

УДК 622.014.2

© С.А. Зубко, М.В. Петлёваный

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ РУДНОЙ ЗАЛЕЖИ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ

© S. Zubko, M. Petlovanyi

ECONOMIC FEASIBILITY OF ORE DEPOSIT MINING METHOD PARAMETERS OPTIMIZATION IN UNSTABLE ADJACENT STRATA

Цель. Обоснование экономической целесообразности отработки камер с различными параметрами в неустойчивых вмещающих породах на основе сравнительного анализа ряда показателей, изучения их динамики, а также статистической зависимости.

Методика исследований. Для достижения поставленной цели в работе выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей вариантов камерных систем разработки с учетом затратной (участковая себестоимость) и доходной (надбавка к цене за качество, доход от реализации продукции, прибыль) составляющих. Обработка данных производилась с использованием методов математической статистики, экономико-математического моделирования и метода наименьших квадратов.

Результаты исследований. Разработана логическая схема формирования экономического эффекта при управлении геометрическими параметрами очистного пространства. Выполнен прогноз объемов добычи руды, а также расхода взрывчатых веществ (ВВ) при различных технологиях ее выпуска – с использованием виброполков и погрузочно-доставочных машин (ПДМ). В первом случае объемы добычи во времени существенно не изменяются, появляются объемы пород, требующие вторичного дробления, при этом расход ВВ устойчиво увеличивается, во втором – расход ВВ уменьшается. Установлено, что цена руды обратно пропорционально зависит от ее разубоживания и прямо пропорциональна – от содержания железа в ней. Рассчитан критерий адекватности Фишера, подтверждающий тесную статистическую зависимость между этими параметрами.

Научная новизна. Для условий добычи руды в неустойчивых вмещающих породах Южно-Белозерского месторождения установлены тесные корреляционные взаимосвязи ее цены с процессом засорения пустыми породами и содержанием полезного компонента.

Практическое значение. Использование предложенного алгоритма формирования экономического эффекта позволяет прогнозировать на разных участках рудной залежи, контактирующей с неустойчивыми породами, целесообразность изменения параметров системы разработки.

Ключевые слова: очистная камера, разубоживание руды, оптимизация параметров, неустойчивые породы, экономический эффект

Введение. Украина занимает первое место в мире по геологическим запасам железных руд, которые оцениваются в 30 млрд т, а в пересчете на содержание чистого железа 4 место – после России, Бразилии и Австралии [1]. Запасы железных руд полностью покрывают потребности черной металлургии в этом сырье. Ежегодно из недр Украины извлекается порядка 75 – 80 млн т железной руды. Подземным способом добывается около 15,0 млн т 9-ю шахтами [2].

Одним из горных предприятий, осуществляющих добычу руды подземным способом, является ПИИ «Запорожский железорудный комбинат», разрабатывающий богатые железные руды Южно-Белозерского и Переверзевского месторождений с содержанием железа более 60%, удельный вес которого в подземной добыче Украины составляет 25 – 30%. Для отработки руд применяется высокоэффективная для данных условий камерная система разработки с последующим заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой [3, 4].

При ведении очистных работ в интервале глубин 640 – 840 м на южном участке залежи «Главная» Южно-Белозерского месторождения комбинат столкнулся с проблемой неустойчивости трещиноватых вмещающих пород всячего бока, представленных низкоустойчивыми кварц-хлорит-серицитовыми сланцами с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодьяконова $f = 7 - 9$, которые не выдерживают значительных обнажений во времени [5]. Ведение горных работ в зонах с повышенной трещиноватостью пород значительно усложняется в связи со снижением их прочностных характеристик [6, 7]. В указанном интервале глубин зона деформаций массива горных пород постоянно увеличивается по простиранию рудной залежи и с увеличением глубины разработки [8, 9]. В результате одновременного воздействия процесса отбойки камерных запасов и проявлений горного давления у всячего бока залежи происходит обрушение неустойчивых пород в очистное пространство камер, что приводит к засорению руды [10, 11]. Засорение руды вмещающими породами негативно сказывается на ее качестве в процессе добычи и является актуальной проблемой, что неоднократно отмечалось как отечественными, так и зарубежными учеными [12 – 16]. Вопрос минимизации засорения руды пустыми породами и закладкой остается постоянно актуальным для рудников и в настоящее время. Рыночные цены на железную руду устанавливаются в зависимости от содержания в ней железа и для успешного экспорта необходимо выдерживать качественные характеристики во избежание потери ее конкурентоспособности [17].

Специалистами комбината совместно с учеными Научно-исследовательского горнорудного института (г. Кривой Рог) предложен вариант расположения под наклонными днищами камер всячего бока камер с измененными геометрическими параметрами и выпуском руды при помощи погрузочно-доставочных машин. Однако, оценке экономической целесообразности оптимизации геометрических параметров камерных систем разработки рудных запасов в условиях неустойчивых пород уделено недостаточно внимания, что требует дальнейших исследований.

Формулирование цели статьи – обоснование экономической целесообразности отработки камер с различными параметрами на основании сравнительного анализа ряда технико-экономических показателей, изучения их динамики, а также статистической зависимости.

Изложение основного материала исследования. Предыдущими исследованиями для повышения устойчивости камер предложена оптимизация их параметров при отработке запасов руд на контакте с неустойчивыми вмещающими породами [18 – 20]. Результаты исследований геомеханических

процессов при отработке рудной залежи методами эквивалентных материалов и поляризационно-оптическим методом позволили научно обосновать геометрические параметры камер в слабых вмещающих породах: ширину камеры необходимо уменьшить на 50% (с 30 до 15 м), а ее высоту снизить на 20% (со 100 до 80 м). Кроме этого, изменяется технология выпуска руды из камер – вместо традиционной технологии отработки с выпуском руды на виброполки откаточного горизонта 840 м технология с проведением погрузочных заездов плоского днища из погрузочных ортов гор. 825 м самоходными погрузочно-доставочными машинами (ПДМ) типа Sandvik LH, Epiroc Scoortram, что объясняется меньшими затратами на подготовку камер к выемке. Изменение параметров системы разработки представлено на Рисунке 1.

Оценку критериев экономической целесообразности отработки камер предлагаемой технологии рекомендуется осуществлять двумя группами технико-экономических показателей:

- затратной: участковая себестоимость добычи полезного ископаемого (железная руда), в том числе по экономическим элементам и калькуляционным статьям;
- доходной: надбавка к цене за качество, доход от реализации продукции, прибыль.

Изменение показателей затратной группы определяется техническими результатами выемочного процесса: снижением разубоживания руды, вмещающими породами, повышением содержания полезного компонента (Fe) в руде, снижением необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ (перекрепления горных выработок).

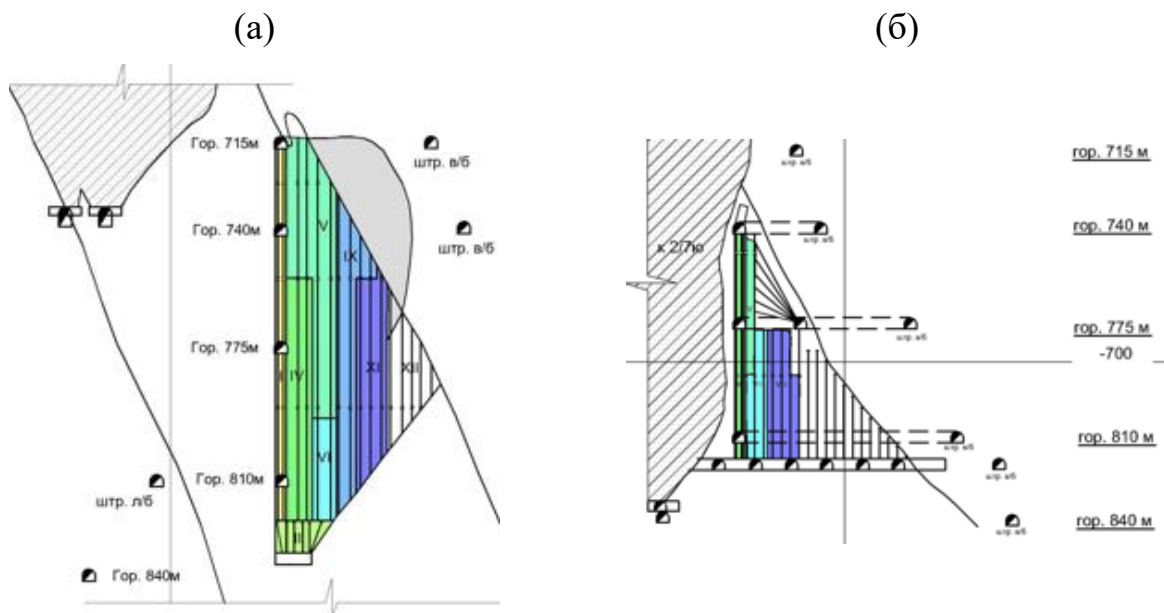


Рис.1. Оптимизация параметров камерной системы разработки при отработке запасов руд на контакте с неустойчивыми вмещающими породами: (а) камерная система разработки с наклонным днищем и выпуском руды на виброполки; (б) камерная система разработки с плоским днищем и погрузкой руды ПДМ

Технические результаты приводят к изменениям в экономической сфере, а именно к сокращению затрат и увеличению доходов (Рис. 2). Таким образом, логика исследуемого экономического эффекта состоит в целенаправленном управлении геометрическими параметрами выемочных камер и технологией ведения подготовительных работ для обеспечения лучших экономических результатов. В исследованиях принимались технико-экономические показатели по данным 2014 года.

Следует отметить, что снижение себестоимости продукции, как индикатор значимости изменения технических параметров производственного процесса, не всегда может быть основанием для принятия позитивного решения в области технологических изменений. Это обусловлено тем, что удельное улучшение технических и затратных результатов при определенном уровне приводит к меньшему изменению доходов предприятия от реализации продукции. Например, потребителем в большей степени (на 2,7%) стимулируется повышение качества отдельного сорта продукции с меньшим базовым показателем содержания железа в руде (Табл. 1).

Изменение производственных расходов происходит при сокращении базовой ширины камеры на 50% (с 30 до 15 м) и уменьшении ее высоты на 20% (со 100 до 80 м). При отработке камер у висячего бока шириной 30 м предполагаемая стоимость ремонтно-восстановительных работ (перекрепления горных выработок) составит порядка 16,034 тыс. грн после каждого массового взрыва.

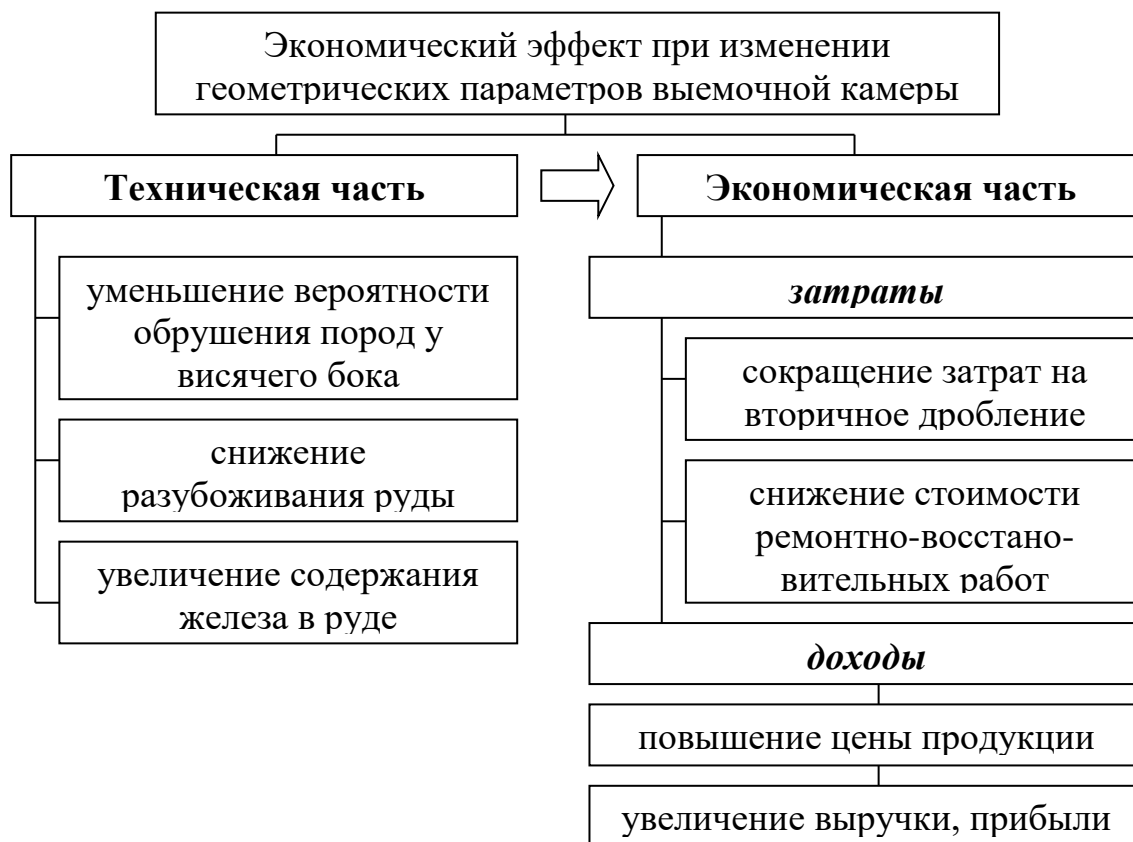


Рис. 2. Структурная схема формирования экономического эффекта при управлении геометрическими параметрами очистного пространства

Таблица 1

Формирование доходной части при управлении качеством продукции

Товарная продукция	Базовое содержание Fe, %	Надбавка за 1% качества, грн/т	Ценовой лаг, %
Руда МК-1	58	6,65	—
Руда МК-2	54	6,83	+2,7

Это предопределено следующими параметрами: длина примыкающих подготовительных выработок – 30 м; количество этажей – 3; удельный расход торкрета при повторном креплении – $2 \text{ м}^2/\text{м.п.}$; площадь, подлежащая перекреплению – 180 м^2 ; удельная стоимость торкрета – $89,08 \text{ грн}/\text{м}^2$. Таким образом, при проведении пяти массовых взрывов, необходимых для отработки камерного запаса, экономия денежных средств, выделяемых только на перекрепление горных выработок, в предлагаемом варианте составит $80,172 \text{ тыс. грн}$, что, в свою очередь, влечет за собой снижение участковой себестоимости добычи железной руды на $0,49 \text{ грн}/\text{т}$ ($2,1\%$).

Стоимость вторичного дробления горной массы определяется количеством взрывов, осуществляемых в течение смены. По предлагаемому варианту отработки очистного пространства с выпуском горной массы через плоское днище гор. 825 м количество взрывов в среднем составляет 5 взр./см.

При традиционной технологии отработки с выпуском на виброполок гор. 840 м среднее количество взрывов составляет 10 взр./см. Экономия достигается значительным снижением затрат на проведение взрывных работ по вторичному дроблению непосредственно при выпуске горной массы.

При использовании экономико-математического моделирования была проанализирована динамика и составлен экстраполяционный прогноз объемов добычи полезного ископаемого, а также расхода ВВ на указанных горизонтах выпуска горной массы (Рис. 3, 4) на протяжении 2012 года.

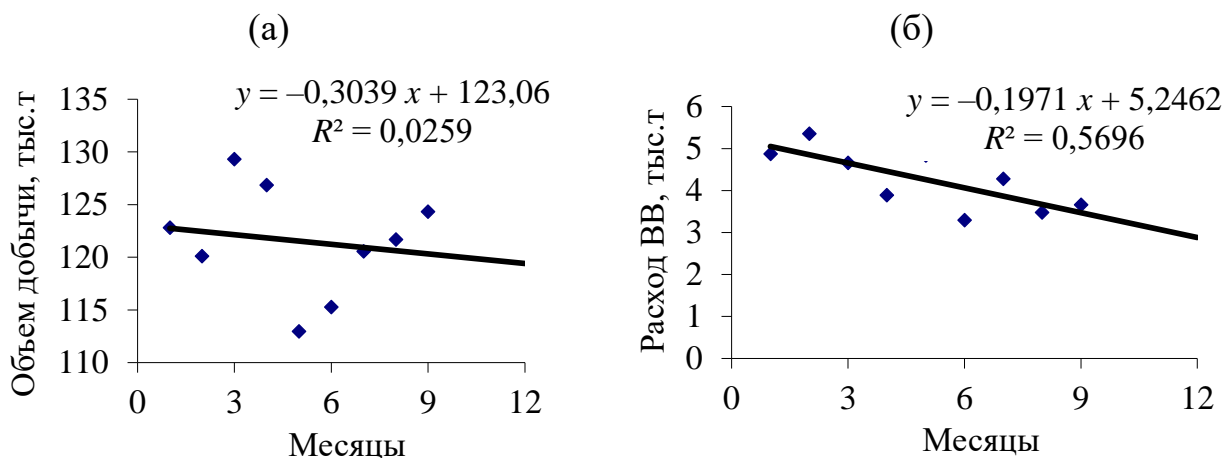


Рис. 3. Прогноз объемов добычи полезного ископаемого (а) и расхода ВВ (б) при предлагаемой технологии на гор. 825 м

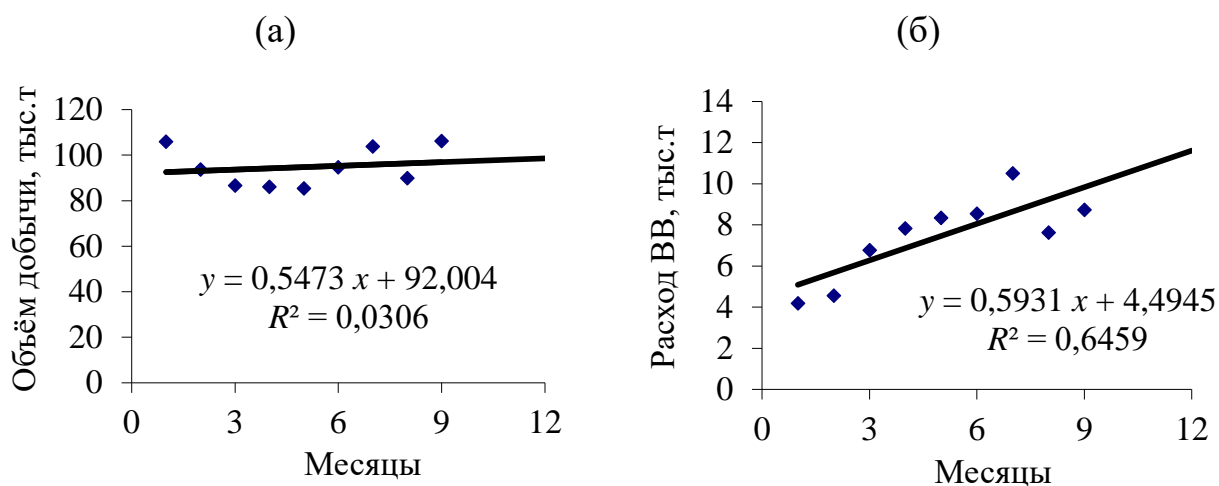


Рис. 4. Прогноз объемов добычи полезного ископаемого (а) и расхода ВВ (б) при используемой технологии выпуска на гор. 840 м

Для гор. 825 м характерно уменьшение расхода ВВ, что подтверждается значимым коэффициентом детерминации $R^2 = 0,57$. На гор. 840 м объемы добычи во времени существенно не изменяются, а расход ВВ будет устойчиво увеличиваться ($R^2 = 0,64$). Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при технологии, используемой при выпуске горной массы на виброполки гор. 840 м, образуются объемы пород, подлежащие дополнительному вторичному дроблению. Увеличение расхода ВВ и повышение себестоимости отработки камеры свидетельствует о недостатках технологии ведения данного производственного процесса.

Разубоживание руды при добыче происходит под влиянием объективных и субъективных факторов. В последнем случае планоно осуществляется усреднение качества руды путем добавления вмещающих пород всячего бока (с содержанием Fe – 35,27%) в объеме 3,2% от массы извлекаемой руды. Таким образом, содержание железа в массиве руды (60%) уменьшается до 59,21%, что позволяет также воспользоваться ценовой надбавкой за качество продукции. В рассматриваемых вариантах технологии отработки эффективность управления качеством руды существенно отличается, происходит устойчивое превышение значений фактических показателей разубоживания над плановыми на гор. 840 м (Рис. 5). На гор. 825 м имеет место обратная ситуация, что свидетельствует о результативности управления геометрическими параметрами камеры над качеством добываемого сырья.

Проанализированные выше изменения приводят к отклонению фактических и плановых цен на руду в размере 25,8 грн/т, что составляет 6,2% (Рис. 6). Повышение цен на продукцию отмечается при отработке камер шириной 15 м (выпуск на гор. 825 м), а устойчивое снижение цен – при отработке камер шириной 30 м (выпуск на гор. 840 м).

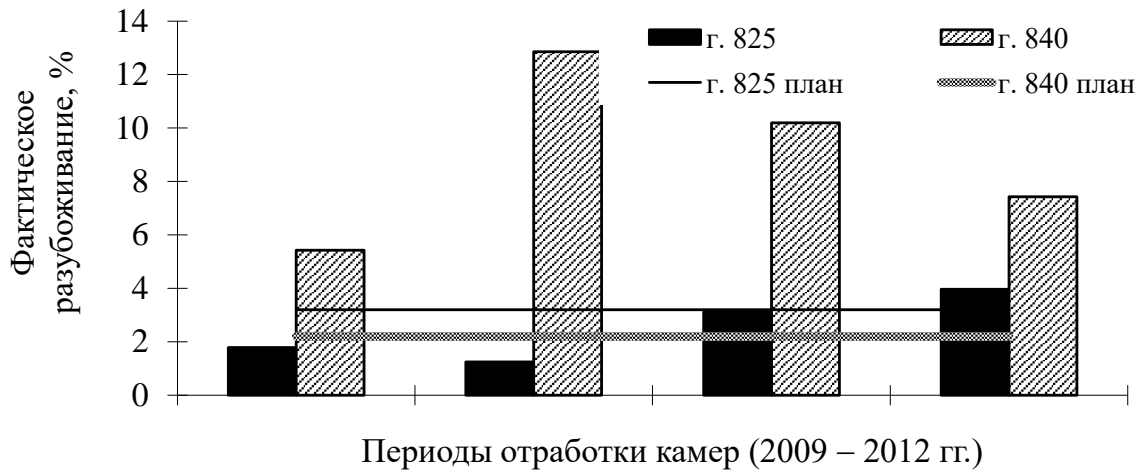


Рис. 5. Эффективность управления качеством добытой руды из камер

В пределах четырех рассматриваемых периодов отработку камер по показателю цены предпочтительней производить по технологии, применяемой с выпуском на гор. 825 м.

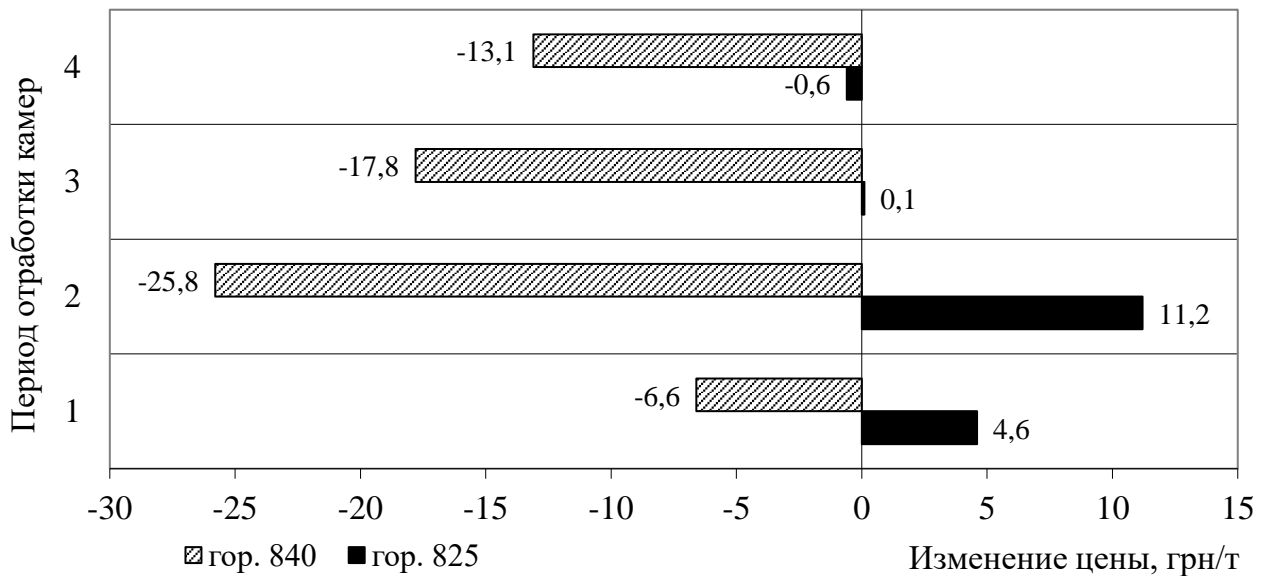


Рис. 6. Отклонение между фактическими и плановыми ценами на руду в периодах отработки камер (2009 – 2012 гг.)

Поскольку снижение разубоживания руды позволяет обеспечивать в ней более высокое содержание железа (Рис. 7, 8), происходит изменение цены реализации продукции с учетом надбавок за качество. Это определяет наличие статистической зависимости между стоимостными и техническими показателями: цена руды обратно пропорционально зависит от разубоживания ($R^2 = 0,7844$) и прямо пропорциональна содержанию железа в руде ($R^2 = 0,9928$).

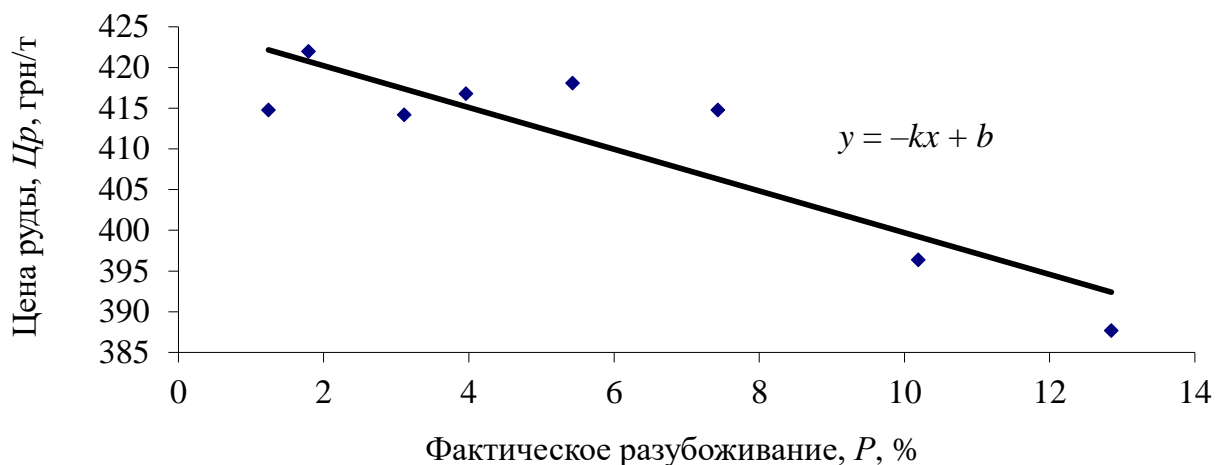


Рис. 7. Зависимость цены руды от ее засорения пустыми породами

Уравнение зависимости цены C_p товарной продукции (железной руды) от уровня засорения ее пустыми породами P будет иметь вид:

$$C_p = -2,5634 P + 425,34, \text{ грн, при } R^2 = 78,5\%. \quad (1)$$

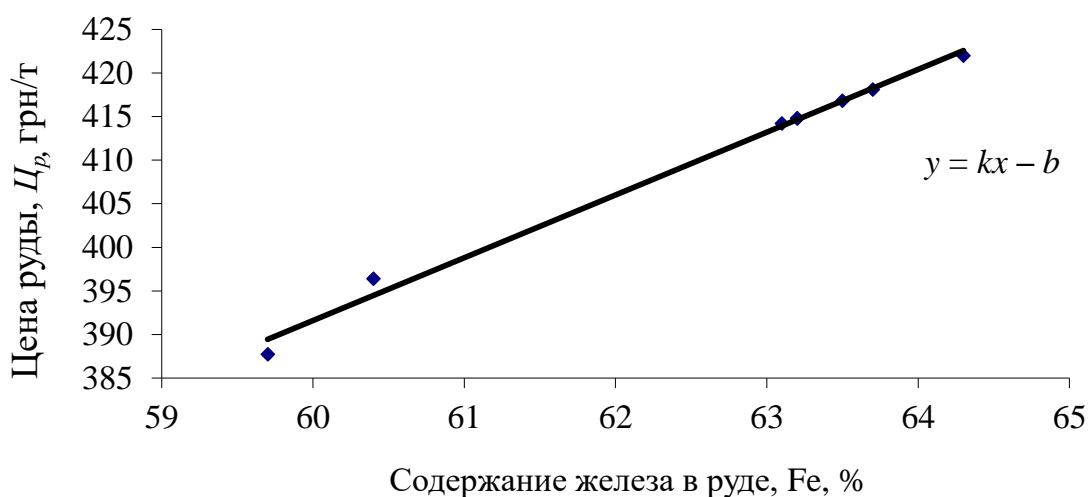


Рис. 8. Зависимость цены руды от содержания ценного компонента

Доказательство зависимости между технико-экономическими показателями и ценой продукции подтверждается методами математической статистики [21], а именно методом наименьших квадратов, позволяющим получить такие оценки параметров, при которых сумма квадратов отклонений фактических значений результативного признака y от теоретических значений y_x при тех же значениях фактора x минимальная:

$$\sum (y - Y_x)^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Уравнение зависимости цены C_p товарной продукции (железной руды) от содержания железа Fe в руде будет иметь вид:

$$C_p = 7,2024 \text{ Fe} - 40,537, \text{ грн, при } R^2 = 99,3\%. \quad (3)$$

Параметры линейной регрессии определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} na + b\sum x = \sum y; \\ a\sum x + b\sum x^2 = \sum ux. \end{cases} \quad (4)$$

Из этой системы можно выразить формулы для определения a и b :

$$a = Y - b; \quad (5)$$

$$b = \frac{y \cdot x - Y \cdot X}{x^2 - X^2}. \quad (6)$$

Величина влияния фактора на исследуемый параметр может быть оценена с помощью коэффициента линейной парной корреляции, которая характеризует тесноту (силу) линейной связи между двумя переменными. Величина называется коэффициентом детерминации. Основным показателем тесноты линейной связи следует считать коэффициент детерминации (R^2):

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (7)$$

Для исследуемых показателей коэффициент корреляции равен 0,885. Это говорит о том, что между фактическим разубоживанием и ценой руды существует обратная связь. Иными словами, при увеличении фактического разубоживания уменьшается цена руды. В результате определения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,78$) видно, что цена руды в значительной степени (на 78%) зависит от фактического разубоживания, и в незначительной (на 22%) обусловлена другими факторами, которые не учитываются в модели.

Рассчитаем ошибку коэффициента корреляции:

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - 0,7844}{8 - 2}} = 0,189. \quad (8)$$

Оценим значимость коэффициента корреляции при уровне значимости 0,05. Коэффициент надежности определяется по формуле:

$$t_r = \frac{|r_{xy}|}{S_r} = 4,68. \quad (9)$$

Для числа степеней свободы равному 6 и уровня значимости коэффициента корреляции равному 0,05 табличное значение коэффициента надежности составляет 2,365. Таким образом, рассчитанный коэффициент 4,68 больше табличного, что свидетельствует о его надежности и значимости.

Определим коэффициент адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 0,05:

$$F = \frac{r^2}{1-r^2}(n-2) = \frac{0,7844}{1-0,7844} \cdot 6 = 21,83. \quad (10)$$

Табличное значение адекватности при указанных степенях свободы при уровне значимости 0,05 равно 5,99. Поскольку рассчитанный критерий адекватности Фишера больше табличного значения ($21,83 > 5,99$), то модель является адекватной.

Вышеизложенное дает основание утверждать, что между исследуемыми параметрами очистных камер и технико-экономическими показателями выемочного участка существует тесная статистическая зависимость. Поэтому использование предлагаемой технологии отработки является экономически целесообразным.

Экономический эффект мероприятий можно отразить на примере себестоимости отработки запасов камеры при использовании различных проектов трассировки подготовительных выработок. Отработку камеры 4/7ю можно производить с выпуском горной массы через 3 виброполка на гор. 840 м (что формирует 51% удельной себестоимости руды), а также при помощи ПДМ через погрузочные заезды плоского днища гор. 825 м (удельный вес затрат на подготовительные работы сокращается до 38%) (Рис. 9).

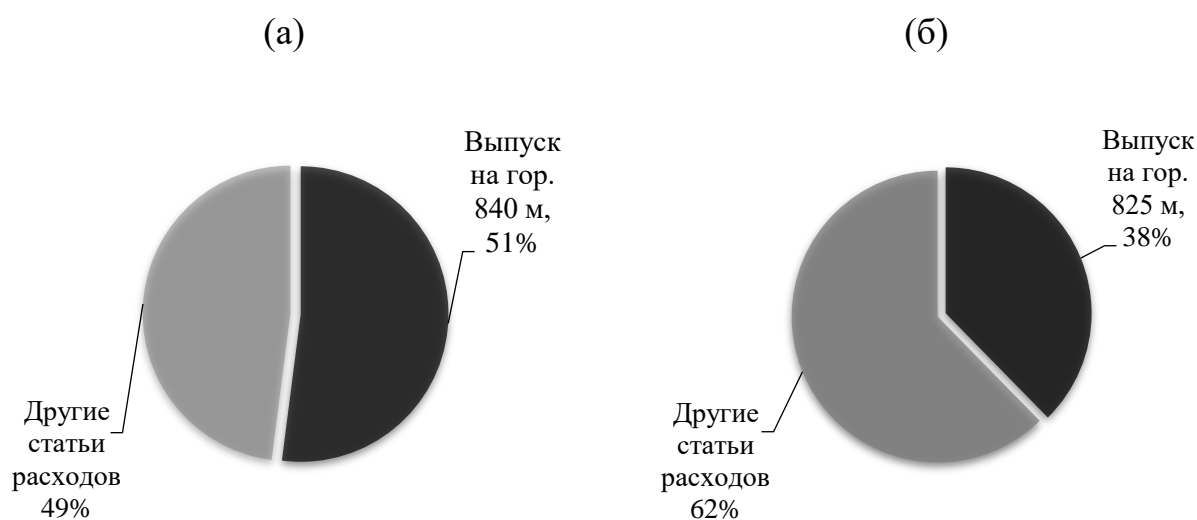


Рис. 9. Удельный вес затрат на подготовительные работы в структуре себестоимости добычи при различных технологиях отработки камер

На основании этого происходит снижение участковой себестоимости добычи руды на 3,1 грн/т (12,9%), что в расчете на проектный объем добычи с камеры позволяет дополнительно сократить расходы. Изменение технологии ведения горных работ также позволяет снизить потери полезного ископаемого при добыче с 10 до 7,4%. Вследствие этого образуется дополнительный объем руды в размере 4,29 тыс. т.

Эффективность принятых технологических решений подтверждает снижение разубоживания руды пустыми породами, в результате чего происходит повышение качества товарной продукции комбината. Для экономической оценки воспользуемся уравнением (2), полученным при установлении статистической зависимости цены продукции от уровня разубоживания руды. При колебании среднего разубоживания от 3 до 10%, цена руды изменяется в пределах 399,7 – 417,6 грн/т, что позволяет получить дополнительный доход от реализации продукции. Предложенные технологические решения способствуют обеспечению достижения планового объема прибыли и его незначительное превышение.

Применение предлагаемой технологии отработки части рудной залежи у висячего бока приводит к уменьшению на 13% удельного веса подготовительных работ в структуре себестоимости добычи руды из камеры. Исключение затрат на вторичное дробление и проведение ремонтно-восстановительных работ позволяют снизить (на 12,9%) стоимость добычи 165 тыс. т руды из камеры. Сокращение уровня потерь полезного ископаемого в технологическом процессе выемки обеспечивает извлечение 4,29 тыс. т дополнительного объема руды.

Снижение уровня разубоживания руды, достигаемое при оптимизации размеров камер, позволяет повысить цену на 17,9 грн/т (+4,5%), что приводит к увеличению рентабельности продукции (показателя эффективности) с 65,64 до 75,31%. Экономический эффект от внедрения предлагаемых технологических решений, как абсолютную величину, отражает дополнительная прибыль предприятия в размере 3,465 млн грн.

Выводы.

1. Применение предлагаемой технологии отработки части рудной залежи у висячего бока приводит к уменьшению на 13% удельного веса подготовительных работ в структуре себестоимости добычи руды из камеры. Исключение затрат на вторичное дробление и проведение ремонтно-восстановительных работ позволяют также на 13% снизить стоимость добычи руды из камеры. Сокращение уровня потерь полезного ископаемого в технологическом процессе выемки обеспечивает извлечение дополнительного объема руды.

2. С помощью методов математической статистики установлена взаимосвязь между стоимостными и техническими показателями: цена руды обратно пропорционально зависит от разубоживания и прямо пропорциональна – от содержания железа в руде. Из этого следует, что снижение уровня разубоживания руды, достигаемое при оптимизации размеров камер, позволяет повысить цену руды на 4,5%, что приводит к увеличению рентабельности продукции на 9,7%.

3. Экономический эффект от внедрения предлагаемых мероприятий свидетельствует о целесообразности оптимизации параметров очистных камер, обрабатываемых на контакте с неустойчивыми породами в условиях Южно-

Белозерского месторождения, что подтверждается уменьшением объема подготовительных работ и повышением качества продукции.

Благодарность. Представленные результаты получены в рамках выполнения научно-исследовательской работы ГП-487 «Научное обоснование и разработка энергоэффективных малоотходных технологий добычи углеводородного и минерального сырья» (№ госрегистрации 0116U008041).

Перечень ссылок

1. USGS – United States Geological Survey. (2018). *Mineral Resources Program*. [online]. Available at: <http://minerals.usgs.gov/>

2. Ступник, Н.И., & Письменный, С.В. (2012). Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды. *Вісник Криворізького Національного Університету*, (30), 3-6.

3. Kuz'menko, A., Furman, A., & Usatyy, V. (2010). Improvement of Mining Methods with Consolidating Stowing of Iron-Ore Deposits on Big Depths. *New Techniques and Technologies in Mining – Proceedings of the School of Underground Mining*, 131-136. <https://doi.org/10.1201/b11329-22>

4. Бондаренко, В.И., Хоменко, О.Е., & Кононенко, М.Н. (2005). Технология крепление подготовительных выработок в условиях Южно-Белозерского железорудного месторождения. *Науковий вісник НГУ*, (8), 3-6.

5. Русских, В.В., Лапко, В.В., & Зубко, С.А. (2012). Развитие технологии добычи и принятие новых технических решений при отработке рудных залежей в сложных горно-геологических условиях Южно-Белозерского месторождения. *Науковий Вісник НГУ*, (5), 34-38.

6. Lozynskiy, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., & Malanchyk, Ye. (2018). Analytical Research of the Stress-Deformed State in the Rock Massif Around Faulting. *International Journal of Engineering Research in Africa*, (35), 77-88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.35.77>

7. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2017). Взаимосвязь структурных изменений окружающего массива с устойчивостью контура очистных камер при разработке крутых залежей железной руды. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(41), 56-62.

8. Капленко, Ю.П., & Цариковский, В.В. (2005). Влияние напряженного состояния горного массива и горно-геологических условий на параметры обнажений и форму очистных камер. *Разработка Рудных Месторождений*, (88), 11-24.

9. Мутамбо, В.П. (1997). Исследование напряженного состояния массива вокруг очистной камеры в зависимости от ее размеров и глубины горных работ. *Разработка Рудных Месторождений*, (61), 43-46.

10. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2017). Влияние природных и технологических факторов на устойчивость пород и закладочного массива при их обнажении в очистных камерах. *Геотехнічна Механіка*, (132), 62-73.

11. Kabwe, E. (2017). Mining Sequence Deformation and Failure Behaviour Analysis in the Hanging Wall and Orebody Rock Formations; A Continuum Approach. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1453-1473. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0187-y>

12. Henning, J.G., & Mitri, H.S. (2007). Numerical Modelling of Ore Dilution in Blasthole Stopping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.11.002>

13. Liu, G., Li, L., Yang, X., & Guo, L. (2017). Numerical Analysis of Stress Distribution in Backfilled Stopes Considering Interfaces between the Backfill and Rock Walls. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 06016014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000702](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000702)

14. Павлов, А.М., & Васильев, Д.С. (2016). Влияние геологической среды на качество добываемой руды Коневинского месторождения. *Известия Сибирского Отделения РАН. Геология, Поиски и Разведка Рудных Месторождений*, 4(57), 83-90.

15. Кузьменко, А.М., & Петлеваный, М.В. (2014). Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды. *Геотехнічна Механіка*, (118), 37-45.
16. Urli, V., & Esmaili, K. (2016). A Stability-Economic Model for an Open Stope to Prevent Dilution Using the Ore-Skin Design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (82), 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.001>
17. Petlovanyi, M. (2016). Influence of Configuration Chambers on the Formation of Stress in Multi-Modulus Mass. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 48-54. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.048>
18. Зубко, С.А., Кононенко, М.М., & Петльованый, М.В. (2015). Обгрунтування раціональних параметрів камер третьої черги відпрацювання при підземному видобутку залізної руди. *Металлургическая и Горнорудная Промышленность*, (2), 93-98.
19. Chistyakov, E., Ruskh, V., & Zubko, S. (2012). Investigation of the Geomechanical Processes while Mining Thick Ore Deposits by Room Systems with Backfill of Worked-Out Area. *Geomechanical Processes During Underground Mining – Proceedings of the School of Underground Mining*, 127-132. <https://doi.org/10.1201/b13157-23>
20. Russkikh, V., Zubko, S., Karapa, I., Yavorskiy, A. (2013). Research of Geomechanics Processes during Interchamber Pillar Development with Two Floor Height. *Mining of Mineral Deposits*, 7(3), 247-254. <https://doi.org/10.15407/mining07.03.247>
21. Зенкевич, О., & Морган, К. (1986). *Конечные элементы и аппроксимация*. Москва: Мир.

АНОТАЦІЯ

Мета. Обгрунтування економічної доцільності відпрацювання камер з різними параметрами в умовах нестійких порід на основі порівняльного аналізу ряду показників, вивчення їх динаміки, а також статистичної залежності.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі виконано порівняльний аналіз техніко-економічних показників варіантів камерних систем розробки з урахуванням витратної (дільнична собівартість) та дохідної (надбавка до ціни за якість, дохід від реалізації продукції, прибуток) складових. Обробка даних здійснювалась із використанням методів математичної статистики, економіко-математичного моделювання та методу найменших квадратів.

Результати досліджень. Розроблена логічна схема формування економічного ефекту при управлінні геометричними параметрами очисного простору. Виконано прогноз об'ємів видобутку руди, а також витрати вибухових речовин (ВР) при різних технологіях її випуску – із використанням віброполків та вантажних машин. У першому випадку об'єми видобутку в часі суттєво не змінюються, з'являються об'єми порід, що вимагають вторинного дроблення, при цьому витрати ВР стабільно збільшуються, у другому – витрати ВР зменшуються. Встановлено, що ціна руди обернено пропорційно залежить від її збіднення й прямо пропорційна – від вмісту заліза в ній. Розраховано критерій адекватності Фішера, що підтверджує тісну статистичну залежність між цими параметрами.

Наукова новизна. Для умов видобутку руди в нестійких вміщуючих породах Південно-Білозерського родовища встановлені тісні кореляційні взаємозв'язки її ціни з процесом засмічення пустими породами та вмістом корисного компонента.

Практичне значення. Використання запропонованого алгоритму формування економічного ефекту дозволяє прогнозувати на різних ділянках рудного покладу, що контактує з нестійкими породами, доцільність зміни параметрів системи розробки.

Ключові слова: очисна камера, збіднення руди, оптимізація параметрів, нестійкі породи, економічний ефект

ABSTRACT

Purpose. Substantiation into economic feasibility of chamber mining with different parameters on the basis of comparative analysis of a number of indicators, studying their dynamics, as well as statistical dependence.

Methods. In order to achieve this purpose, a comparative analysis of the technical and economic indicators of the chamber systems development options, taking into account the cost (mining prime cost) and the revenue (premium to price for quality, revenue from sales, profit) of components, is performed. Data processing was carried out using methods of mathematical statistics, economic-mathematical modeling, least squares method.

Findings. The logical scheme of the economic effect formation during geometric parameters management of the of the stoping zone is developed. The forecast of ore extraction volumes, as well as explosive charges (EC), has been fulfilled under various technologies of its production – with the use of a vibro-output mechanism and a cargo-delivery machine. In the first case, the volume of extraction in time does not significantly change, there are volumes of rocks that require crushing, with the costs of EC stably increase, in the second – the cost of EC decreases. It is established that the price of ore is inversely proportional to its impoverishment and is directly proportional to the iron content in it. Fisher's criterion of adequacy is calculated, which confirms the close statistical dependence between these parameters.

Originality. For the conditions for the ore extraction in unstable adjacent strata of the Southern-Bilozersk deposit, close correlation relations of its price with the clogging of empty rocks and the content of a useful component are established.

Practical implications. The use of the proposed algorithm for the economic effect formation allows to predict on various sites of the ore deposit that is in contact with unstable rocks, the expediency of changing the parameters of the development system.

Keywords: *stope, ore dilution, parameters optimization, unstable rocks, economic effect*