю гранулометричного складу руди забезпечить збільшення продуктивності та зниження енерговитрат на дроблення [2].

Наведені публікації свідчать про актуальність досліджень і модернізації, які пов'язані з урахуванням властивостей залізної руди та гірських порід у цілому, а також щодо пристроїв дроблення і подрібнення. Електричне поле УВЧ в процесах дроблення і подрібнення не використовують.

Виклад основного матеріалу

Запропоновано спосіб інтенсифікації дроблення кварцовмісних порід (зокрема залізних руд) спільним застосуванням до них механічного навантаження та електричного поля УВЧ [5]. Відмінною особливістю взаємодії залізної руди з електромагнітним полем є її мінеральний склад, що включає кристали кварцу, гематиту, магнетиту та ін. При цьому кожен кристал окремо за механічними, електричними та магнітними властивостями є анізотропним стосовно інших.

Нехай середовище складається тільки з кристалів кварцу, кожне зерно має електричну вісь (п'єзовісь). Це дає змогу врахувати прямий та зворотний п'єзоэффект. Кварц відноситься до іонних кристалів, тому будь-який його атом або іон може однаково взаємодіяти з усіма сусідніми атомами або іонами. Отже, весь кристал можна розглядати як окремий кристалічний осередок і пролонгувати аналізований ефект на весь кристал. З іншого боку, кожен кристал кварцу має набір резонансних частот. Прийняте припущення дозволяє використовувати модель гармонійного осцилятора [6, 7], що відображає фізичні процеси, які з'являються при цьому у кристалах кварцу. Математична модель гармонійного осцилятора має вигляд [8]:

$$My'' + \gamma y' + M\omega_0^2 y = \vec{F}_1 t \cos \omega t + \vec{F}_2 t \cos \omega t + \vec{F}_3 t, \quad (1)$$

де M — приведена маса іонів; y — зміщення позитивних та негативних іонів щодо кристалічної решітки; γ — коефіцієнт згасання; ω_0 — власна циклічна частота коливань осцилятора; ω — циклічна частота коливань електричного поля; t — час синусоїдальної зміни електричного поля, що діє на кристал.

$$F_1 = \alpha_1 A_0 P v; \quad F_2 = \alpha_2 A_0; \quad F_3 = P v, \quad (2)$$

де α_1, α_2 — коефіцієнти пропорційності; A_0 — амплітуда коливань електричного поля; P — величина механічного навантаження, що прикладається; v — швидкість навантаження.

Обмежуючись нагодою слабого згасання (при $\gamma \ll \omega_0$), отримуємо наступний розв'язок цього рівняння [9]:

$$y = (F_1 t + F_2) \frac{A}{M} \sin \omega t + (F_1 t + F_2) \frac{B}{M} \cos \omega t + \frac{F_3}{M \omega_0^2} t, \quad (3)$$

де

$$A = \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad B = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \quad (4)$$

При цьому постійна $A_{\text{ап}} = \frac{F_1 A}{M}$ у розв'язку (3) називається амплітудою поглинання і $A_{\text{ад}} = \frac{F_1 B}{M}$ — амплітудою дисперсії (пружною амплітудою).

Енергія, яку накопичує кристал кварцу при спільному їх навантаженні механічним навантаженням та електричним полем УВЧ, визначається сумою кінетичних та потенційних енергій відповідних осциляторів

$$E_{\text{сов}} = \frac{D}{4M} (F_1 t + F_2)^2 + \frac{F_3^2}{2M \omega_0^2} t^2, \quad (5)$$

де $D = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$.

Досліджуючи вираз (5) на існування екстремуму, знаходимо

$$\omega = \sqrt{2\omega^2 \sqrt{1 - \frac{\gamma^2}{4\omega_0^2}} - \omega_0^2}. \quad (6)$$

Звідси випливає, що за прийнятої умови ($\gamma \ll \omega_0$) резонанс буде мати місце, якщо $\omega = \omega_0$.

У цьому випадку амплітуда дисперсії $A_{ад} = 0$, а амплітуда поглинання $A_{ап}(4)$ досягає максимального значення [10].

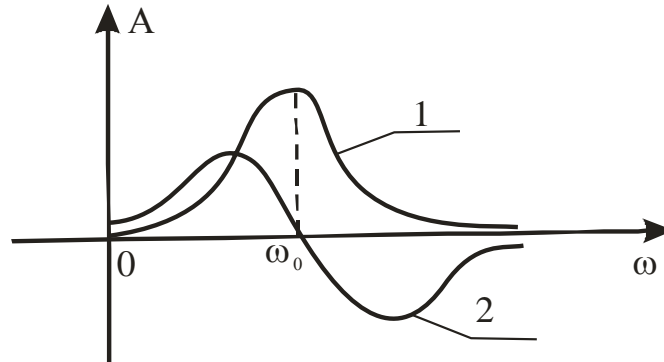


Рис. 1. Схематичний графік зміни амплітуди поглинання $A_{ап}$ (1) та амплітуди дисперсії $A_{ад}$ (2) від циклічної частоти коливачів електричного поля УВЧ

З рис. 1 видно, що середнє за часом значення поглиненої осцилятором потужності визначається компонентою $A_{ап} = \sin\omega t$. Компонента $A_{ад} = \cos\omega t$ дає певний внесок у миттєве значення поглинаємої потужності $P(t)$, проте, в середньому її внесок за цикл коливачів, що встановилися, дорівнює нулю.

Розглянемо вираз (5), у якому другий доданок представляє енергію, накопичувану кристалом при чисто механічному навантаженні, тобто

$$E_{мех} = \frac{F_3^2}{2M\omega_0^2} t^2. \quad (7)$$

З порівняння (5) і (7) випливає, що всі кристали кварцу при спільному застосуванні до них механічного навантаження та електричного поля УВЧ накопичують енергії більше, ніж при чисто механічному навантаженні в цьому ж режимі навантаження ($E_{сов} > E_{мех}$). Цей ефект проявляється найсильніше при резонансі.

Нехай руйнування настає тільки за рахунок механічного навантаження ($E_{мех} = E_{кр}$). Скористаємося виразом (7), позначивши $t = t_1$

$$E_{кр} = \frac{F_3^2}{2M\omega_0^2} t_1^2. \quad (8)$$

Прирівнюємо вирази (8) та (5), в якому позначимо $t = t_2$

$$E_{сов} = E_{кр} \quad \text{або} \quad \frac{D}{4M} (F_1 t_2 + F_2)^2 + \frac{F_3^2}{2M\omega_0^2} t_2^2 = \frac{F_3^2}{2M\omega_0^2} t_1^2. \quad (9)$$

Звідки

$$\frac{D}{4M} (F_1 t_2 + F_2)^2 = \frac{F_3^2}{2M\omega_0^2} (t_1^2 - t_2^2). \quad (10)$$

Ліва частина рівняння (10) завжди позитивна, тоді має виконуватися нерівність $t_1 > t_2$.

Таким чином, час досягнення критичного навантаження, при якому настає руйнування, менше при спільній дії механічного навантаження та електричного поля УВЧ у порівнянні з часом руйнування при чисто механічному навантаженні [11].

Отримані результати теоретичних досліджень можна пояснити статистичною теорією руйнації. Відповідно до неї в середовищі із збільшенням енергії поглинання зростає кількість «ослаблених» місць, у яких зароджуються тріщини, отже, скорочується час їх змикання. За рахунок цього збільшується кількість окремоостей, які утворюються в даному об'ємі, що, безумовно, призводить до зменшення їх розмірів і, зрештою, до інтенсивнішого дроблення середовища.

З метою перевірки та уточнення висновків, зроблених у результаті теоретичних досліджень, проведено лабораторні випробування на зразках залізних руд Полтавського та Криворізького ГЗК. Встановлено, що їх резонанс спостерігається на частотах від 41,5 до 43 МГц. Центральна частота резонансу становить 42,3 МГц. Крім того, резонансна частота зазначених руд з послідовно включеною індуктивністю 0,5 мкГн дорівнює 24,5 МГц, причому резонансні властивості на цій частоті виражені більш істотно.

Розроблений та виготовлений експериментальний зразок генератора резонансної частоти, призначений для роботи на погоджене навантаження 750 Ом.

Генератор має такі параметри:

- потужність на виході на узгоджене навантаження не менше 200 Вт;
- робоча частота перебудовується в діапазоні 20—50 МГц;
- режим роботи безперервний та імпульсний, що перебудовується з частотою від 3 до 10 кГц;
- свердловинність від 2 до 10;
- напруга живлення 200В, 50 Гц.

Генератор виконаний за чотирикаскадною схемою, його функціональна схема представлена на рис. 2. До складу генератора входять джерела живлення (ІП1, ІП2), відповідно на напруги +5В, +30В, +60В і +1000В, +300В, ~ 6,3В, а також збудник (В), імпульсний модулятор (ІМ), підсилювач (ПУ), трансформаторний узгоджувальний підсилювач (ТСУ), вихідний каскад (ВК) — трансформаторний двокаскадний підсилювач.

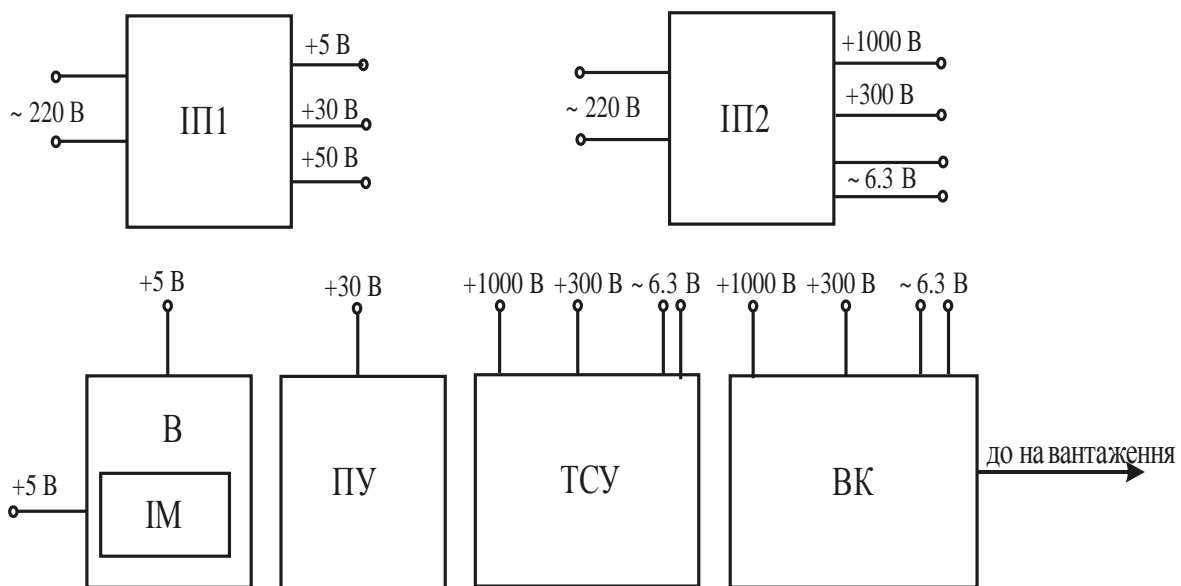


Рис. 2. Функціональна схема генератора УВЧ

До складу цього генератора між його входом та навантаженням включені узгоджувальні індуктивності та паралельно навантаженню — конденсатор. Ці пристрої дозволяють використовувати генератор на будь-яке навантаження з умовою використання 0,8 від максимальної потужності.

В умовах навчально-виробничої майстерні університету виготовлено експериментальну шокуючу дробарку, що дозволяє дробити шматки довільної форми з максимальними розмірами 60—80 мм та ступенем дроблення 4—5 [12]. При підключеному генераторі УВЧ вона реалізує одночасно механічне навантаження та дію електричного поля з резонансною частотою (рис. 3).

Для проведення лабораторних експериментів руда порівняно витриманого складу поділялася попарно на групи, що складаються з шматків однакової маси (табл. 1).

Руйнування зразка з кожної групи робили шляхом механічного навантаження, потім одночасно використовували механічне навантаження та електричне поле УВЧ на експеримента-

льній дробарці. Зразки, роздроблені за вказаною методикою, піддавалися подальшому (дрібно-му) дробленню на лабораторній шоковій дробарці типу ДЛЩ 150×80 з розвантажувальною щілиною 3 мм. За допомогою статистичної обробки результатів цих експериментів [7] отримані порівняльні дані щодо кожної контрольованої фракції дроблення (табл. 2).

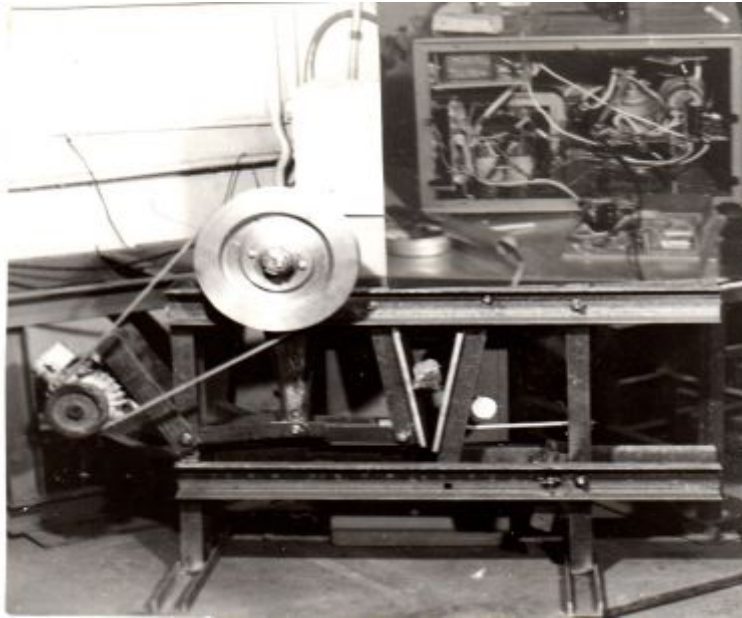


Рис. 3. Лабораторна шокова дробарка з розташованим на ній генератором УВЧ

Таблиця 1. Умовні групи зразків залізної руди

Номер групи	1	2	3	4	5
Маса зразка, г	1100	1000	700	600	180

Таблиця 2. Гранулометричні склади продуктів дрібного дроблення залізної руди

№ групи	Режим навантаження	Розподіл у % окремих фракцій, мм					
		+50	-50 +30	-30 +20	-20 +10	-10 +0.63	-0.03
I	Без УВЧ	18.8	35.0	17.0	14.8	0.4	14.0
	З УВЧ	24.9	35.1	13.8	13.6	0.6	12.0
II	Без УВЧ	21.9	33.3	16.7	15.3	0.5	12.3
	З УВЧ	28.3	35.5	13.9	12.0	0.5	9.8
III	Без УВЧ	18.9	35.5	16.0	16.2	0.5	12.9
	З УВЧ	11.9	30.7	20.0	19.8	1.0	16.6
IV	Без УВЧ	26.0	38.0	14.1	11.9	0.4	9.6
	З УВЧ	26.5	37.0	14.4	12.3	0.5	9.3
V	Без УВЧ	34.4	33.8	11.7	11.3	0.4	8.4
	З УВЧ	16.1	36.9	16.8	16.5	0.4	13.3
Середні значення	Без УВЧ	24.0	35.12	15.1	13.9	0.44	11.44
	УВЧ	21.54	35.04	15.78	14.84	0.6	12.2
В % до дроблення без УВЧ		82.75	99.77	104.5	106.76	136.36	106.6

Подрібнення продуктів дрібного дроблення здійснювалося в кульовому млині типу МБЛ — (75А—МС) з об'ємом 14 L при ступені заповнення кулями $\phi = 0.45$. Швидкість обертання барабана млина $\vartheta = 0.7$ від критичної, час подрібнення вибирався таким чином, щоб забезпечити крупність подрібнення близьку до першої стадії подрібнення на гірничо-збагачувальному комбінаті. Продукти подрібнення поділялися на п'ять класів. У кожному класі визначався вміст заліза з наступним усередненням результатів по даній пробі (табл. 3).

Таблиця 3. Дані гранулометричних та хімічних аналізів продуктів подрібнення залізної руди

№ групи	Режим навантаження	Вихід за класами, %					Fe, %
		+4	-4 +2	-2 +1	-1 +0.63	-0.63	
I	Без УВЧ	0	7.2	16.0	15.7	61.1	41.8
	з УВЧ	0	5.5	15.1	11.2	68.2	44.3
II	Без УВЧ	0	12.2	16.8	13.5	57.5	26.7
	з УВЧ	7.5	16.2	15.0	10.2	51.1	27.0
III	Без УВЧ	0	6.3	16.3	13.8	63.6	21.3
	з УВЧ	0	2.7	11.2	11.0	75.1	25.3
IV	Без УВЧ	0	4.9	18.7	17.4	59.0	36.0
	з УВЧ	2.6	12.8	18.5	18.7	47.4	33.6
V	Без УВЧ	0	0	10.1	14.3	75.6	18.2
	з УВЧ	0	4.5	11.6	17.0	66.9	28.2
Середні значення	Без УВЧ	0	6.12	15.58	14.94	63.36	28.8
	з УВЧ	2.02	8.34	14.28	13.62	61.74	31.68

Як випливає з табл. 2 і 3, при дії механічного навантаження одночасно з електричним полем УВЧ зберігається тенденція інтенсифікації дроблення залізної руди за рахунок зниження виходу великих та підвищення виходу дрібних фракцій, а також спостерігається збільшення вмісту заліза до 11 % у продуктах її подрібнення.

Висновки

Побудовано математичну модель фізичного процесу, що виникає в кварцовмісних породах. Досліджено основні характеристики процесів руйнування залізної руди при впливі на неї механічного навантаження та при одночасному впливі на неї механічного навантаження та електричного поля ультрависокої частоти. Наведені результати теоретичних та численних експериментальних досліджень свідчать про реальну перспективу створення ефективних технологій дроблення та подрібнення залізної руди в виробничих умовах. Запропонована конструкція нової шокової дробарки, яка реалізує дію електричного поля УВЧ на кожен монолітну окремість, що знаходиться в її робочому просторі. Надалі передбачено науково-дослідні та конструкторські роботи з її застосування на одній із стадій дроблення залізної руди.

Список використаної літератури

1. Маринич И.А. Адаптивное согласованное управления дробильноизмельчительным комплексом на базе структуры с распределенными параметрами функции сокращения крупности руды. *Вісник Криворізького технічного університету*. Збірник наукових праць, Кривий Ріг, 2012. № 31. С. 225–228.

2. Маринич И.А. Савицкий А.И. Распределенная система автоматического управления рудо-подготовкой на базе промышленных контроллеров. [е-ресурс]. URL: <https://docplayer.com/128244873-Udk-marinich-i-a-knu-savickiy-a-i-pao-nipi-mehanobrchermet.html> (дата звернення 23.01.22)
3. Zhang Z., Yang J., Dou D. A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2014. Vol. 50(2). P. 591–605. URL: https://www.researchgate.net/publication/286013581_A_surface_probability_model_for_estimation_of_size_distribution_on_a_conveyor_belt (дата звернення 23.01.22)
4. Zhang Z., Yang J., Su X., Ding L. Analysis of large particle sizes using a machine vision system. *Physicochemical Problems Mineral Processing*, 2013. Vol. 49, issue 2. P. 397–405. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-410d7c2e-ccaf-4c7d-8d35-73c3f5528f96> (дата звернення 23.01.22)
5. А.С.№ 1659100, В 02 С 19/18.Способ дробления кварцесодержащих пород.Крысин Р.С., Щербаков П.Н. (СССР) – 4667933/33;27.01.89
6. Pain H. (2005) *The Physics of Vibrations and Waves*. Hardcover. 389 p.
7. Crawford F. (1968) *Waves*. Berkeley Physics Course, Volume 3. New York: Mcgraw-Hill College. 527 p.
8. Щербаков П.Н. Теоретические предпосылки интенсификации дробления и измельчения твердых пород. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Харків, 2012. №59. <http://archive.kpi.kharkov.ua/files/29520/> (дата звернення 23.01.22)
9. Shcherbakov P., Klymenko D., Tymchenko S. Statistical research of shovel excavator performance during loading of rock mass of different crushing quality. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2017. Vol 1, P. 49–54.
10. Щербаков П.Н., Бугрим О.В., Тимченко С.Е., Клименко Д.В. Статистические исследования качества дробления железной руды буровзрывным способом на карьерах. Материалы XIV международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании». Варна, 2019. Том 1, С. 227–232.
11. Shcherbakov P., Tymchenko S., Buhrym O., Klymenko D. Research into the crushing and grinding processes of iron ore with its simultaneous effect by mechanical load and electric field of ultra-high frequency. *E3S Web of Conferences* 123, 01030, 2019. Vol. 123. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301030>
12. Дробарка; пат. 19876 Україна, В020 19/18/ Крысин Р.С., Щербаков П.М., Арсентьев В.О. № 93006556, 09.04.93.

MATHEMATICAL MODELING OF THE CRUSHING AND GRINDING INTENSIFICATION OF THE IRON ORE

Shcherbakov P., Sdvizhkova E., Tymchenko S., Klymenko D.

Abstract

A mathematical model of the physical process that occurs in quartz-bearing rocks is constructed. The main characteristics of the destruction processes of iron ore with its simultaneous effect by mechanical load and electric field of ultra-high frequency to it (the first case) are researched based on the mathematical model analysis. The model of the destruction process of iron ore only under the mechanical load effect is considered.

The mathematical model analysis shows that quartz crystals accumulate more energy in the first case, and this effect is most pronounced at resonance. A comparison is made with the case of effect only a mechanical load. The tendency to reduce the output of large fractions and increase the output of fine fractions continues and the iron content in the grinding products increases to 11%.

A method for mechanical crushing and grinding of iron ore using an electric field of ultra-high frequencies is proposed.

The continuation of research and development work on the proposed jaw crusher adaptation to production conditions is justified on the results of theoretical and experimental studies.

References

- [1] Marinich, I.A. (2012) Adaptivnoye soglasovannoye upravleniye drobil'noizmel'chennym kompleksom na baze struktury s raspredelennymi parametrami funktsii sokrashcheniya krupnosti rudy. *Visnyk Kryvorizkogo tekhnichnogo universitetu*. Zbirnyk naukovykh prac, Kruiy Rig. № 31. P. 225–228.
- [2] Marinich, I.A., Savickiy, A.I. Raspredelennaya sistema avtomaticheskogo upravleniya rudopodgotovkoy na baze promyshlennykh kontrollerov. [e-resource]. Retrieved from URL: <https://docplayer.com/128244873-Udk-marinich-i-a-knu-savickiy-a-i-pao-nipi-mehanobrchermet.html> (23.01.22).
- [3] Zhang Z., Yang J., Dou D. (2014) A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. Vol. 50(2). P. 591–605. Retrieved from URL: https://www.researchgate.net/publication/286013581_A_surface_probability_model_for_estimation_of_size_distribution_on_a_conveyor_belt (23.01.22).
- [4] Zhang Z., Yang J., Su X., Ding L. (2013) Analysis of large particle sizes using a machine vision system. *Physicochemical Problems Mineral Processing*. Vol. 49, issue 2. P. 397–405. Retrieved from URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-410d7c2e-ccaf-4c7d-8d35-73c3f5528f96> (23.01.22).
- [5] Krysin, R.S., Shcherbakov, P.N. (1989) Sposob drobleniya kvarcsoderzhashchih porod. *Certificate of authorship № 1659100*, USSR. B 02 C 19/18., 4667933/33; 27.01.89.
- [6] Pain, H. (2005) *The Physics of Vibrations and Waves*. Hardcover, 389.
- [7] Crawford, F. (1968) *Waves*. Berkeley Physics Course, Volume 3. New York: McGraw-Hill College, 527
- [8] Shcherbakov, P.N. (2012) Teoreticheskiye predposylki intensivatsii drobleniya i izmelcheniya tverdykh porod. *Visnyk NTU «HPI»*. Zbirnyk naukovykh prac, Harkiv. №59. Retrieved from URL: <http://archive.kpi.kharkov.ua/files/29520/> (23.01.22).
- [9] Shcherbakov, P., Klymenko, D., Tymchenko, S. (2017) Statistical research of shovel excavator performance during loading of rock mass of different crushing quality. *Scientific Bulletin of National Mining University*. Vol 1. P. 49–54.
- [10] Shcherbakov, P., Buhrym, O., Tymchenko, S., Klymenko, D. (2019) Statisticheskie issledovaniya kachestva drobleniya zheleznoy rudy burovzryvnym sposobom na kar'erah. *Materialy XIV mezhdunarodnoy konferentsii "Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii"*, Varna, tom 1, 227-232 [in Russian].
- [11] Shcherbakov, P., Tymchenko, S., Buhrym, O., Klymenko, D. (2019) Research into the crushing and grinding processes of iron ore with its simultaneous effect by mechanical load and electric field of ultra-high frequency. *E3S Web of Conferences* 123, 01030. Vol. 123. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301030>
- [12] Krysin, R.S., Shcherbakov, P.M., Arsent'ev, V.O. (1993) Drobarka. Pat. 19876, Ukraine, B020 19/18/ № 93006556, 09.04.93.