

УДК 622.27

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн. наук, доц., О.Б. ТОМАШЕВСЬКИЙ, магістрант
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОЇ ФОРМИ ОЧИСНОЇ КАМЕРИ ПРИ РОЗРОБЦІ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ

За результатами виконаного аналізу існуючих запасів Криворізького залізорудного басейну встановлено, що розвіданих запасів залізних руд нараховується понад 23,5 млрд т, з них перспективних до розробки підземним способом близько 13,5 млрд т. В умовах діючих підприємств з підземним видобутком залізних руд нараховується понад 5,0 млрд т магнетитових кварцитів. З метою збереження денної поверхні, а також головних розкривних виробок встановлено, що розробка магнетитових кварцитів в умовах діючих підприємств з підземним способом видобутку доцільна системами з закладкою виробленого простору. При застосуванні даного класу систем розробки виникає проблема стійкості очисних камер у період від початку її відробки до повної її закладання твердими сумішами. В лабораторних умовах на моделях з використанням еквівалентного матеріалу досліджували як впливає термін існування на стійкість очисних камер прямокутної, шагрової та склепистої форм. За результатами лабораторних досліджень встановлено, що раціональна форма очисної камери з умови її стійкості та терміну існування є склепінна у верхній її частині. Достовірність результатів моделювання підтверджується високою збіжністю отриманих значень.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Криворізький залізорудний басейн представлений покладами багатих і бідних руд. Розробка родовищ Криворізького басейну на даний час здійснюється відкритим і підземним способами. В умовах діючих залізорудних підприємств з підземним способом розробки загальна кількість балансових запасів багатих руд складає 1,5 млрд т, а розвіданих бідних понад 5,0 млрд т.

Для подальшого успішного функціонування підземних гірничих підприємств з видобутком багатих руд необхідно виконати модернізацію та технічне переоснащення комплексів підйому, вентиляції, водовідливу, а також переглянути існуючі способи видобутку корисних копалин, а також розробка бідних руд (магнетитових кварцитів).

Розробка магнетитових кварцитів дозволить отримати додатково значні запаси, але їх розробка традиційними існуючими технологія зробить видобуток не ефективним. Для збереження денної поверхні необхідно застосовувати систему розробки з закладкою виробленого простору. При використанні твердого закладки необхідно забезпечити стійкість очисним камерам на термін доки твердіюча суміш не набере необхідну межу міцності.

Таким чином, при застосуванні камерних систем розробки з закладкою забезпечення очисним камерам додаткової стійкості є актуальним питанням, яке потребує вирішення.

Аналіз досліджень і публікацій. Криворізький залізорудний басейн розташований в районі річки Інгулець і лівих приток річок Саксагань та Жовта. Він складається комплексом кристалічних порід залізистої формації, що залягають серед гранітів вузькою смугою метаморфічних порід, витягнутих з півдня на північ в субмеридіальному напрямку, протяжністю понад 100 км і є складовою частиною Криворізько-Кременчугської структурно-фаціальній зони.

Комплекс порід Криворізької серії зім'ятий в складки меридіонального простягання і утворює велику складчасту структуру, яка складається з наступних серій свит: Новокриворізька (Nk), Склеюватська (Sk), Саксаганська (Sx), Гданцівська (Gd) та Глеюватська (Gl).

Основною рудоносною товщею, що розробляється відкритим та підземним способами є Саксаганська свита (PR_1Sx), яка представлена сім'ю сланцевими та сім'ю залізистими пластами, які чергуються між собою. Залізисті пласти складені мартитовими, гетіт-гематит-мартитовими, силікат-карбонат-магнетитовими, магнетитовими, силікат-магнетитовими та іншими рудами потужністю від 4 до 150 м та з середнім вмістом заліза 58-62 % та бідних руд (магнетитових кварцитів) - 26-35 %.

На теперішній час в Криворізькому залізорудному басейні успішно функціонує 7 гірничо-видобувних підприємств, з них: 5 - з відкритим способом розробки і 4 - підземним способом, табл. 1.1 [1-7].

З табл. 1.1 видно, що у межах діючих підприємств зосереджено близько 8,78 млрд т балансових запасів багатих і бідних руд, які можливо відпрацювати існуючими технологіями. Розробка 7,68 млрд т потребує удосконалення технології, або перехід на комбіновану відкрито-

підземну розробку при видобутку бідних руд, або будування другої ступені розкриття при розробці багатих руд підземним способом.

Запасів залізистих кварцитів в межах діючих підприємств з відкритим та підземним способами складають біля 10,8 млрд т, у тому числі балансових запасів нараховується понад 7,65 млрд т. Відробку 3,2 млрд т запасів магнетитових кварцитів, які не доцільно розробляти на теперішній час відкритим способом, доцільно відпрацьовувати комбінованою відкрито-підземною розробкою, що дозволить гірничим підприємствам подовжити свою роботу ще на 50-100 років.

Таблиця 1

Залізородні гірничо-видобувні підприємства та запаси залізних руд Криворізького басейну станом на 2012 р.

Гірничо-видобувне підприємство	Гірничо-видобувний комплекс	Глибина гірничих робіт, м	Запаси в межах родовища, млн.т	
			балансові	забалансові
Розробка бідних руд				
ПАТ "ПівнГЗК"	Ганнівський кар'єр	275	500	340
	Першотравневий кар'єр	400	710	480
	Шахта "Першотравнева"*	920	550	650
ПАТ "ІнГЗК"	Інгулецький кар'єр	395-440	440	140
ПАТ "ПівдГЗК"	Південний кар'єр	325-350	1800	600
ПАТ "ЦГЗК"	Глєватський кар'єр	395	710	350
	Петровський кар'єр	305		
	Артемовський кар'єр	185		
	Шахта ім.Орджонікідзе	527	110	120
	Шахта "Гігант-Глибока"*	710	180	295
ПАТ"АрселорМіттал Кривий Ріг"	Кар'єр №2-біс	225	2650	235
	Кар'єр №3	300		
Разом			7650	3210
Розробка багатих руд				
ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"	Шахта ім. Артема №1	1045	120	400
ПАТ "Свраз Суха Балка"	Шахта "Ювілейна"	1260	160	-
	Шахта ім. Фрунзе	1135	40	-
ПАТ "Кривбасзалізрудком"	Шахта "Родіна"	1390	160	1150
	Шахта "Октябрська"	1265	570	2860
	Шахта ім.Леніна	1350	80	60
	Шахта "Гвардійська"	1270	100	400
Разом			1130	4470
Поклади магнетитових кварцитів (законсервовані)				
Міжруднична дільниця №1	між ш."Родіна" та ш."Октябрська"	до 1500	-	880
Міжруднична дільниця №2	між ш. ім. Фрунзе та ш."Ювілейна"	до 1500	-	1250
Міжруднична дільниця №3	між ш. "Ювілейна" та ш. "Гвардійська"	до 1500	-	2000
Міжруднична дільниця №4	між ш. "Гвардійська" та ш. ім. Леніна	до 1500	-	1370
Міжруднична дільниця №5	між ш. ім. Леніна та ПівнГЗК	до 1500	-	1500
Разом			-	7000
Всього			8780	14680

Примітка: * - суха консервація гірничо-видобувного комплексу

Балансові запаси багатих залізних руд, підраховані до глибини 1500-2100 м, становлять понад 5,6 млрд т, у тому числі промислових категорій - 1,13 млрд т. Неосвоєними з цих запасів, є лише Східно-Скелюватська ділянка та частина родовищ НкГЗК, яка виступає охоронним цілком річки Інгулець.

Шахтні поля Криворізького басейну мають неоднакову забезпеченість запасами багатих залізних руд. Протягом найближчих 30 років шахти південної групи допрацюють свої запаси, в той час як деякі рудники північної групи працюватимуть більше 30 років. Зі збільшенням глибини розробки значною мірою погіршуються геологічні та гірничотехнічні умови; зменшуються запаси багатих руд; знижується якість залізної руди, підвищується горський тиск, що викликає збільшення трудових і матеріальних витрат, значно збільшуються витрати на додаткову

проходку виробок, підземний транспорт, вентиляцію, водовідлив, шахтний підйом та ін.

Загальні прогнози запаси залізистих кварцитів тільки в полях діючих шахт та в міжрудникових ділянках Саксаганської світи становлять близько 43,0 млрд т, у тому числі магнетитових кварцитів близько - 14,68 млрд т (з бортовим вмістом заліза магнетитового 20%). У полях діючих шахт магнетитові кварцити залягають, в основному, в лежачому боці покладів багатих руд і в окремих випадках, наприклад, на шахтах "Ювілейна, "Гвардійська" та ім. Леніна - в одних стратиграфічних горизонтах.

Постановка завдання. Одним із заходів щодо збільшення запасів залізорудної сировини та термінів забезпеченості ними рудників є залучення у видобуток підземним способом магнетитових кварцитів, що залягають у полях діючих шахт і в проміжках між ними з подальшим їх збагаченням. Для видобутку магнетитових кварцитів в полях існуючих шахт, де є резерви підйомних можливостей, достатньо пройти додаткові відкотні виробки від існуючих і нині вже не використовуваних квершлагів, оскільки видобуток цих кварцитів може бути розпочато з глибини нижче зони окислення.

Слід враховувати те, що діючі стволи шахт перетинають товщу магнетитових кварцитів, а поверхня в районі їх розташування густо забудована технологічними комплексами шахт, під'їзними залізничними коліями та шляхами Придніпровської залізниці, житловими та соціально-культурними об'єктами. У разі відпрацювання магнетитових кварцитів відкритим або підземним способом системами з масовим обваленням руди та денної поверхні, зазначені вище об'єкти на поверхні необхідно перенести на інші ділянки.

Альтернативною системою розробки яка забезпечить збереження денної поверхні при видобутку магнетитових кварцитів є камерна система розробки з закладкою виробленого простору. Застосування камерних систем розробки потребує забезпечення додаткової стійкості порід що налягають.

Отже, необхідно вирішити актуальне питання щодо розробки магнетитових кварцитів Криворізького залізорудного басейну підземним способом шляхом обґрунтування форми очисної камери, що дозволить збільшити строк її існування та забезпечити високі показники вилучення.

Викладення матеріалу та результати. З метою визначення стійких параметрів очисної камери різних форм використовуємо фізичне моделювання з використанням еквівалентних матеріалів на стаціонарних моделях. Аналіз методів моделювання, заснованих на теорії подібності [8-10], приводить до висновку, що для моделювання на статичних моделях необхідно дотримуватись масштаб моделювання [10-12]. Усі розміри досліджуваної системи в натурі й розміри її в моделі будуть змінені у певну кількість разів. Масштаб моделювання C_1 визначається за виразом

$$l'_n / l'_m = l''_n / l''_m = \dots = l^i_n / l^i_m = C_1, \quad (1)$$

де l_m, l_n - лінійні розміри відповідно у моделі й натурі.

У процесі моделювання повне дотримання всіх критеріїв подібності, що забезпечують подібність механічних процесів, неможливо, тому необхідно виділити й забезпечити пропорційність фізичних констант, що мають вирішальне значення для досліджуваного явища.

При моделюванні необхідно дотримання початкового стану системи й подібності умов на границях. Перше (початковий стан системи) досягається дотриманням масштабу моделювання, коефіцієнта розрихлення матеріалу моделі й природи. Друге (умова подоби на границях) – дотриманням коефіцієнта тертя на контактах матеріалу зі стінками моделі. Для цього збільшують шорсткість стінок моделі. Кращим способом досягти відповідності граничних умов є наклеювання матеріалу, що моделюється, на стінки моделі.

Для визначення зсуву порід, а так само навантажень, тиску, які виникають у процесі переміщення гірського масиву, необхідно дотримуватись динамічної подібності. При цьому повинна бути дотримана умова стійкості матеріалів

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + c, \quad (2)$$

де τ - дотичне напруження на заданій площині, т/м²; σ_n - нормальне напруження на заданій площині, т/м²; ρ - кут внутрішнього тертя корисної копалини, град.; c - зчеплення порід.

Основною умовою динамічної подоби є дотримання куту внутрішнього тертя корисної копалини та зчеплення порід, що можливо досягти тільки прикладенням на модель зовнішнього

навантаження. Розрахунок зовнішнього навантаження P_m , яке необхідно прикласти при моделюванні, визначають за формулою, запропонованою Кузнецовим Г.Н. [11]

$$P_m = (P_n l_n^3 \gamma_n) / (l_m^3 \gamma_m), \quad (3)$$

де P_m, P_n - зовнішнє навантаження відповідно в моделі й натурі, т/м²; γ_n, γ_m - об'ємна вага руди відповідно у натурі й моделі, т/м³.

Можливість застосування виразу (3) можливо обґрунтувати тим, що масштаб моделювання виконується тільки для лінійних розмірів моделі й не відповідає в повному обсязі для гранулометричного складу.

Коефіцієнти й кути опору руху руди визначалися за методикою [12-14]. Коефіцієнт опору у цьому випадку визначається за різницею дії сил ваги й сил опору зразку за формулою

$$f = (l_1 \sin \alpha) / (l_1 \cos \alpha + l_2) = h/L = \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

де l_1 - довжина похилої площини, м; l_2 - довжина горизонтальної ділянки шляху, що проходять зразки породи по інерції, м; α - кут нахилу площини, град; h - висота скочування зразка, м; L - проекція сумарного шляху, пройденого зразками на горизонтальну площину, м; φ - кут опору руху, град.

Величина f і φ визначалися для окремих зразків руди (породи) різного гранулометричного складу, для суміші зразків одного розміру, а також для сумішей зразків різного гранулометричного складу. В результаті отриманих даних в процесі лабораторних досліджень побудовані залежності зміни складу еквівалентного матеріалу для отримання наступних параметрів: межі міцності на стискання; модуля пружності та коефіцієнта Пуассона, рис. 1.

Після ув'язування всіх перерахованих факторів, масштаб моделювання приймаємо 1:100, при цьому підбір еквівалентних матеріалів виконується на підставі теорії подібності з урахуванням необхідних встановлених значень див. рис. 1.

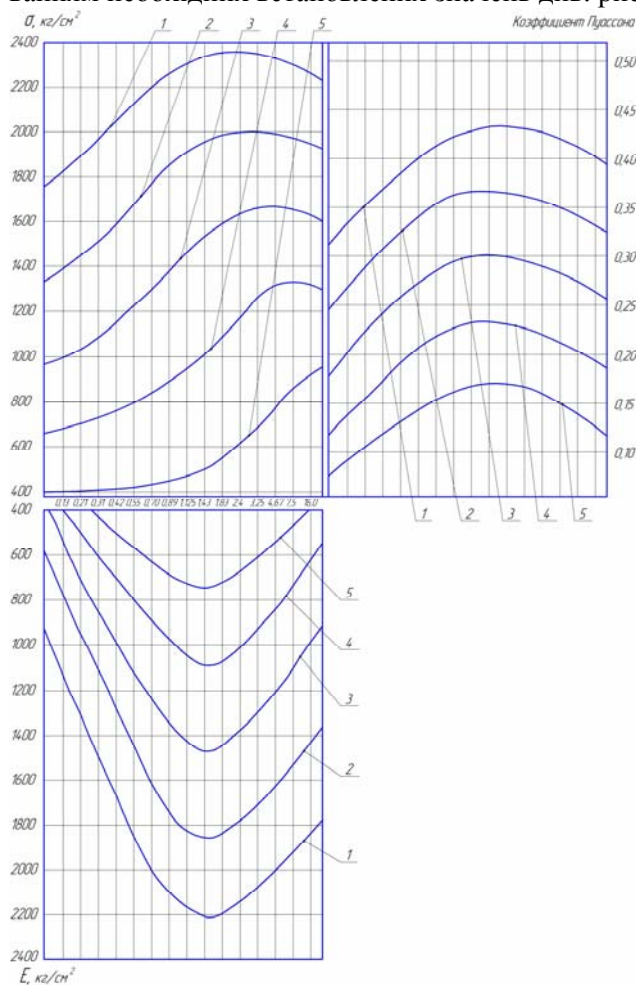


Рис. 1. Номограма по визначенню кількісного складу компонентів еквівалентних матеріалів: 1-5 - склад парафіну відповідно 2,4; 2,2; 2,0; 1,8 и 1,6 %

Тимчасовий опір досліджуваних зразків на стискання виконували відповідно до прийнятого міжнародного стандарту для визначення міцності порід при одноосьовому стиску. Тимчасовий опір досліджуваних зразків визначається за формулою, Н/м²

$$G_{cm} = P/S, \quad (5)$$

де P - руйнівне навантаження, Н; S - площа поперечного перерізу зразка, м².

У лабораторіях ДВНЗ "Криворізький національний університет" були проведені дослідження по стійкості камер різної форми.

При проведенні дослідів гірський масив замінюється еквівалентним матеріалом. Геометричний масштаб моделювання був прийнятий 1:100, а масштаб часу становив 1:10. Еквівалентний матеріал з урахуванням масштабу моделювання підбирався згідно фізико-механічним властивостям гірських порід ш. "Октябрська".

Всього було проведено 8 серій лабораторних експериментів, які відрізняються між собою: формою очисної камери і межею міцності на одноосьовий стиск. Кожен досвід повторювався 3-5 разів. Надійність

отриманих результатів при моделюванні на еквівалентних матеріалах за теоремою множення

ймовірностей незалежних подій визначалася за виразом

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \dots P_n = \sum_{i=1}^n P_n \quad (6)$$

Згідно виконаним розрахунками вертикальний та горизонтальний тиск в моделі приймався відповідно 13,2 і 6,4 кг/см². Радіус склепіння у верхній частині очисної камери визначався за умовою стійкої граничної рівноваги по будь-якому майданчику. Умова стійкої граничної рівноваги описується законом Кулона і має вигляд

$$\tau_{xz} \geq \tau_0 + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \rho, \quad (7)$$

де τ_{xz} - зсувні сили, т/м²; τ_0 - початкове опір зсуву, т/м²; σ_n - нормальне напруження на заданому майданчику, т/м²; ρ - кут внутрішнього тертя порід, град.

Значення координат плавно огинає кривої визначається інтегралом

$$y = -c \int \frac{x^{2k-1} dx}{(b^2 - x^2)^{r/2}}, \quad \begin{cases} k > 0,5; \\ 0 < r < 2. \end{cases} \quad (8)$$

Параметри очисної камери склепінної форми, максимально наближені до максимально-допустимої межі стійкої рівноваги визначаються за формулами

$$e^2 = 2 \cdot P_z \cdot h, \quad h^2 = 2 \cdot P_e \cdot e, \quad (9)$$

де h і b - вертикальна і горизонтальна піввісь кривої, м; P_z, P_e - радіуси максимально-допустимого сталого відповідно горизонтального і вертикального оголень очисної камери параболічної форми, м (згідно дослідно-промисловим випробуванням для умов Криворізького залізорудного басейну становлять $P_z=1-6$ м, $P_e=30-90$ м).

У лабораторну модель заковувався еквівалентний матеріал, який навантажували зовнішнім навантаженням визначеної з формули (4) з урахуванням масштабу моделювання (1). Через 3 доби, з боку задньої стінки вирізали еквівалентний матеріал, створюючи необхідну форму очисної камери і об'єм, а далі протягом 36 діб (що відповідає 12 міс. в натурі) спостерігали за поведінкою моделі. Згідно виразу (9) визначасмо параметри очисної камери. Вихідні дані моделювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні данні при моделюванні

Параметри очисної камери, см			Міцність руди	Радіус склепіння, см	Об'єм очисної камери, см ³
висота	довжина	ширина			
90	50	10	8	-	45000
90	50	10	10	-	45000
30	150	10	8	-	45000
30	150	10	10	-	45000
90	75/25	10	8	-	45000
90	75/25	10	10	-	45000
75	50	10	8	90/6	45000
75	50	10	10	90/6	45000

Результати моделювання стійкості очисних камери протягом їх існування від 12 діб (4 міс.) до 36 діб (12 міс.) приведені в табл. 3.

Після 15 діб спостерігалось сколювання еквівалентного матеріалу у верхній частині очисної камери прямокутної форми, та надання їй у верхній частині склепінної форми. Зі збільшенням часу існування очисної камери до 36 діб. форма компенсаційної камери приймає вигляд еліпсоїду, що підтверджують дослідження виконані Куликовим. Слід зазначити, що при зменшенні міцності гірського масиву з 10 до 8, обсяг очисної камери збільшився відповідно в 1,5-1,6 рази із збереженням її стійкості в часі до 12 міс. Після 18-30 діб залежно від межі міцності еквівалентного матеріалу спостерігається сколювання матеріалу не тільки у верхній частині, а й з боку її боків.

Дослідження очисної камери шатрової форми в процесі моделювання показали, що руйнування еквівалентного матеріалу по контуру камери проходить менш інтенсивно порівняно з камерами прямокутної форми. Слід зазначити, що після 30 діб камера шатрової форми приймає вигляд параболічної форми, а її обсяг, збільшується не більше ніж в 1,1-1,2 рази протягом 36 діб (1 року) існування.

Результати моделювання стійкості очисних камер

Об'єм очисної камери після її існування, діб (міс)				
12 (4)	18 (6)	24 (8)	30 (10)	36 (12)
45000	47000	58000	62000	68000
45000	45000	47000	55000	66000
48000	55000	67000	73000	80000
46000	54000	66000	72000	78000
45000	45000	47000	48000	50000
45000	45000	45000	46000	49000
45000	45000	45000	45000	45000
45000	45000	45000	45000	45000

Висновки та напрямок подальших досліджень. Очисна камера склепінної форми зберігає свою стійкість, а її руйнування відбувається лише у верхній її частині.

Лабораторними дослідженнями встановлено, що руйнівна сила, що діє з боків очисної камери, буде мінімальною.

Формування очисної камери склепінної форми підвищує стійкість камери без порушення еквівалентного матеріалу по її периметру. З табл. 3 видно, що протягом 36 діб камера склепінної форми збільшилася в обсязі не більше ніж в 1,1 рази.

У результаті проведених лабораторних досліджень із застосуванням еквівалентних матеріалів встановлено, що найбільш стійкими є очисні камери шатрової і склепінної форм, які забезпечують стійкість гірничому масиву протягом 36 діб або в натурі 1 рік.

Проведеними лабораторними дослідженнями встановлено, що при відпрацюванні запасів сформовані в масиві камери прямокутної форми будуть зруйновані протягом 6 міс.

Через 1,5 міс. відбувається незначне сколювання в середній частині вертикального цілика висячого боку. Після чого відбувається інтенсивне розшарування ціликів і після 16-17 міс. повне їх руйнування.

Формування камер шатрової або склепінної форми у верхній її частині забезпечують стійкість протягом 16-17 міс. При цьому, міцність порід в ціликах знижується з 125 МПа до 95-118 МПа.

Список літератури

1. <http://geonews.com.ua>.
2. <http://www.photoukraine.com>.
3. Пути совершенствования качества металлургического сырья на шахтах Кривбасса / **В.С.Гирин, Н.К.Кравцов, В.А.Витряк** // Разраб.рудн.месторожд. – Кривой Рог: КТУ. – 2000. – Вып. 70. – С. 10-13.
4. SWOT-анализ ОАО "КЖРК" – залог успешной работы железорудных шахт Кривбасса в условиях глобального рынка / **Письменный С.В., Б.Н.Андреев, Бровко Д.В., Кривошеин С.В., Петрик Н.Н.** // Форум гірників 2010: Материали межд. конф. (21-23 жовтня 2010 р.). – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – С.189-193.
5. Современное состояние и перспективы развития предприятий по добыче и переработке железорудного и флюсового сырья в Украине / **В.А.Колосов, В.П.Воловик, Н.И.Дядечкин** // Горн.журн. – 2000. – №6. – С. 162-168.
6. Перспективы поддержания производственных мощностей шахт и карьеров Кривбасса/ **Б.Н.Андреев, С.В.Письменный, Д.В.Бровко**// Минск. – 2013. – С.115-120.
7. Комбіновані способи подальшої розробки залізрудних родовищ Криворізького басейну / **М.І.Ступнік, С.В.Письменный**// Гірничий вісник: науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2012. – Вип. 95(1). – С. 3-7.
8. Горная энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1987., Т.3, с. 372-373.
9. **Мартынов В.К., Кудрявцев М.С., Зайцев Н.М. и др.** К вопросу о переносе результатов моделирования выпуска руды на натуре // Разраб. рудн. месторождений. – К.: Техніка. – 1970. – Вып. 10. – С. 13.
10. **Ржевский В.В.** Физико-технические параметры горных пород. – М.: Наука, 1975.
11. **Насонов И.Д.** Моделирование горных процессов. – М.: Недра, 1978. – 256 с.
12. **Куликов В.В.** Выпуск руды. – М.: Недра, 1980. – 303 с.
13. **Корж В.А.** Эквивалентные параметры кусков обрушенной руды в блоке// Разраб. рудн. месторожд. – Кривой Рог: КТУ, 1996. – № 59. – С. 52-59.
14. **Именитов В.Р.** Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений. Учебное пособие для вузов, 3-е изд., пераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 504 с.
Рукопис подано до редакції 14.04.15