

УДК 622.271.3.06.012.32: 622.271.333

Яковлев Виктор Леонтьевич

член-корр. РАН, доктор технических наук,
профессор, главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58

Саканцев Георгий Григорьевич

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория открытой геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

Яковлев Алексей Викторович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
открытой геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

Переход Татьяна Максимовна

ведущий инженер,
лаборатория открытой геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: lubk_igd@mail.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ГОРНЫХ РАБОТ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ КРУТОНАКЛОННЫХ ВРЕМЕННО НЕРАБОЧИХ БОРТОВ**Аннотация:*

Обоснована необходимость и целесообразность увеличения наклона рабочих бортов глубоких карьеров как средства регулирования режима горных работ. Установлено, что одним из наиболее эффективных способов регулирования режима горных работ глубоких карьеров большой протяженности является применение ступенчатых крутонаклонных временно нерабочих бортов, разработанных в Институте горного дела УрО РАН, которые характеризуются эффективными способами их формирования и расконсервации, включая благоприятные условия вскрытия и безопасности горных работ по условиям камнепада. Разработан и проведен способ расчета целесообразных параметров бортов – их высоты и ширины отдельных ступеней. В результате статистических исследований установлено, что основными факторами, определяющими экономическую эффективность разработки месторождений с применением временно нерабочих бортов разработанной конструкции, являются глубина карьера, число ступеней и скорость понижения горных работ при его расконсервации. Экономический эффект в виде снижения дисконтированных затрат на разработку месторождения в результате применения данного способа регулирования режима горных работ при значительной глубине карьеров может достигать 3,5 – 4 %.

Ключевые слова: глубокие карьеры, режим горных работ, временно нерабочие борта, способ формирования и расконсервации временно нерабочих бортов, способ расчета их параметров, камнезащитные площадки

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.005

Yakovlev Viktor L.

Corresponding Member of the RAS,
Doctor of Engineering, Professor,
Chief Research Worker
Institute of Mining UB RAS,
620075, Ekaterinburg, Mamina-Sibiryaka str., 58

Sakantsev Georgy G.

Doctor of Engineering,
Senior Research Worker,
Laboratory of open geotechnology,
Institute of Mining UB RAS

Yakovlev Aleksey V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of open geotechnology,
Institute of Mining UB RAS

Perekhod Tatyana M.

Leading Engineer,
Laboratory of open geotechnology
Institute of Mining UB RAS,
lubk_igd@mail.ru; +7(343)350-54-11

THE REGULATION OF MINING MODE ON DEEP OPEN PITS OF LARGE EXTENSION WITH THE APPLICATION OF MULTIBENCH STEEPLY INCLINED TEMPORARILY INOPERATIVE QUARRY SIDES*Abstract:*

In the paper the necessity and expediency of increasing the slope of the working sides of deep quarries has been substantiated as a mean of regulation of mining operation mode. It has been established that one of the most effective ways to regulate the mining regime on deep quarries of considerable extension is the implementation of bench-shaped steeply inclined temporarily non-working quarry sides, developed by the Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, which are characterized by effective methods of their formation and depreservation, including favorable conditions for opening and safety of mining operations under rock-fall conditions. A method of calculating the appropriate parameters of the sides – their height and width of each ledge – has been developed and tested. As a result of statistical studies, it was found that the main factors determining the economic efficiency of field development with the implementation of temporarily non-working sides of the developed design are: the depth of the quarry, the number of benches and the rate of decline in mining operations during its reopening. The economic effect in the form of reduction of discounted costs for the development of the field by means of use of this regulation method for the mining regime with a significant depth of quarries can reach 3.5 – 4 %.

Key words: deep quarries, mining mode, temporarily non-working sides, method of formation and depreservation of temporarily non-working quarry sides, method of calculation of their parameters, stone-protective platforms

* Статья подготовлена при выполнении проекта № 18-5-5-10. Тема № 0405-2018-0001

Режим горных работ является одним из основных параметров, определяющих эффективность открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Перераспределение объемов вскрышных работ во времени, отнесение их на более поздние периоды обеспечивает, как правило, значительное снижение капитальных вложений и уменьшение расходов будущих периодов, производимых в наиболее тяжелый период отработки глубоких карьеров.

Существуют различные способы регулирования режима горных работ, в том числе на основе применения временно нерабочих бортов. Основные принципы регулирования режима горных работ с применением временно нерабочих бортов сформулированы в работах [1, 2]. На их основе установлено [2 – 5], что между углом наклона временно нерабочего борта, его высотой, скоростью расконсервации и определяющими их факторами, в том числе способом вскрытия целика, существует достаточно жесткая связь. Нарушение этой закономерности неизбежно ведет к невозможности своевременного разноса целиков – к сползанию их в рудную зону, сокращению вскрытой рудной площади и, как следствие, к снижению производительности карьера по руде. Наличие целиков в рабочей зоне карьера допустимо только при существенной разнице между скоростью разноса целика и требуемой скоростью подвигания рабочего борта, обеспечивающей принятую интенсивность отработки месторождения. При больших значениях последней, когда скорость подвигания фронта горных работ близка к предельной, наличие целиков недопустимо.

Предпринятая в работе [6] попытка увязать способ вскрытия с безопасностью горных работ по условиям камнепада за счет выполаживания временно нерабочего борта для устройства транспортных берм и площадок, площадок с заградительными валами и прерывания грузотранспортной связи между отдельными участками также оказалась неэффективной. В работе [7] предложено решать вопрос регулирования режима горных работ путем формирования карьерного пространства зонами концентрации. Однако этот способ является довольно сложным и не дает возможности определить его эффективность, так как требует сравнения с базовым, являющимся по исполнению не менее трудоемким.

Таким образом, основной причиной, ограничивающей область и эффективность применения временно нерабочих бортов, является нерациональная конструкция временно нерабочих бортов, сложность, а зачастую просто невозможность решения вопросов вскрытия и обеспечения безопасности по условиям камнепада при осуществлении работ по их расконсервации.

Необходима разработка принципиально новых способов формирования и расконсервации временно нерабочих бортов, обеспечивающих повышение их эффективности, включая увеличение объемов переноса вскрышных работ на последующие периоды, благоприятные условия для вскрытия рабочих горизонтов и обеспечения их грузотранспортной связи с поверхностью, а также обеспечения безопасности горных работ по условиям камнепада. Решение этой проблемы является целью настоящих исследований. Ее реализация основана на создании временно рабочих бортов с максимально крутыми углами по условиям устойчивости, на которых располагают вскрывающие выработки, а в основании бортов – камнезащитные площадки для защиты нижней части рабочей зоны от камнепада при последующей расконсервации этих бортов.

Применение крутонаклонных бортов заключается в том, что в процессе развития карьерного пространства рабочий борт карьера со стороны лежащего бока месторождения при подходе к конечному контуру карьера превращают в предельный и на нем размещают вскрывающие выработки, служащие для грузотранспортной связи рабочих горизонтов с поверхностью. Со стороны висячего бока одновременно с развитием горных работ начинают формировать многоступенчатый, временно нерабочий борт (рис. 1), состоящий из ряда располагаемых одна на другой крутонаклонных ступеней, на которых размещают вскрывающие выработки, а в их основании устраивают камнезащитные

площадки, ширину которых принимают из расчета размещения падающих на них сверху камней, камнезащитных насыпей с установленными на них гидравлическими экскаваторами типа «обратная лопата» и автодороги (рис. 2).

После завершения формирования всех запланированных крутонаклонных ступеней временно нерабочего борта приступают к их расконсервации и отработке целика, включающего объемы горной массы, заключенные между временно нерабочим бортом и предельным бортом карьера. Отработку целика производят горизонтальными слоями с применением карьерных экскаваторов. При этом для проведения вскрывающих выработок и повышения безопасности работ при отработке приконтурных объемов предусматривают применение гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата». По мере отработки целика следом формируют предельный борт с устройством на нем вскрывающей выработки, по которой отработанные объемы вывозят на поверхность. Горную массу, подающуюся на камнезащитные площадки, грузят в транспортные средства и по вскрывающим выработкам предельного борта со стороны лежачего бока вывозят на поверхность. Последовательность ведения горных работ в карьере с отработкой отдельных объемов указана римскими цифрами (I, II, III, IV).

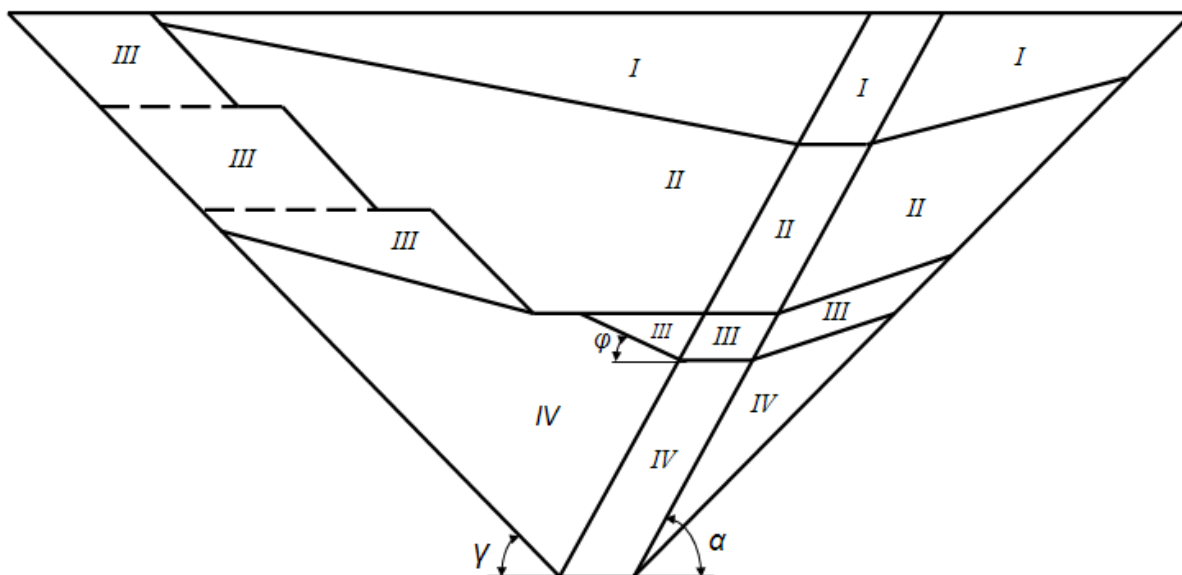


Рис. 1 – Конструкция временно нерабочего борта

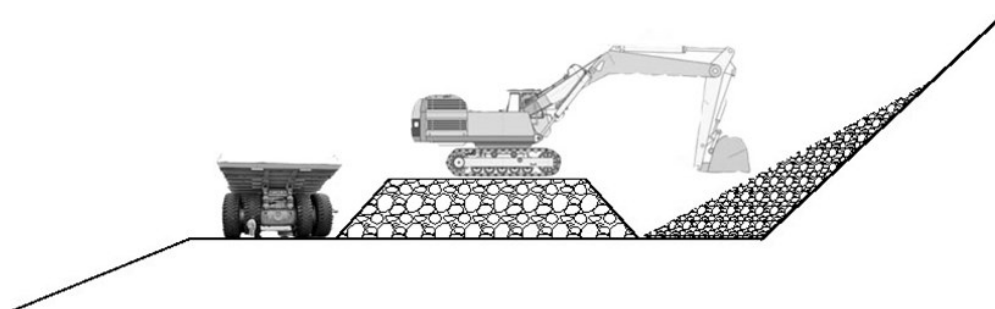


Рис. 2 – Камнезащитная площадка

Параметры временно нерабочих бортов зависят от горно-геологических и горно-технических условий, в частности, от размеров месторождения и отдельной залежи, параметров карьера (глубины, протяженности и т.д.). Главными параметрами временно

нерабочего борта является его высота, ширина, угол наклона, а для вытянутых месторождений еще длина. Их взаимосвязь проявляется через величину A (рис. 3).

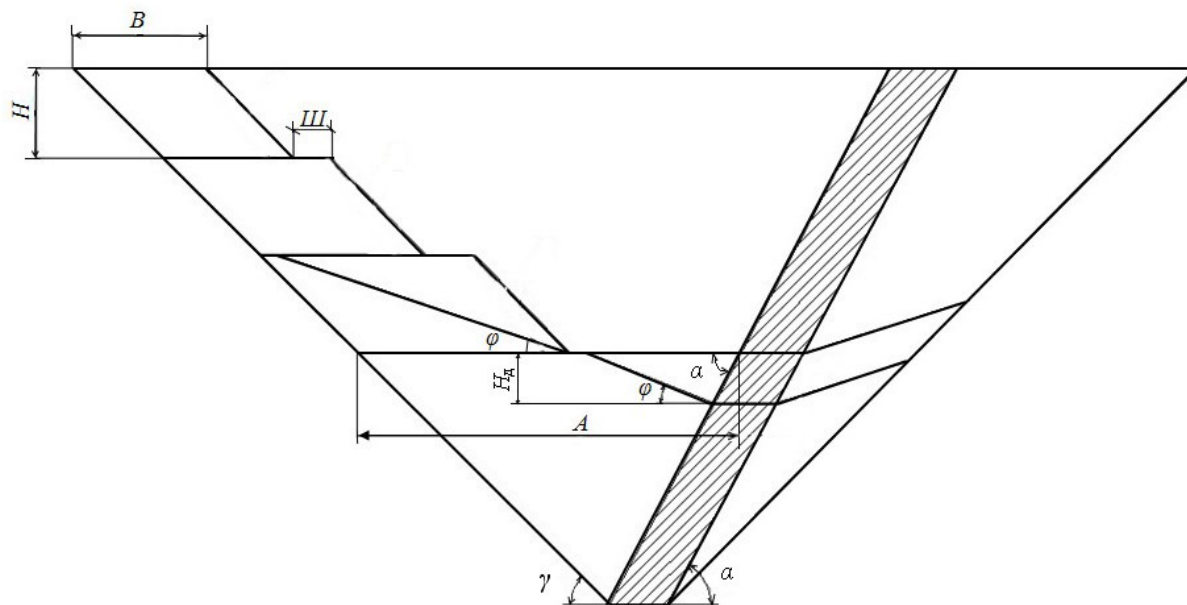


Рис. 3 – Схема крутонаклонных временно нерабочих бортов

С одной стороны:

$$A = H_d (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\varphi) + n\text{Ш} + B, \text{ м.} \quad (1)$$

С другой стороны:

$$A = (H_k - nH) (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\gamma), \text{ м.} \quad (2)$$

При определении параметров временно нерабочих бортов также должно быть выдержано условие, обеспечивающее увеличение скорости понижения работ при расконсервации временно нерабочих бортов:

$$H_d = \frac{nHh_d}{h_b}, \text{ м,} \quad (3)$$

где H_k – конечная глубина карьера, м; B – ширина верхней части целика, м; H – высота отдельных частей слоев целика, м; Ш – ширина камнезащитной площадки, м; n – количество отдельных частей слоев целика, шт.; H_d – высота зоны добычных работ, м; γ – угол погашения конечного борта карьера, град; φ – угол наклона рабочего борта, град; α – угол падения рудного тела, град; β – угол, характеризующий отклонение временно нерабочего борта от предельного борта карьера, град; h_d – скорость понижения добычных работ, м/год; h_b – скорость расконсервации временно нерабочего борта, м/год.

Приравняв правые стороны выражений (1) и (2) и подставив вместо H_d правую часть выражения (3), получим новое выражение, отражающее взаимосвязь между всеми задействованными факторами:

$$\frac{nHh_d}{h_b} (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\varphi) + n\text{Ш} + B = (H_k - nH) (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\gamma), \text{ м.} \quad (4)$$

Разрешив выражение (4) относительно B , получим формулу для определения ширины верхней части целика:

$$B = \frac{h_b H_k (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\gamma) - h_b n\text{Ш} - nHh_d (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\varphi)}{h_b}, \text{ м.} \quad (5)$$

Экономический эффект от применения временно нерабочих бортов \mathcal{E} , представляющий снижение дисконтированных затрат на вскрышные работы в результате перераспределения их во времени выемки, определяется по выражению:

$$\mathcal{E} = \sum_{t=0}^{t=T} V_t \cdot B_t - \sum_{t=0}^{t=T} V_t^{\text{п}} \cdot B_t, \text{ руб.}, \quad (6)$$

где V_t – годовые объемы вскрышных работ до применения временно нерабочих бортов, м^3 ; $V_t^{\text{п}}$ – годовые объемы вскрышных работ после применения временно нерабочих бортов, м^3 ; B_t – коэффициент приведения разновременных затрат:

$$B_t = \frac{1}{(1+E)^t}; \quad (7)$$

E – норма дисконта.

Однако способ определения экономической эффективности временно нерабочего борта предлагаемой конструкции может быть значительно упрощен, что позволит с наименьшими затратами труда находить наиболее эффективные решения. Для этого поиск достаточно ограничить только периодом от начала консервации борта до его расконсервации, одновременно ограничивая решения только объемами целика, ограниченного со стороны массива горных пород конечными границами карьера, а со стороны выработанного пространства – временно нерабочим бортом. Консервируемый объем можно определить в виде суммы объемов отдельных ступеней, рассчитанных на 1 пог. м длины карьера по формуле:

$$V_c = BH + H\Pi(K-1), \text{ м}^3/\text{пог. м}, \quad (8)$$

где K – порядковый номер ступени.

При этом объем самой нижней ступени определяется с учетом угла наклона ее основания, равного углу наклона рабочего борта карьера φ :

$$V_c = BH + H\Pi(K-1) - \frac{0,5(B + \Pi(K-1))^2}{\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\gamma}, \text{ м}^3/\text{пог. м}. \quad (9)$$

Момент начала формирования временно нерабочего борта карьера, считая от начала его разработки, определяется по выражению:

$$T = \frac{H_K(\text{ctg}\gamma + \text{ctg}\alpha) - B}{h_{\text{д}} \text{ctg}\varphi} + 1, \text{ год}. \quad (10)$$

Скорость формирования временно нерабочего борта следует принимать исходя из соответствия ее скорости понижения добычных работ $h_{\text{д}}$. Скорость расконсервации должна приниматься из условия (3), являющегося основой определения ширины верхней ступени борта. Годовые объемы консервации определяются как частное от деления объемов отдельных ступеней на величину $h_{\text{д}}$ и обозначаются знаком «минус», а годовые объемы расконсервации определяются как частное от деления этих объемов на скорость расконсервации $h_{\text{в}}$ и обозначают знаком «плюс». Сопоставляя объемы с разными знаками, получим информацию, необходимую для оценки эффективности исследуемого варианта. Поясним это на примере определения экономической эффективности применения временно нерабочего борта в условиях протяженного карьера глубиной 450 м. Угол предельного борта карьера $\gamma = 45$ град, рабочего борта $\varphi = 16$ град, угол падения рудного тела $\alpha = 90$ град, себестоимость вскрышных работ $C_{\text{в}} = 100$ руб./ м^3 , дисконтированные затраты на удаление вскрышных пород в базовом варианте 9374200 руб., количество ступеней временно нерабочего борта исследуемого варианта $n = 2$, высота ступеней $H = 60$ м, скорость понижения добычных работ $h_{\text{д}} = 20$ м/год, скорость расконсервации временно нерабочего борта $h_{\text{в}} = 60$ м/год, ширина камнезащитных площадок $\Pi = 50$ м.

По формуле (5) определяем ширину верхней ступени временно нерабочего борта:

$$B = \frac{(H_{K-n}H)(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\gamma)h_B - nh_B\Pi - nHh_g(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\varphi)}{h_B} - \frac{(450 - 2 \cdot 60)60 - 2 \cdot 50 \cdot 60 - 2 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 3,49}{60} = 90 \text{ м.}$$

Объем первой (верхней) ступени определяем по формуле (8):

$$V_1 = BH + H\Pi(K-1) = 90 \cdot 60 + 60 \cdot 50(1-1) = 5400 \text{ м}^3 / \text{пог. м.}$$

Объем второй (нижней) ступени определяем с учетом наклона и основания по формуле (9):

$$V_2 = BH + H\Pi(K-1) - 0,5(B + \Pi(n-1))^2 / (\operatorname{ctg}\varphi - \operatorname{ctg}\gamma) = 90 \cdot 60 + 60 \cdot 50(2-1) - 0,5(90 + 50(2-1))^2 / (\operatorname{ctg}16^\circ - \operatorname{ctg}90^\circ) = 5465 \text{ м}^2 / \text{пог. м.}$$

Год начала формирования временно нерабочего борта в соответствии с формулой (10):

$$T = \frac{(450 - 90)}{20\operatorname{ctg}16^\circ} + 1 = 6 \text{ лет.}$$

В соответствии с полученными объемами ступеней, временем начала консервации и скоростями консервации и расконсервации получим уменьшение и увеличение объемов вскрышных работ по годам разработки месторождения, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перераспределение объемов вскрышных работ во времени и уменьшение дисконтированных затрат в результате применения временно нерабочего борта

Год эксплуатации	Объемы консервируемой вскрыши, м ³	Объемы расконсервируемой вскрыши, м ³	Коэффициент дисконтирования V_t	Дисконтированные затраты, руб	
				консервируемых объектов	расконсервируемых объектов
6-й	-2700		0,621	-167700	
7-й	-2700		0,561	-151500	
8-й	-5465	+5400	0,515	-281400	+278100
9-й		+5465	0,466		+254700
Итого:	-10865	-10865		-600600	+532800

Примечание: знак «минус» – консервация (снижение дисконтированных затрат), «плюс» – расконсервация (увеличение дисконтированных затрат)

При себестоимости вскрышных работ $C_B = 100 \text{ руб/м}^3$ применение временного нерабочего борта приводит к снижению дисконтированных затрат до 67800 тыс. руб. Соответственно, экономический эффект от его применения при принятых исходных данных составит $67800 \times 100 \% : 9374200 = 0,73 \%$.

С целью общего представления об экономической эффективности применения рассмотренного способа формирования и расконсервации временно нерабочих бортов произведена статистическая обработка более 40 вариантов сочетания различных исходных данных, входящих в зависимость (5).

В результате статистической оценки рассмотренных вариантов установлено, что экономический эффект, представленный в виде снижения дисконтированных затрат на удаление вскрышных пород, выражается следующей зависимостью:

$$\Xi = (-1,81 + 0,0042H_K)(0,61 + 0,0075h_B + 0,00003375h_B^2)(0,735 + 0,175n) \times (0,864 + 0,0017H), \%$$

Степень влияния определяющих факторов характеризует коэффициент эластичности, показывающий на сколько процентов в среднем изменяется эффективность применения временно нерабочих бортов при изменении определяющего фактора на 1 %. Для конечной глубины карьера он составляет 1,4, для скорости понижения горных работ при расконсервации бортов 0,53, для количества ступеней 0,327 и для их высоты 0,194.

Влияние этих факторов наглядно характеризует зависимость экономического эффекта, представленная на рис. 4. Наибольшее влияние на экономическую эффективность применения крутонаклонных временно нерабочих бортов оказывает конечная глубина карьера. Чем больше его глубина, тем эффективнее применение временно нерабочих бортов. На втором месте по значимости находится скорость расконсервации временно нерабочих бортов. Значительно меньшее влияние на экономический эффект оказывает высота ступеней и их число.

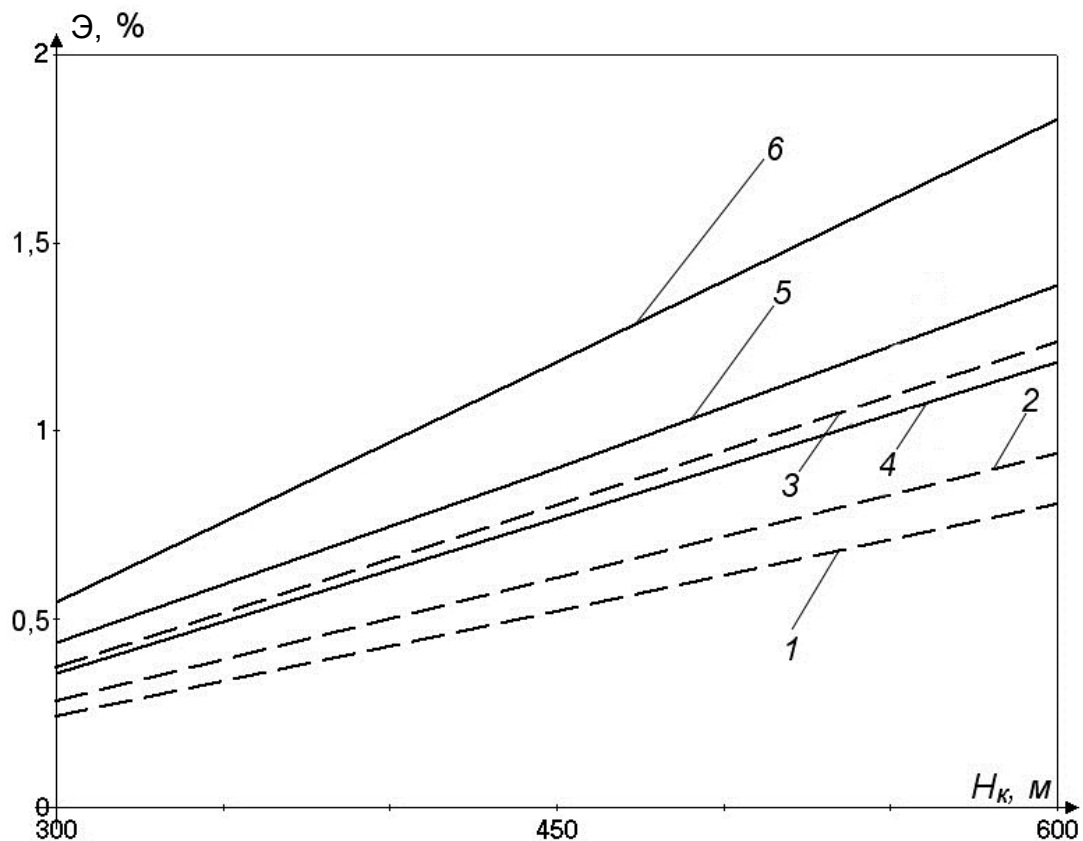


Рис. 4 – Зависимость экономического эффекта от глубины карьера при применении временно нерабочих бортов:

1 – $\pi = 1$, $h_b = 20$ м/г; 2 – $\pi = 1$, $h_b = 40$ м/г; 3 – $\pi = 1$, $h_b = 60$ м/г;
4 – $\pi = 2$, $h_b = 20$ м/г; 5 – $\pi = 2$, $h_b = 40$ м/г; 6 – $\pi = 2$, $h_b = 60$ м/г

Заключение

1. Регулирование режима горных работ глубоких карьеров на основе применения существующих конструкций временно нерабочих бортов характеризуется низкой эффективностью. Основной причиной этого является их быстрое «сползание» в рудную зону.

2. Эффективность временно нерабочих бортов глубоких карьеров может быть повышена в результате применения крутонаклонных многоступенчатых временно нерабочих бортов, разработанных в Институте горного дела УрО РАН.

3. Основными факторами, определяющими эффективность применения предложенной конструкции временно нерабочих бортов являются конечная глубина карьера, число и высота отдельных ступеней и скорость расконсервации. При глубине карьеров 500 – 600 м эффективность временно нерабочих бортов может достигать 3,5 – 4 %.

4. Большим достоинством рассмотренного способа временной консервации бортов является простота определения его параметров и экономической эффективности. При этом существует возможность дальнейшего увеличения его эффективности на основе изыскания возможности увеличения безопасной высоты отдельных ступеней и их количества.

Литература

1. Ржевский В.В. Режим горных работ при открытой добыче угля и руды / В.В. Ржевский. – М.: Углетехиздат, 1957. – 200 с.
2. Рубинштейн С.Б. Методика расчета параметров временных целиков / С.Б. Рубинштейн // Проектирование предприятий горнорудной промышленности: тем. сб. науч. тр. - № 1 / Гипромез. - М., 1977. - С. 70 – 73.
3. Линеv В.П. Определение параметров рабочей зоны карьера с участками временно нерабочего борта / В.П. Линеv // Горный журнал. – 1986. – № 5. – С. 15 – 17.
4. Хохряков В.С. Открытая разработка месторождений этапами / В.С. Хохряков // Известия вузов. Горный журнал. – 1965. – № 19. – С. 15 – 26.
5. Черепшиков П.Т. Рациональное расположение временных бортов карьеров / П.Т. Черепшиков // Известия вузов. Горный журнал. – 1967. – № 5. – С. 14 – 21.
6. Линеv В.П. Обеспечение безопасности горных работ при использовании временно нерабочих бортов / В.П. Линеv, С.Б. Рубинштейн // Горный журнал. – 2006. – № 5. – С. 20 – 23.
7. Проектирование горных работ при формировании карьерного пространства зонами концентрации: учебное пособие / В.А. Галкин, В.Н. Сидоренко, С.Е. Гавришев, А.Н. Носов. - Магнитогорск: Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова, 1991. – 57 с.
8. Пат. 2652234 Российская Федерация, МПК E21C 41/26. Способ открытой разработки наклонных месторождений с применением временно нерабочих бортов / В.Л. Яковлев, Г.Г. Саканцев, А.В. Яковлев, Т.М. Переход; заявитель и патентообладатель ИГД УрО РАН. – № 2017113248, заявл. 17.04.2017, опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12.
9. Заявка на изобретение 2018125948 Российская Федерация, МПК E21C 41/26 «Способ открытой разработки крутопадающих месторождений с применением многоступенчатых временно нерабочих бортов» (Саканцев Г.Г., заявитель ИГД УрО РАН – заявл. 13.07.2018.от 23.04. 2018).