

Технология перехода на тоннельное вскрытие при доработке глубоких кимберлитовых карьеров

Лель Ю. И.^{1*}, Глебов И. А.², Исаков С. В.¹, Мусихина О. В.¹, Ганиев Р. С.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: lel49@mail.ru

Реферат

Цель работы – обоснование технологии перехода на вскрытие глубоких горизонтов автомобильным тоннелем спиральной формы при доработке кимберлитовых карьеров, обеспечивающей сокращение объемов вскрышных работ и расширение области применения открытого способа разработки алмазородных месторождений.

Актуальность исследований. При использовании тоннельного вскрытия угол откоса нерабочего борта не зависит от уклона и ширины транспортных берм, а определяется, в основном, условиями устойчивости. Это позволяет максимально приблизить значения конструктивных углов откоса бортов к устойчивым, сократить объем вскрышных работ и увеличить глубину кимберлитовых карьеров.

Методика проведения исследований. Обоснованы параметры и технология проходки тоннеля. Разработана методика определения необходимой скорости проходки тоннеля, согласованной со скоростью понижения горных работ и временем формирования борта карьера в конечном положении на отметке портала. Установлена пропускная и провозная способности тоннеля. Использованы результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств горных пород, опыт проходки подземных выработок в АК «АЛРОСА» (ПАО), методы экономико-математического моделирования и технико-экономического анализа.

Результаты. На примере доработки Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» (ПАО) установлено, что предложенная технология позволяет увеличить результирующий угол нерабочих бортов в зоне тоннельного вскрытия до 70°–75°, сократить объемы вскрышных работ и эффективно отработать карьер до глубины 750 м, соответствующей глубине разведанных запасов.

Область применения результатов. Предлагаемая технология и методика расчета необходимой скорости проходки тоннеля могут найти применение не только при разработке кимберлитовых карьеров, но также при открытой разработке месторождений руд цветных и благородных металлов, представленных крутопадающими залежами округлой формы.

Ключевые слова: карьер; тоннель; скорость проходки; устойчивый угол; откос борта; полноприводной автосамосвал; уклон спиральной трассы; портал тоннеля; скорость углубки карьера; пропускная способность тоннеля.

Введение. В последние годы возобновился интерес горнодобывающих предприятий и проектных организаций к вскрытию глубоких горизонтов карьеров подземными выработками, в частности, тоннелями. В отечественной и зарубежной практике наибольшее распространение получило вскрытие железнодорожными тоннелями глубоких карьеров и карьеров нагорного типа. К сожалению, вопросам вскрытия глубоких горизонтов карьеров автомобильными тоннелями в технической литературе уделено значительно меньше внимания.

Впервые вскрытие глубокого золоторудного карьера законтурным автомобильным тоннелем спиральной формы, пройденным с дневной поверхности, было

предложено учеными США в 1987 г. [1]. До настоящего времени указанная разработка не нашла практического применения вследствие больших затрат на строительство и содержание тоннелей. Вместе с тем, вариант вскрытия автомобильными тоннелями имеет значительные перспективы при доработке кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО) [2–8].

В отличие от ранее опубликованных предложений институтом «Якутнипроалмаз» и УГГУ разработан вариант перехода на тоннельное вскрытие на заключительном этапе разработки карьера, когда будут исчерпаны возможности альтернативных и менее затратных способов увеличения углов откоса нерабочих бортов. Вариант реализован в инновационном проекте доработки Нюрбинского карьера до глубины 750 м (*Инновационный проект «Развитие технологии открытой разработки алмазородных месторождений (на примере доработки запасов руды тр. «Нюрбинская»)»: отчет о НИР / Якутнипроалмаз. Рук. Акишев А. Н. Мирный, 2017. 20 с.*).

Таблица 1. Техничко-экономические показатели проходки тоннелей
Table 1. Technical-economic indicators of tunnel driving

Способ проходки	Скорость проходки, м/мес	Стоимость проходки, тыс. руб./м ³
Буровзрывной	45–55	25,0
Комбайновый	80–90	41,5

Методика проведения исследований. Результаты. Параметры и технология проходки законтурных автомобильных тоннелей спиральной формы определяют технико-экономические показатели тоннельного вскрытия глубоких горизонтов карьеров [9].

При обосновании технологии доработки Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» (ПАО) было рассмотрено три варианта тоннельного вскрытия.

Первый вариант – вскрытие однопутным тоннелем спиральной формы с организацией обмена автосамосвалов в нишах.

Второй вариант – вскрытие двухпутным тоннелем спиральной формы.

Третий вариант – вскрытие двумя отдельными однопутными тоннелями спиральной формы, предназначенными для грузового и порожнякового движения технологического автотранспорта.

Для условий кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО) наиболее приемлемыми по технологическим и экономическим условиям являются первый и третий варианты. При вскрытии глубоких горизонтов Нюрбинского карьера к детальному рассмотрению был принят первый вариант. Институтом «Якутнипроалмаз» рассматривался третий вариант при обосновании вскрытия глубоких горизонтов трубки «Архангельская» [10].

Параметры поперечного сечения тоннеля установлены на основании нормативных материалов, параметров проходческого оборудования и автосамосвалов, используемых на проходке [11–13]. На проходке предусматривается применение полноприводных автосамосвалов САТ-745С (41 т), используемых в технологии отработки глубинной зоны Нюрбинского карьера. Первый вариант тоннельного вскрытия обеспечивает сокращение объемов работ по проходке в 1,9–2,3 раза по сравнению со вторым и третьим вариантами.

При обосновании технологии проходки тоннеля рассмотрено два альтернативных способа: буровзрывной способ проходки и способ проходки с использованием комбайна избирательного действия. Указанные способы широко применяются при проходке подземных выработок в АК «АЛРОСА» [14, 15]. Технико-экономические показатели проходки однопутных тоннелей в условиях АК «АЛРОСА» приведены в табл. 1.

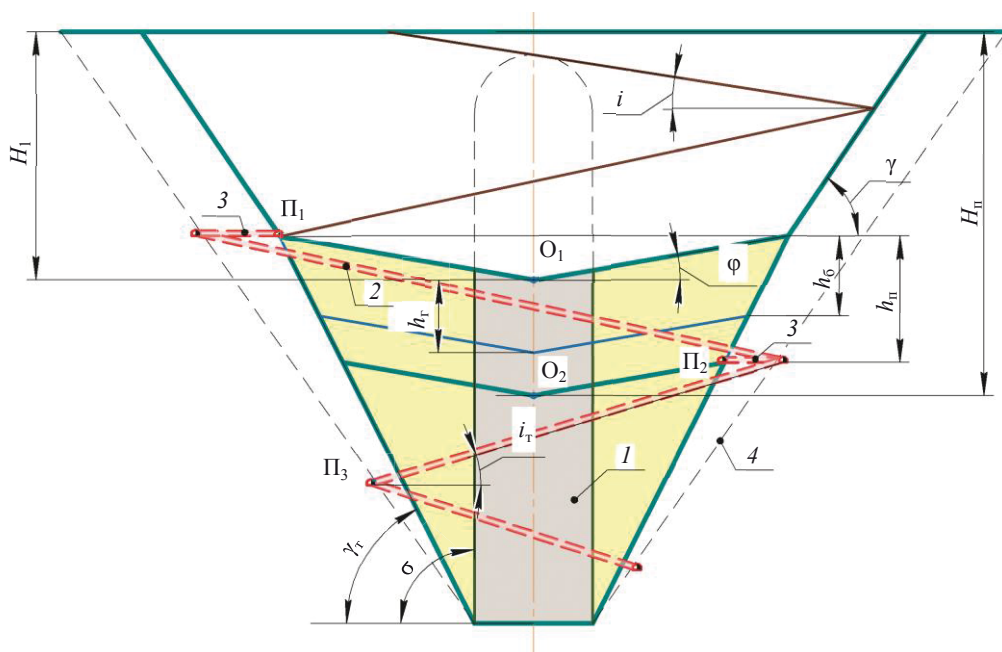


Рисунок 1. Схема перехода к способу вскрытия глубоких горизонтов карьера законтурным тоннелем спиральной формы: 1 – рудное тело; 2 – тоннель; 3 – квершлаг; 4 – граница зоны действия открытых работ; h_t – вертикальная скорость углубки карьера, м/год; h_6 – вертикальная скорость формирования нерабочего борта карьера, м/год; h_n – расстояние по вертикали между порталами тоннеля, м; H_1 – глубина карьера на момент начала строительства тоннеля; σ – угол направления углубки, град; γ_t – угол откоса нерабочего борта карьера в зоне тоннельного вскрытия, град; γ – угол откоса нерабочего борта карьера в зоне вскрытия спиральными автосъездами, град, $\gamma < \gamma_t$; i_t – уклон тоннельного автосъезда, доли ед.; i – уклон автодороги спирального съезда, доли ед.; ϕ – угол откоса рабочего борта карьера, град; H_n – глубина перехода на тоннельное вскрытие, м; Π_1, Π_2, Π_3 – порталы тоннеля; O_1 – положение дна карьера к моменту начала строительства тоннеля; O_2 – положение дна карьера к моменту перехода на тоннельное вскрытие

Figure 1. Scheme of transition to the method of opening deep horizons using a marginal spiral tunnel: 1 – ore body; 2 – tunnel; 3 – cross-cut; 4 – boundary of opencasting area; h_t – vertical sinking rate, m/year; h_6 – vertical rate of non-mining slope formation, m/year; h_n – vertical distance between tunnel portals, m; H_1 – open pit depth at the start of tunnel construction; σ – sinking direction angle, degrees; γ_t – non-mining slope angle in the tunnel opening zone, degrees; γ – non-mining slope angle in the zone of opening by spiral ramps, degrees, $\gamma < \gamma_t$; i_t – the tunnel ramp slope, fraction of units; i – slope of the spiral ramp, fraction units; ϕ – mining slope angle, degrees; H_n – depth of transition to tunnel opening, m; Π_1, Π_2, Π_3 – tunnel portals; O_1 – position of the pit bottom at the start of construction; O_2 – position of the pit bottom at the transition to tunnel opening

Установлено, что по скорости проходки оба варианта являются приемлемыми для принятой технологии тоннельного вскрытия. В то же время для дальнейших расчетов был принят более дешевый буровзрывной способ проходки.

Переход на вскрытие глубоких горизонтов автомобильным тоннелем спиральной формы предполагается осуществить на третьем заключительном этапе раз-

работки карьера, когда будут исчерпаны возможности альтернативных и менее затратных способов увеличения углов откоса нерабочих бортов, в частности, применения крутонаклонных автосъездов.

Технология перехода на способ вскрытия законтурным тоннелем спиральной формы заключается в следующем (рис. 1).

1. При глубине карьера H_1 (положение дна O_1) на границе пересечения рабочего и нерабочего бортов начинается проходка соединительного квершлага (портала Π_1) и тоннеля. По условиям безопасности проходка тоннеля производится за границей зоны действия открытых горных работ (зоны сдвижения). Квершлаг (портал Π_1) осуществляет соединение тоннеля с системой капитальных крутонаклонных спиральных автосъездов в верхней зоне карьера. Квершлаг является капитальной горной выработкой, срок эксплуатации которой равен сроку работы тоннеля.

2. В период строительства тоннеля до глубины h_n (расстояние по вертикали между порталами) транспортирование горной массы производится по временным автосъездам в рабочей зоне до портала Π_1 , а затем по постоянным автосъездам в верхней зоне карьера. Одновременно производится опережающая постановка участка борта в конечное положение в месте планируемого выхода тоннеля в рабочую зону карьера с помощью нового квершлага (портал Π_2). Скорость проходки тоннеля и квершлага должна быть согласована с развитием горных работ в рабочей зоне и формированием борта в нерабочее положение на отметке портала Π_2 . Расстояние во вертикали между порталами принимается равным 30–45 м, что соответствует высоте нерабочего уступа.

3. Окончание строительства и обустройства тоннеля до глубины h_n и обеспечение его выхода в рабочую зону (портал Π_2) совмещается с ликвидацией временных автосъездов в рабочей зоне и постановкой бортов в нерабочее положение по всему периметру карьера (положение дна O_2). На нерабочих бортах остаются только бермы безопасности, что обеспечивает увеличение угла γ_t откоса ($\gamma_t > \gamma$) и сокращение объемов вскрышных работ.

4. На следующем этапе транспортирование горной массы производится по временным автосъездам до портала Π_2 и далее по квершлагам и тоннелю до портала Π_1 . Цикл повторяется до ввода в эксплуатацию нового портала Π_3 . Для непрерывного функционирования схемы вскрытия время погашения соединительного квершлага на верхнем горизонте должно соответствовать времени ввода в эксплуатацию нового квершлага на нижнем горизонте карьера. На конец разработки в эксплуатации остается квершлаг на нижнем горизонте, обеспечивающий выход тоннеля в рабочую зону, и квершлаг на верхнем горизонте (портал Π_1), обеспечивающий соединение тоннеля с системой спиральных автосъездов.

Таким образом, при реализации вскрытия автомобильным тоннелем должно соблюдаться условие:

$$(T_t + T_{кв}) \leq T_6, \quad (1)$$

где T_t – продолжительность строительства тоннеля на глубину h_n , лет; h_n – расстояние по вертикали между порталами тоннеля, м; $T_{кв}$ – продолжительность строительства квершлага, обеспечивающих выход в рабочую зону карьера и соединение тоннеля с системой спиральных автосъездов, лет; T_6 – продолжительность формирования нерабочего борта карьера на высоту h_n , лет.

Продолжительность формирования нерабочего борта карьера:

$$T_6 = h_n / h_6, \quad (2)$$

где h_6 – вертикальная скорость формирования нерабочего борта карьера, м/год,

$$h_6 = h_r (\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\sigma) / (\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\gamma_r). \tag{3}$$

Продолжительность строительства тоннеля:

$$T_r = l_r / v_{\text{тн}}, \tag{4}$$

где $v_{\text{тн}}$ – скорость проходки тоннеля, м/год; l_r – длина тоннеля при вскрытии на глубину h_n , м,

$$l_r = h_n k_{\text{р.т}} / i_r, \tag{5}$$

$k_{\text{р.т}}$ – коэффициент развития трассы, доли ед.

Продолжительность строительства квершлагав:

$$T_{\text{кв}} = l_{\text{кв}} / v_{\text{тн}}, \tag{6}$$

где $l_{\text{кв}}$ – длина квершлагав, м.

После подстановки соотношений (2)–(6) в неравенство (1) получим:

$$v_{\text{тн}} \geq \frac{h_r (\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\sigma) (h_n k_{\text{р.т}} + i_r l_{\text{кв}})}{h_n (\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\gamma_m) i_r}, \tag{7}$$

Выражение (7) определяет требования к скорости проходки законтурного тоннеля. Учитывая, что на кимберлитовых карьерах $\sigma = 85^\circ\text{--}90^\circ$ и $\text{ctg}\alpha \approx 0$, можно записать:

$$v_{\text{тн}} \geq \frac{h_r \text{ctg}\varphi (h_n k_{\text{р.т}} + i_r l_{\text{кв}})}{h_n (\text{ctg}\varphi - \text{ctg}\gamma_m) i_r}.$$

Исходные данные для расчета необходимой скорости проходки тоннеля в условиях Нюрбинского карьера приведены далее.

Параметры глубинной зоны Нюрбинского карьера, вскрываемой законтурным тоннелем

Конечная глубина карьера H_k , м	750
Глубина перехода на тоннельное вскрытие H_n , м	570
Высота нерабочего борта в зоне тоннельного вскрытия $H_{\text{нб}}$, м	225
Угол откоса нерабочего борта в зоне тоннельного вскрытия, град:	
устойчивый γ_r	75
конструктивный γ'_r	69–75
Вертикальная скорость углубки карьера h_r , м/год	25
Расстояние по вертикали между порталами тоннеля h_n , м	45
Угол откоса рабочего борта карьера φ , град	16–18
Высота нерабочего уступа h_y , м	45
Угол откоса нерабочего уступа α , град	80
Ширина бермы безопасности b_6 , м	10–12
Уклон тоннельного автосъезда i_r , доли ед.	0,20
Коэффициент развития трассы $k_{\text{р.т}}$, доли ед.	1,083
Средняя длина соединительного квершлага $l_{\text{кв}}$, м	100
Максимальный объем перевозок горной массы через тоннель Q_r , млн т/год	2,23

Инновационным проектом разработки Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» (ПАО) до глубины 750 м, соответствующей глубине разведанных запасов, обоснована величина устойчивого угла откоса борта $\gamma_T = 75^\circ$ [16].

Конструктивный угол откоса нерабочего борта (γ'_T) при использовании традиционной технологии постановки бортов в конечное положение определяется из выражения

$$\gamma'_T = \arctg \frac{H_{нб}}{\left(\frac{H_{нб}}{h_y} - 1 \right) b_6 + H_{нб} \operatorname{ctg} \alpha}$$

Используя значения параметров Нюрбинского карьера, получим $\gamma'_T = 69,0^\circ - 70,5^\circ$.

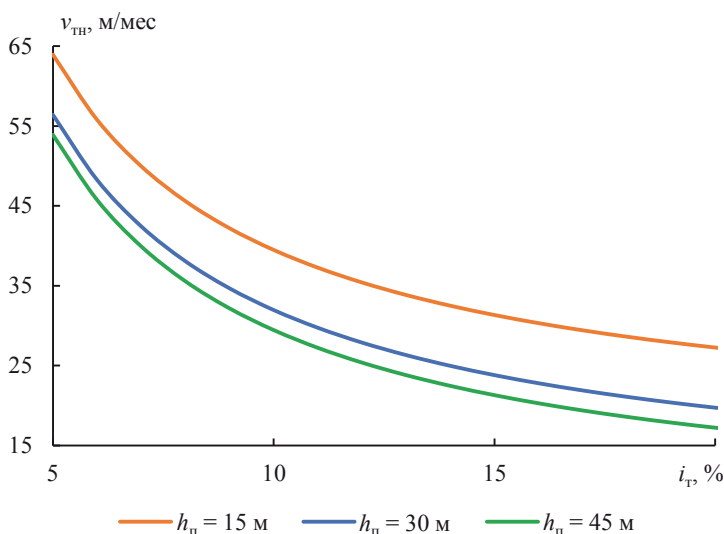


Рисунок 2. Зависимость необходимой скорости проходки тоннеля $v_{ТН}$ от уклона тоннельного автосъезда i_T и вертикального расстояния между порталами h_n

Figure 2. Dependence of the required tunneling rate $v_{ТН}$ on the tunnel ramp slope i_T and the vertical distance between the portals h_n

В то же время институтом «Якутнипроалмаз» разработан ряд технологических решений, позволяющих максимально приблизить конструктивный угол нерабочего борта к величине устойчивого угла. Технологические решения заключаются в устройстве тросово-сетчатой защиты уступов, обеспечивающей удержание и гашение кинетической энергии падающих кусков породы; придании предохранительным бермам минимально необходимой ширины за счет применения «щадящей» технологии при их нарезке; создании защитных устройств в основании уступов и т. п. [15].

При использованных исходных необходимая скорость проходки тоннеля составит $v_{ТН} \geq 209 - 216$ м/год или $v_{ТН} \geq 17,4 - 18,0$ м/мес (рис. 2).

Таким образом, необходимая скорость проходки определяется скоростью углубки карьера, уклоном тоннельного автосъезда и вертикальным расстоянием

между порталами, зависит от углов наклона рабочего и нерабочего бортов карьера и направления углубки. Наибольшее влияние на значение необходимой скорости оказывают первые три фактора: h_r , i_r и h_n .

При уменьшении уклона тоннельного автосъезда с 20 до 8–10 % и вертикального расстояния между порталами с 45 до 15 м необходимая скорость проходки возрастает в 2,5–3,0 раза и приближается к максимально возможной по техническим условиям. Это обуславливает необходимость и эффективность применения полноприводных автосамосвалов и повышенных уклонов при тоннельном вскрытии глубоких горизонтов, а также конструкции поперечного сечения тоннеля с однополосным движением автотранспорта.

Продолжительность строительства тоннеля и соединительного квершлага на глубину h_n , соответствующую высоте нерабочего уступа, определяется из выражения

$$(T_r + T_{кв}) \leq \frac{h_n (\operatorname{ctg}\varphi - \operatorname{ctg}\gamma_r)}{h_r \operatorname{ctg}\varphi}.$$

Для условий Нюрбинского карьера при $h_n = 45$ м $(T_r + T_{кв}) \leq 1,6$ –1,7 года, при $h_n = 30$ м $(T_r + T_{кв}) \leq 1,0$ –1,1 года.

Полученные значения устанавливают периодичность ввода нового квершлага на нижнем горизонте и погашения квершлага на верхнем.

Согласно календарному графику доработки Нюрбинского карьера, пропускная и провозная способности тоннеля должны обеспечить перевозку горной массы в объеме не менее 2,23 млн т/год, что соответствует годовым объемам транспортирования через тоннель в период 2035–2037 гг.

Рассмотрим условия, при которых обеспечиваются указанные объемы перевозок.

Пропускная способность однопутного тоннеля P , авт./ч:

$$P = \frac{1}{T_n} = 1 / \left(\frac{2l_p}{v_r} + \tau \right),$$

где T_n – время интервала между автосамосвалами, ч; l_p – расстояние между нишами для разминовки груженых и порожних автосамосвалов, км; v_r – среднетехническая скорость движения автосамосвала на автосъезде в тоннеле, км/ч; τ – время на связь, ч (при автоматизированном управлении транспортными потоками $\tau = 0$).

Сменная пропускная способность тоннеля $P_{см}$, авт./см.:

$$P_{см} = P \frac{k_x}{k_{нд}} T_{см} k_n,$$

где k_x – коэффициент, учитывающий перевозку хозяйственных грузов, $k_x \approx 0,8$; $k_{нд}$ – коэффициент неравномерности движения автотранспорта, $k_{нд} = 1,4$ –1,5; $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; k_n – коэффициент использования рабочего времени смены.

Годовая пропускная способность тоннеля P_r , авт./год:

$$P_r = P_{см} n_{см} N_r,$$

где $n_{см}$ – число смен в сутки; N_r – число рабочих дней в году.

Годовая провозная способность тоннеля Π_r , млн т/год:

$$\Pi_r = P_r k_r G \cdot 10^{-6},$$

где k_r – коэффициент использования грузоподъемности; G – грузоподъемность автосамосвала, т.

При тоннельном вскрытии должно соблюдаться условие

$$\Pi_r \geq Q_r,$$

где Q_r – максимальный годовой объем перевозок горной массы через тоннель согласно календарному графику доработки карьера, млн т/год.

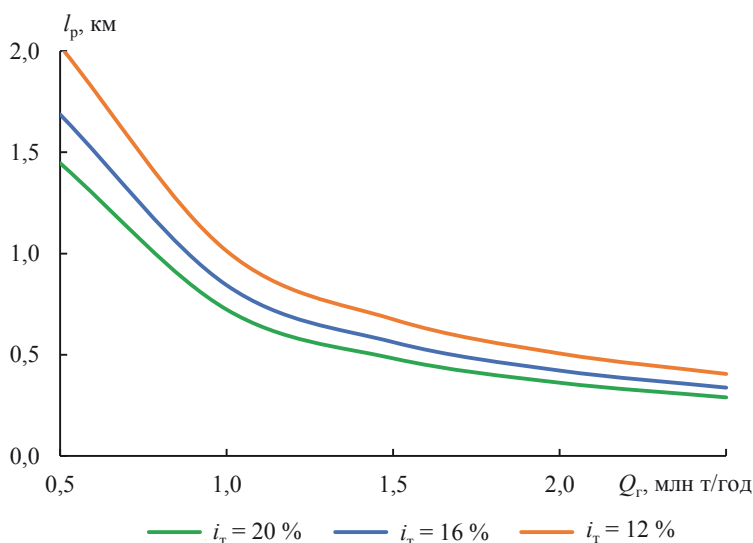


Рисунок 3. Зависимость расстояния между нишами для разминки автосамосвалов CAT-745С в тоннеле l_p от годового объема перевозок горной массы Q_r и уклона тоннельного автосъезда i_r

Figure 3. Dependence of the distance between niches for pass of CAT-745С dump trucks in the tunnel l_p on the annual volume of rock mass transportation Q_r and the tunnel ramp slope i_r

Отсюда получим аналитическую зависимость, определяющую требования к расстоянию между нишами для разминки автосамосвалов, обеспечивающему заданный объем перевозок:

$$l_p \leq \frac{k_r G v_r k_x T_{cm} k_{и} n_{cm} N_r}{2 Q_r k_{нд} \cdot 10^6},$$

для условий Нюрбинского карьера при использовании автосамосвала Caterpillar 745С и $i_r = 20\%$ $k_r = 1,0$; $G = 41$ т; $v_r = 9,8$ км/ч; $k_x = 0,8$; $T_{cm} = 8$ ч; $k_{и} = 0,75$; $n_{cm} = 3$; $N_r = 350$ дней; $Q_r = 2,23$ млн т/год; $k_{нд} = 1,4$ получим $l_p \leq 0,32$ км.

Таким образом, пропускная и провозная способности тоннелей с однополосным движением автотранспорта определяются расстоянием между

нишами для разминки машин, грузоподъемностью транспортных средств, уклоном тоннельного автосъезда и объемом горной массы, перевозимой через тоннель (рис. 3). В условиях Нюрбинского карьера расстояние между нишами для разминки машин должно составлять не более 320 м, что обеспечивается технологией тоннельного вскрытия. Ниши для разминки автосамосвалов целесообразно располагать на горизонтальных участках соединительных квершлаггов.

При увеличении объемов перевозок через тоннель возможно использование варианта вскрытия тоннелем с двухполосным движением автотранспорта или варианта вскрытия отдельными тоннелями для грузового и порожнякового движения машин. Указанные варианты будут характеризоваться увеличением затрат на строительство и содержание тоннелей и требуют отдельного технико-экономического обоснования.

Технико-экономическая оценка. Выводы. Предварительными расчетами установлено, что внедрение комбинированной схемы вскрытия с использованием крутонаклонных автосъездов и законтурного автомобильного тоннеля спиральной формы на Нюрбинском карьере АК «АЛРОСА» (ПАО) позволит сократить объем вскрыши в 6–8 раз по сравнению с традиционной схемой вскрытия. Экономический эффект составит 13,7 млрд руб.

Основные результаты исследования удостоены диплома в номинации «Инновационный проект» открытого конкурса инновационных проектов АК «АЛРОСА» (ПАО) и приняты к внедрению.

Область применения результатов. Разработанная технология и методика расчета необходимой скорости проходки тоннеля могут найти применение не только при разработке кимберлитовых карьеров, но также при открытой разработке месторождений руд цветных и благородных металлов, представленных крутопадающими залежами округлой формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining // Mining Engineering. 1987. Vol. 39. No. 2. P. 119–123.
2. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine // Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey. IMCET 2015. Antalya, Turkey. P. 606–611.
3. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt M. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine // Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, April 14–17, 2015. P. 606–611. URL: https://www.researchgate.net/publication/279182923_Stability_Analysis_and_Optimized_Slope_Angle_for_the_Iron_Ore_Open-Pit_Mine
4. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode // Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011. 2011. P. 4404–4407.
5. Brown D., Heather R. Development of off-highway articulated dump trucks // SAE Technical Paper, D. J. V. Engineering Ltd. 1979. 12 p.
6. Глебов А. В. Технологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 3. С. 238–245.
7. Лель Ю. И., Глебов И. А., Буднев А. Б., Исаков С. В., Ганиев Р. С. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 21–32.
8. Трубецкой К. Н., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А., Попова Т. М. Роботизированные горнотехнические системы при открытой разработке полезных ископаемых // Горный журнал. 2016. № 5. С. 21–27.
9. Акишев А. Н., Костырин В. Ф. Оптимизация проектных решений по отработке карьера «Юбилейный» // Горный журнал. 2000. № 7. С. 33–35.
10. Акишев А. Н., Бокий И. Б., Зырянов И. В. К вопросу развития геотехнологии открытой разработки алмазородных месторождений // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. Якутск, Россия, 25 апреля 2018 г. Якутск, 2018. С. 267–274.

11. Носенко А. С., Домницкий А. А., Шемшура Е. А., Каргин Р. В. К вопросу о выборе комплексов оборудования для строительства транспортных тоннелей комбайновым способом // Дороги и мосты. 2014. Т. 2. № 32. С. 40–54.

12. Каргин Р. В., Носенко А. С., Домницкий А. А., Шемшура Е. А. К вопросу классификации тоннелей на автомобильных дорогах // Дороги и мосты. 2015. № 33. С. 217–233.

13. Носенко А. С., Домницкий А. А., Черных В. Г. Применение комбайновой технологии при строительстве транспортных тоннелей // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 3. С. 26–28.

14. Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. С. Чаадаева, И. В. Зырянова, И. Ф. Бондаренко. Новосибирск: Наука, 2011. 582 с.

15. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений Якутии. Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. 568 с.

16. Лель Ю. И., Бокий И. Б., Глебов И. А., Исаков С. В., Ганиев Р. С. Технология формирования нерабочих бортов глубоких кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 6. С. 39–52.

Поступила в редакцию 18 ноября 2023 года

Сведения об авторах:

Лель Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета; заместитель главного редактора издания «Известия вузов. Горный журнал». E-mail: lel49@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0590-4482>

Глебов Игорь Андреевич – научный сотрудник Института горного дела УрО РАН. E-mail: i.glebov@igduran.ru

Исаков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: hemul92@mail.ru

Мусихина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: musikhina_o@mail.ru

Ганиев Руслан Салаватович – старший преподаватель кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: sunmail2003@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1674-6432>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-38-49

The technology of transition to tunnel opening when cleaning up deep kimberlite pipes

Iurii I. Lel¹, Igor A. Glebov², Sergei V. Isakov¹, Olga V. Musikhina¹, Ruslan S. Ganiev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research objective is to substantiate the technology of transition to opening deep horizons with a spiral ramp tunnel when cleaning up kimberlite pipes, ensuring reduced stripping work and increased scope the open-pit method of diamond ore deposits development.

Research relevance. Under tunnel opening, the non-mining slope angle does not depend on the transport berms slope angle and width. It is determined mainly by stability conditions. This makes it possible to bring the values of the design slope angles as close as possible to stable ones, reduce stripping work and increase the depth of kimberlite pipes.

Methods of research. The parameters and technology of tunnel driving are substantiated. A method has been developed for determining the required tunnel driving rate, consistent with the sinking rate and the time of pit slope formation to the final position at the portal mark. The tunnel traffic capacity and transportation capacity have been determined. The results of experimental studies

of the physical-mechanical properties of rocks were used, as well as the experience of driving underground workings at AK ALROSA PJSC, methods of economic-mathematical modeling, and technical-economic analysis.

Results. Using the example of the ALROSA's Nyurba open-pit mine cleaning up, it was established that the proposed technology makes it possible to increase the non-mining slopes resulting angle in the tunnel opening zone to 70°–75°, reduce stripping work and effectively develop the open pit to a depth of 750 m, which corresponds to the depth of proven reserves.

Scope of results. The proposed technology and method for calculating the required tunnel driving rate can be used not only for kimberlite pipes, but also in open-pit mining of non-ferrous and precious metal ore deposits, represented by steeply dipping round deposits.

Keywords: open pit; tunnel; tunnel driving rate; stable angle; slope angle; all-wheel drive dump truck; slope of the spiral ramp; tunnel portal; open pit sinking rate; tunnel traffic capacity.

REFERENCES

1. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining. *Mining Engineering*. 1987; 39(2): 119–123.
2. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine. *Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey. IMCET 2015. Antalya, Turkey*. P. 606–611.
3. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt M. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine. *Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, April 14–17, 2015*. P. 606–611. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/279182923>
4. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode. *Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011*. 2011. P. 4404–4407.
5. Brown D., Heather R. Development of off-highway articulated dump trucks. SAE Technical Paper, D. J. B. Engineering Ltd. 1979.
6. Glebov A. V. Technological peculiar features in deposit opening of solid minerals while using articulated dump trucks. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2018; 17(3): 238–245. (In Russ.)
7. Lel Iu. I., Glebov I. A., Budnev A. B., Isakov S. V., Ganiev R. S. Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 7: 21–32. (In Russ.)
8. Trubetskoi K. N., Vladimirov D. Ia., Pytalev I. A., Popova T. M. Robotic systems for open pit mineral mining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 5: 21–27. (In Russ.)
9. Akishev A. N., Kostyrin V. F. Optimizing design solutions on Yubileyny open pit mining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2000; 7: 33–35. (In Russ.)
10. Akishev A. N., Bokii I. B., Zyrianov I. V. On the development of geotechnology for open-cast mining of diamond deposits. In: *Improving mining technology and staff training to ensure technosphere safety in the conditions of the north-east of Russia: Proceedings of the All-Russian scient. and pract. conf. with internat. particip., Yakutsk, 25 April, 2018*. P. 267–274. (In Russ.)
11. Nosenko A. S., Domnitskii A. A., Shemshura E. A., Kargin R. V. Choosing equipment facilities for transport tunnels construction using the heading technology. *Dorogi i mosty = Roads and Bridges*. 2014; 2(32): 40–54. (In Russ.)
12. Kargin R. V., Nosenko A. S., Domnitskii A. A., Shemshura E. A. Regarding the classification of tunnels at motor ways. *Roads and Bridges*. 2015; 33: 217–233. (In Russ.)
13. Nosenko A. S., Domnitskii A. A., Chernykh V. G. Continuous heading machine technologies application in road tunnels construction. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2018; 3: 26–28. (In Russ.)
14. Chaadaev A. S., Zyrianov I. V., Bondarenko I. F. (eds.) *Problems and ways of efficient mining of diamond deposits: Proceedings of the Internat. scient. and pract. conf.* Novosibirsk: Nauka Publishing; 2011. (In Russ.)
15. Kolganov V. F., Akishev A. N., Drozdov A. V. *Mining and geological characteristics of primary deposits in Yakutia*. Mirny: Mirninskaya gorodskaya tipografiya Publishing; 2013. (In Russ.)
16. Lel Iu. I., Bokii I. B., Glebov I. A., Isakov S. V., Ganiev R. S. A technology for nonmining flanks formation at deep kimberlite open pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 6: 39–52. (In Russ.)

Information about the authors:

Iurii I. Lel – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: lel49@mail.ru;

Igor A. Glebov – researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: i.glebov@igduran.ru

Sergei V. Isakov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: hemul92@mail.ru

Olga V. Musikhina – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: musikhina_o@mail.ru

Ruslan S. Ganiev – senior lecturer, Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: sunmail2003@mail.ru

Для цитирования: Лель Ю. И., Глебов И. А., Исаков С. В., Мусихина О. В., Ганиев Р. С. Технология перехода на тоннельное вскрытие при доработке глубоких кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 6. С. 38–49. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-38-49

For citation: Lel Iu. I., Glebov I. A., Isakov S. V., Musikhina O. V., Ganiev R. S. The technology of transition to tunnel opening when cleaning up deep kimberlite pipes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 6: 38–49 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-38-49