

## К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров

Лель Ю. И.<sup>1\*</sup>, Глебов И. А.<sup>2</sup>, Буднев А. Б.<sup>1</sup>, Исаков С. В.<sup>1</sup>, Ганиев Р. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

\*e-mail: lel49@mail.ru

### Реферат

**Цель работы** – обоснование оптимальных уклонов автодорог при эксплуатации полноприводных автосамосвалов и разработка аналитического метода расчета объема дополнительного разноса нерабочих бортов карьера от размещения автотранспортных коммуникаций при вскрытии глубоких кимберлитовых карьеров трассами спиральной формы.

**Актуальность исследования.** Переход на вскрытие крутонаклонными автосъездами при использовании полноприводных автосамосвалов является одним из основных направлений повышения эффективности отработки глубоких кимберлитовых карьеров. В связи с этим весьма актуальными становятся вопросы обоснования уклонов автодорог и разработка метода расчета дополнительного разноса бортов карьера от размещения автотранспортных коммуникаций.

**Методика проведения исследований.** При обосновании уклона автодорог для полноприводных автосамосвалов использовался физический принцип наименьшего действия, тягово-динамические, тормозные и топливные характеристики самосвалов, а также экспериментальные данные. Введено новое понятие «удельное действие». Оптимальный уклон по критерию удельного действия соответствует минимальным энергозатратам на подъем горной массы при максимальной производительности транспортных средств. Разработанный аналитический метод расчета объема дополнительного разноса бортов карьера характеризуется комплексным учетом основных технологических параметров вскрытия. Предложен графический метод определения угла нерабочего борта карьера, являющегося контролируемым параметром при вскрытии крутонаклонными автосъездами.

**Результаты.** Установлено, что оптимальные значения уклонов по физическому критерию удельного действия определяются зависимостями КПД трансмиссии, скоростей движения и удельного расхода топлива полноприводными автосамосвалами от суммарного сопротивления движению на уклонах. Для автосамосвалов САТ-745С оптимальные значения уклонов автодорог со щебеночным покрытием находятся в диапазоне 0,18–0,24. Установлены закономерности влияния основных горнотехнических факторов на объем дополнительного разноса бортов от размещения автотранспортных коммуникаций. Наибольшее влияние на объем разноса оказывает глубина карьера, уклон спиральных автосъездов и мощность рудного тела. При увеличении мощности рудного тела влияние уклона снижается. Таким образом, внедрение крутонаклонного вскрытия в первую очередь рекомендуется на кимберлитовых карьерах при разработке рудных тел небольшой мощности.

**Область применения результатов.** Полученные результаты рекомендуется использовать в практике проектирования и эксплуатации глубоких кимберлитовых карьеров при внедрении полноприводных автосамосвалов. Результаты могут найти применение на рудных карьерах при вскрытии глубоких горизонтов спиральными автосъездами.

**Ключевые слова:** карьер; глубина карьера; полноприводный автосамосвал; уклон автосъезда; принцип наименьшего действия; расход топлива; дополнительный разнос бортов; угол откоса бортов; мощность рудного тела.

**Введение.** Одним из технологических решений по повышению эффективности отработки глубоких карьеров и расширению области применения открытого способа разработки при освоении коренных месторождений алмазов является переход с определенной глубины на вскрытие крутонаклонными автосъездами. Термин «крутонаклонные автосъезды» был впервые применен в трудах институ-

та «Якутнипроалмаз» в связи с рассмотрением перспектив использования при отработке глубоких кимберлитовых карьеров специализированных автосамосвалов (гусеничных или полноприводных с шарнирно-сочлененной рамой), способных работать на уклонах автодорог, значительно превышающих 8–10 %, характерные для автосамосвалов с колесной формулой 4 × 2 [1]. В связи с конструктивными недостатками, низкой экономичностью и отсутствием серийного производства карьерных гусеничных автосамосвалов в настоящее время в проектах рассматриваются только полноприводные шарнирно-сочлененные автосамосвалы с колесной формулой 6 × 6, в основном фирм VOLVO и CATERPILLAR, получивших достаточно широкое распространение в отечественной горной промышленности (табл. 1).

**Таблица 1. Технические характеристики полноприводных автосамосвалов**  
**Table 1. Technical characteristics of four-wheel drive dump trucks**

Фирма-производитель	Модель	Грузоподъемность $G$ , т	Вместимость кузова $V_a$ , м <sup>3</sup>	Мощность двигателя $N_d$ , кВт	Собственная масса $G_a$ , т	Ширина автосамосвала $B_a$ , мм	Коэффициент тары $k_T$	Удельная мощность $N_{уд}$ , кВт/т
CATERPILLAR	725C	23,6	11,0	239,0	22,9	2820	0,96	4,50
	730C	28,0	13,3	280,0	23,7	2900	0,83	4,44
	735C	32,7	15,0	337,0	31,0	3300	0,91	4,34
	745C	41,0	18,5	381,0	32,9	3450	0,80	5,15
VOLVO	A25D	24,0	11,7	224,0	21,6	2859	0,90	4,90
	A30D	28,0	13,6	252,0	23,0	2941	0,82	4,97
	A35D	32,5	15,2	289,0	28,3	3208	0,87	4,75
	A40D	37,0	16,9	313,0	31,3	3432	0,85	4,60

Основные преимущества полноприводных автосамосвалов заключаются в использовании крутонаклонных автосъездов ( $i$  до 25–30 %) и транспортных берм меньшей ширины по сравнению с автосамосвалами с колесной формулой 4 × 2, что позволяет увеличить углы наклона нерабочих бортов карьеров, сократить дополнительный объем вскрыши от размещения транспортных коммуникаций и повысить экономические показатели открытого способа разработки [2–4]. В настоящее время на отечественных глубоких карьерах имеется ограниченный опыт эксплуатации полноприводных автосамосвалов. В связи с этим остается актуальным вопрос обоснования оптимального уклона автодорог для указанных моделей автотранспортных средств. Нормативными документами, регламентирующими величины уклонов карьерных автодорог, являются СНиП 2.05.02-91. *Промышленный транспорт*, разработанный институтом «ПромтрансНИИпроект», а также *Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых* (СНиП 2.05.02-91. *Промышленный транспорт. Минстрой России. М.: ЦИТП Минстроя России, 1996. 128 с.; Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» / Утв. Приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599. Екатеринбург: ИД «Урал Юр Издат», 2015. 212 с.).*

В соответствии с требованиями СНиП 2.05.02-91 продольный уклон автодорог с твердым покрытием при движении по ним автосамосвалов с колесной формулой 6 × 6 составляет 15–17 %. На карьерных автодорогах III-й категории со сроком службы до одного года допускается увеличивать уклон на 3 %, т. е. до 18–20 %. В 2012 г. была утверждена актуализированная редакция СНиП 2.05.02-91,

согласно которой для автосамосвалов с колесной формулой 6 × 6 допускается увеличение продольного уклона автодорог в соответствии с данными предприятия изготовителя, типом и состоянием дорожного покрытия, а также техническим состоянием автомобиля. В случае необходимости, определяемой горнотехническими условиями эксплуатации, уклоны внутрикарьерных автодорог могут быть повышены при соответствующем технико-экономическом обосновании и обеспечении безопасного движения автосамосвалов [5], (СП 37.13330.2012. *Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91\* (с Изменениями № 1, 2, 3)*. Официальное издание. М.: Минрегион России, 2012. 248 с.). Исследованиями, выполненными ОАО «Белорусский автозавод», рекомендуется ограничивать уклон автодорог для полноприводных автосамосвалов в реальных карьерных условиях (регионы с выпадением осадков в виде дождя и мокрого снега) условиями сцепления шин с автодорогой ( $\varphi = 0,25-0,40$ ) на уровне 20–22 %. В то же время авторами отмечается, что применительно к карьерным условиям по проходимости и максимально допустимому уклону автодорог гусеничный движитель не имеет существенных преимуществ перед колесным [6, 7]. Институтом «Якутнипроалмаз» в 2012 г. проведены успешные опытно-промышленные испытания полноприводных автосамосвалов САТ-740В в условиях карьера «Удачный» на уклонах автодорог до 24 % [8]. Таким образом, теоретическое обоснование и однозначные рекомендации по величине уклонов карьерных автодорог для полноприводных автосамосвалов в настоящее время отсутствуют.

При переходе на вскрытие крутонаклонными автосъездами важное значение имеет расчет объема дополнительного разноса нерабочих бортов карьера от размещения автотранспортных коммуникаций, в значительной степени определяющего целесообразность и эффективность перехода. Обычно на практике строятся объемные модели карьеров в системах AutoCAD и MINEFRAME с различным уклоном вскрывающих выработок, рассчитываются объемы вскрыши в конечных контурах карьеров и производится сравнение этих объемов. Однако такой метод является весьма сложным и трудоемким для установления основных закономерностей влияния параметров крутонаклонных автосъездов на разнос бортов карьеров. В этом случае лучше использовать аналитические методы расчета. Анализ существующих аналитических методов показывает, что ни один из них не обеспечивает комплексного учета технологических параметров вскрытия и необходимой точности расчетов. Таким образом, разработка аналитического метода является также актуальной задачей.

**Методология проведенных исследований.** В УГГУ разработана методика обоснования оптимальных уклонов автодорог при эксплуатации автосамосвалов с колесной формулой 4 × 2 на нагорно-глубинных карьерах [9]. Методика базируется на физическом принципе наименьшего действия. Основные положения методики применимы и для полноприводных автосамосвалов. Принцип наименьшего действия относится к интегральным вариационным принципам механики, согласно которым из всех возможных движений механической системы истинным является то, для которого некоторая физическая величина, называемая **действием**, имеет за время перемещения системы экстремум, обычно **минимум**. Наиболее распространенной формой представления принципа является форма Гамильтона. В указанной форме принцип наименьшего действия утверждает, что из всех возможных траекторий перемещения истинной будет та, для которой действие, равное интегралу от разности между кинетической и потенциальной энергией, соответствующей этим траекториям, имеет минимальное значение. В последние годы принцип наименьшего действия широко применяется для решения прикладных задач механики и термодинамики, в частности для оптимизации параметров системы *жесткое колесо–деформируемый рельс*, моделировании качения

деформируемого колеса и др. [10]. С определенными допущениями этот принцип можно распространить на транспортные системы карьеров. В этом случае действие – это физическая величина, представляющая собой произведение количества энергии, расходуемой на перемещение горной массы транспортным средством, и времени его перемещения. Введенное авторами понятие *удельное действие* ( $D$ ) представляет собой произведение удельных затрат энергии на подъем горной массы транспортным средством на 1 м и времени подъема горной массы на 1 м.

Можно записать

$$D = PT,$$

где  $D$  – удельное действие,  $г \cdot с/т \cdot м$ ;  $P$  – величина удельных затрат энергии (дизельного топлива) автосамосвалом на подъем 1 т горной массы на 1 м,  $г/т \cdot м$ ;  $T$  – суммарное время движения автосамосвала по уклону в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме горной массы на 1 м, с.

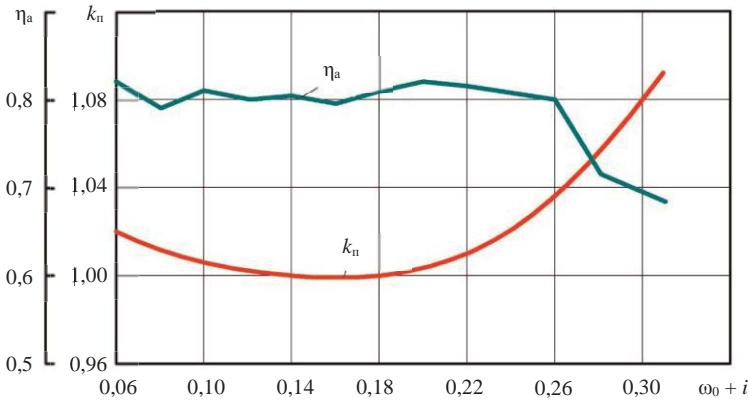


Рис. 1. Зависимости КПД трансмиссии автосамосвала CAT-745C  $\eta_a$  и поправочного коэффициента, учитывающего изменение удельного расхода топлива при номинальной нагрузке двигателя  $k_n$ , от суммарного сопротивления движению ( $\omega_0 + i$ )

Fig. 1. Dependences of the efficiency coefficient of the CAT-745C dump truck transmission  $\eta_a$  and the correction coefficient, which takes into account the change in the specific fuel consumption at the rated engine load  $k_n$ , on the total resistance to movement ( $\omega_0 + i$ )

Преимущества критерия *удельное действие* по сравнению с удельной энергоемкостью  $P$  и временем движения  $T$  (производительностью) заключается в его комплексности. Оптимальный уклон по критерию удельного действия должен соответствовать минимальным удельным энергозатратам на подъем горной массы на 1 м при максимальной производительности транспортных средств (минимальном времени движения по уклону в грузовом и порожняковом направлениях).

Тогда удельное действие  $D$ ,  $г \cdot с/т \cdot м$ , при работе автосамосвалов на подъем горной массы

$$D = \left[ \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n (k_t + 1) ((\omega_0 / i) + 1)}{\eta_a} + \frac{g_x}{1000 i G v_{pi}} \right] \times \left[ \frac{3,6 (G_a + k_t G) ((\omega_0 / i) + 1)}{0,367 N_d k_N \eta_a} + \frac{3,6}{i v_{pi}} \right], \quad (1)$$

где  $G$  – грузоподъемность автосамосвала, т;  $G_a$  – собственная масса автосамосвала;  $k_r$  – коэффициент использования грузоподъемности;  $k_T$  – коэффициент тары автосамосвала;  $\omega_0$  – коэффициент сопротивления качению;  $i$  – уклон участка трассы;  $\eta_a$  – коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала;  $g_n$  – удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя, г/кВт · ч;  $g_x$  – удельный расход топлива при движении порожних автосамосвалов в тормозном режиме, кг/ч;  $v_{ni}$  – скорость порожнего автосамосвала на спуске с уклоном  $i$ , км/ч;  $k_N$  – коэффициент использования мощности двигателя.

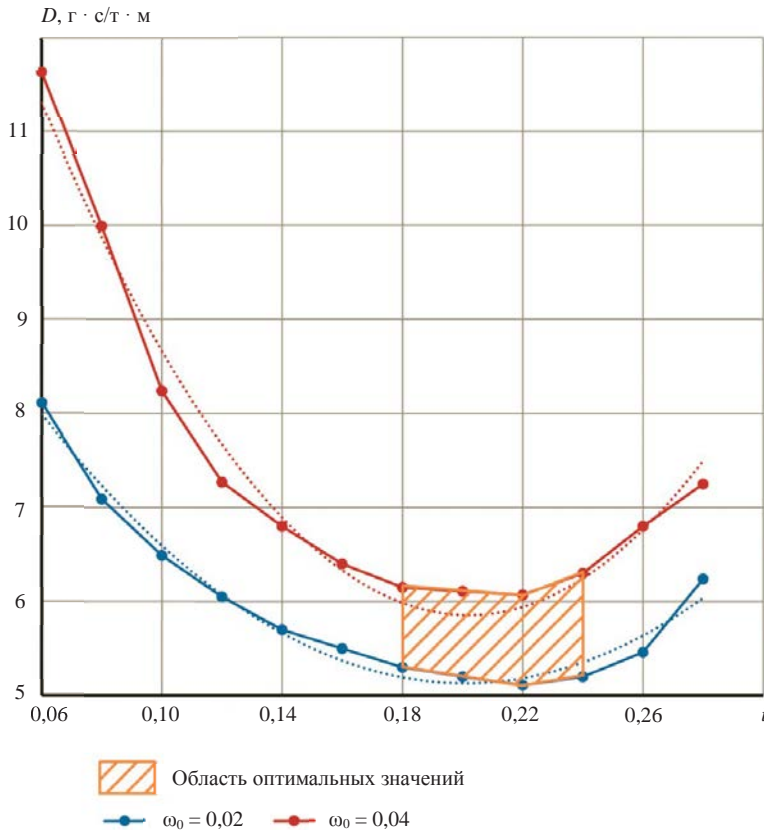


Рис. 2. Зависимость удельного действия  $D$  автосамосвалов CAT-745C от продольного уклона автодороги  $i$  и сопротивления качению  $\omega_0$   
 Fig. 2. Dependence of the specific action  $D$  of CAT-745C dump trucks on the longitudinal slope of the road  $i$  and rolling resistance  $\omega_0$

Пользуясь указанной методикой, проведем расчет удельного действия для полноприводных автосамосвалов CAT-745C, планируемых для использования при доработке кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА». Техническая характеристика автосамосвала:  $G = 41$  т;  $G_a = 32,87$  т;  $k_r = 0,80$ ;  $k_T = 1,0$ ; двигатель CAT C18 ACERT;  $N_d = 381$  кВт;  $g_n = 210$  г/кВт · ч. Скорости на уклонах автодорог со щебеночным покрытием определяются по тягово-динамической и тормозной характеристикам автосамосвала.

В этом случае формулу (1) можно представить в виде

$$D = \left[ \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n (k_T + 1) ((\omega_0 / i) + 1)}{\eta_a} \right] \times \left[ \frac{3,6}{i v_{Ti}} + \frac{3,6}{i v_{ni}} \right],$$

где  $v_{ri}$ ,  $v_{pi}$  – скорости при движении груженого автосамосвала на подъем и порожнего при движении на спуск соответственно, установленные по тягово-динамической и тормозной характеристикам при суммарном сопротивлении движению  $(\omega_0 + i)$ , км/ч.

Выражением  $g_x/1000iGv_{pi}$  можно пренебречь, так как его значение не превышает 2–3 % от общего расхода дизельного топлива при движении груженого и порожнего автосамосвалов и не влияет на точность расчетов. Коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала  $\eta_a$  при известных значениях скоростей при движении на подъем рассчитывается по выражению

$$\eta_a = \frac{v_{ri}(G_a + k_r G)(\omega_0 + i)}{0,367N_d},$$

где  $v_{ri}$  – скорость груженого автосамосвала на уклоне  $i$  при сопротивлении качению  $\omega_0$ , км/ч.

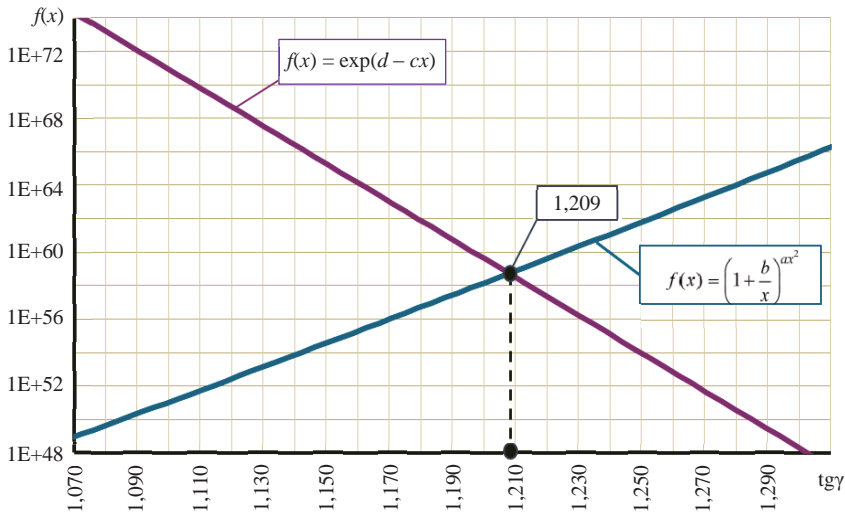


Рис. 3. Пример определения тангенса угла нерабочего борта карьера  $\text{tg}\gamma$   
Fig. 3. Example of determining the tangent of the non-working side of the quarry  $\text{tg}\gamma$

Расчеты произведены при изменении сопротивления качению от 0,02 до 0,04, характерном для щебеночного покрытия автодорог, и изменении продольного уклона автодорог от 0,04 до 0,28. Установлено, что значение  $\eta_a$  в диапазоне изменения суммарного сопротивления движению 0,06–0,26 характеризуется относительной стабильностью и варьируется в диапазоне 0,79–0,82. При увеличении  $(\omega_0 + i)$  с 0,26  $\eta_a$  снижается до 0,68–0,72.

Удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя  $g_n$  – паспортная величина, характеризующая фактический расход топлива для получения одного кВт · ч полезной энергии. Вместе с тем  $g_n$  также не является постоянной величиной, а зависит от степени использования мощности двигателя и числа оборотов, которые в свою очередь определяются суммарным сопротивлением движению  $(\omega_0 + i)$ . На рис. 1 представлена зависимость поправочного коэффициента  $k_{np}$ , учитывающего изменение  $g_n$  в зависимости от суммарного сопротивления движению, полученная на основании топливно-экономической характеристики

автосамосвала по методике И. С. Шлиппе [11]. При значительных нагрузках  $[(\omega_0 + i) > 0,22] g_n$  увеличивается до 10 % от номинального значения.

Оптимальное значение уклонов по критерию удельного действия будет соответствовать условию

$$D \rightarrow \min.$$

Установлено, что для автосамосвалов САТ-745С оптимальное значение уклонов автодорог со щебеночным покрытием в карьерных условиях по критерию удельного действия будет находиться в диапазоне 0,18–0,24 (рис. 2).

Анализ современных методов расчета дополнительного разноса бортов от размещения автотранспортных коммуникаций показывает, что наиболее приемлемым для горнотехнических условий кимберлитовых карьеров при вскрытии крутопадающих рудных тел округлой формы спиральными автосъездами является аналитический метод, разработанный в Криворожском горнорудном институте [12]. Дополнительный объем разноса бортов  $V$ , м<sup>3</sup>, при спиральной форме трассы определяется по формуле:

$$V = \frac{BH_k^2}{2i} K_d, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина транспортной бермы, м;  $H_k$  – глубина карьера, м;  $i$  – уклон спиральной трассы, доли ед.;  $K_d$  – коэффициент, учитывающий дополнительное увеличение объема горных работ, обусловленное необходимостью разноса бортов карьера для размещения системы спиральных съездов при вскрытии новых горизонтов, ед.,

$$K_d = \frac{\left[ (H_k + r_0 \operatorname{tg} \gamma)^2 + (H_k + r_0 \operatorname{tg} \gamma) B \operatorname{tg} \gamma \right] \ln \left( 1 + (H_k / r_0 \operatorname{tg} \gamma) \right) - (H_k^2 / 2) - H_k \operatorname{tg} \gamma (r_0 + B)}{H_k^2}, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус дна карьера, м;  $\gamma$  – среднее значение угла откоса нерабочих бортов карьера, град.

Основным недостатком рассматриваемого метода является то, что в формуле (1) используется уже известное значение угла откоса нерабочего борта  $\gamma$ . В то же время угол  $\gamma$  определяется конструкцией нерабочего борта и зависит от уклона спиральной трассы  $i$ , ширины транспортной бермы  $B$ , количества витков спиральной трассы  $n_B$ , высоты уступа  $h_y$  и других факторов. Угол откоса нерабочего борта является также контролируемым параметром и не должен превышать значения, установленного по условиям устойчивости. При этом учитываются следующие физико-механические свойства горных пород: плотность, угол внутреннего трения, сцепление в образце и коэффициент структурного ослабления в массиве. Среднее значение конструктивного угла нерабочего борта карьера определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_k}{\left( (H_k / h_y) - 1 \right) b_0 + n_B B + H_k \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (4)$$

где  $h_y$  – высота нерабочего уступа, м;  $b_0$  – ширина бермы безопасности, м;  $n_B$  – среднее количество витков спиральной трассы;  $\alpha$  – угол откоса нерабочего уступа, град.

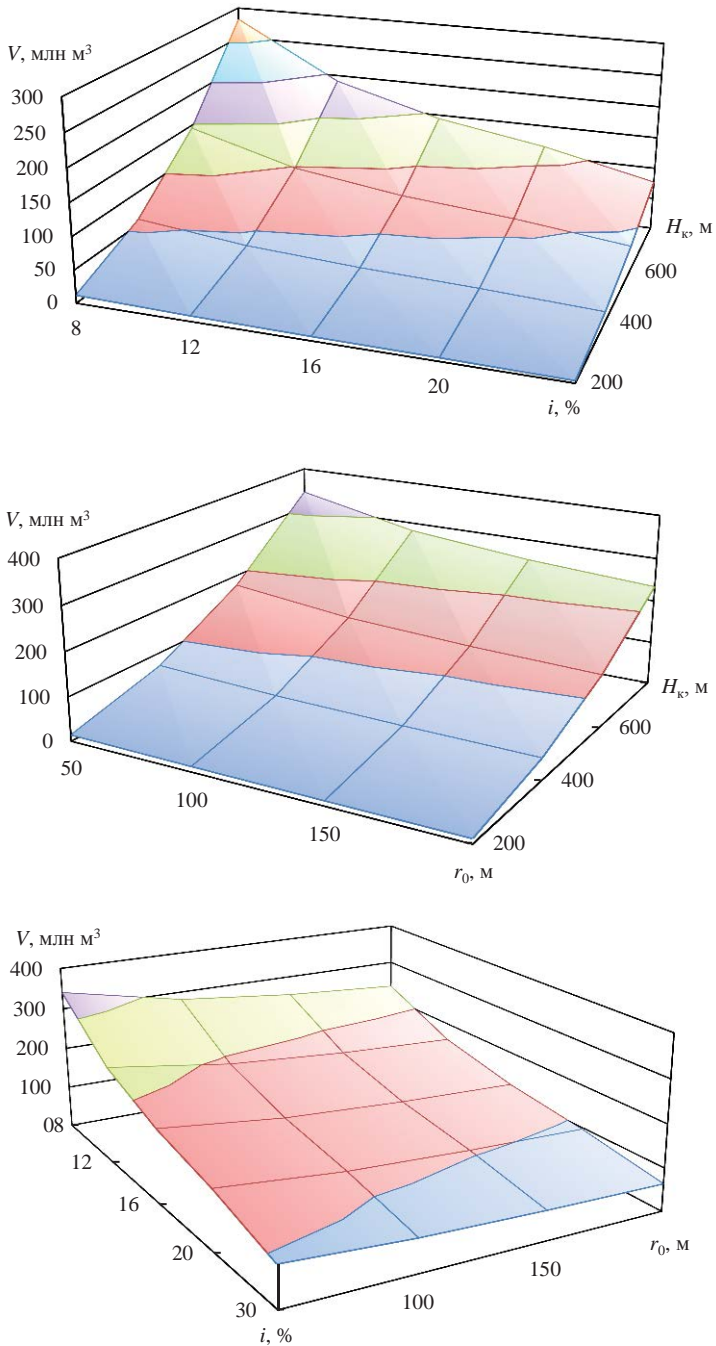


Рис. 4. Закономерности изменения объема дополнительного разноса бортов  $V$  от руководящего уклона спиральной трассы  $i$ , глубины карьера  $H_k$  и радиуса дна карьера  $r_0$  (автосамосвалы CAT-745C)

Fig. 4. Regularities of changes in the volume of additional spacing of the sides  $V$  from the leading slope of the spiral route  $i$ , the depth of the quarry  $H_k$  and the radius of the bottom of the quarry  $r_0$  (dump trucks CAT-745C)



В свою очередь, согласно [12]:

$$n_B \approx \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2\pi i} \ln \left( 1 + \frac{H_K}{r_0 \operatorname{tg} \gamma} \right). \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в формулу (4) и обозначив  $x = \operatorname{tg} \gamma$ ;  $a = B/2\pi i$ ;  $c = (H_K/h_y - 1)b_6 + H_K \operatorname{ctg} \alpha$ ;  $d = H_K$ , получим уравнение:

$$ax^2 \ln \left( 1 + \frac{b}{x} \right) + cx - d = 0.$$

После преобразования получим

$$\left( 1 + \frac{b}{x} \right)^{ax^2} = \exp(d - cx).$$

Данное уравнение решается графически путем нахождения точки пересечения графиков двух функций

$$\begin{cases} f(x) = \left( 1 + \frac{b}{x} \right)^{ax^2}, \\ f(x) = \exp(d - cx). \end{cases}$$

Таким образом, задавая исходные данные  $H_K$ ,  $h_y$ ,  $B$ ,  $i$ ,  $r_0$ ,  $\alpha$ , графически определяя  $\operatorname{tg} \gamma$ , находим значение  $K_d$  и объем дополнительного разноса бортов карьера  $V$  по формулам (2), (3). Пример определения тангенса угла нерабочего борта карьера  $\operatorname{tg} \gamma$  приведен на рис. 3. Исходные данные:  $H_K = 450$  м;  $h_y = 30$  м;  $b_6 = 10$  м;  $B_T = 30$  м;  $i = 0,08$ ;  $r_0 = 100$  м;  $\alpha = 75^\circ$ . Получаем  $\operatorname{tg} \gamma = 1,21$  или  $\gamma = 50,4^\circ$ .

**Результаты. Анализ и обсуждение.** Разработана методика обоснования оптимальных уклонов автодорог при эксплуатации полноприводных автосамосвалов в глубоких карьерах. Оптимальные уклоны по критерию удельного действия следует рассматривать как базовые значения, которые рекомендуется принимать при проектировании транспортных систем глубоких карьеров. Установленный диапазон оптимальных уклонов для автосамосвалов САТ-745С ( $i = 0,18-0,24$ ) не противоречит действующим нормативным документам, регламентирующим эксплуатацию полноприводных автосамосвалов. Вместе с тем предложенная методика позволяет дать четкое теоретическое (физическое) обоснование рациональных условий эксплуатации данных транспортных средств в глубоких карьерах. Окончательное решение по руководящим уклонам следует принимать на основе экономических критериев, учитывающих влияние уклона на технологические параметры горных работ, с учетом условий безопасной эксплуатации и результатов опытно-промышленных испытаний на конкретных предприятиях. Расчеты следует проводить для конкретных моделей полноприводных самосвалов на основе их тягово-динамических характеристик.

На основе разработанной методики установлены закономерности влияния основных горнотехнических факторов на объем дополнительного разноса бортов карьера от размещения автотранспортных коммуникаций (рис. 4). Расчеты проводились на примере гипотетического карьера с горнотехническими условиями,

максимально приближенными к условиям кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО). Диапазон изменения радиуса дна карьера (мощности рудного тела) был также принят по реальным параметрам кимберлитовых карьеров ( $r_0 = 50\text{--}400$  м). В результате расчетов установлено, что наибольшее влияние на дополнительный разнос бортов оказывает глубина карьера, уклон спиральных автосъездов и мощность рудного тела. Ввиду ограниченной грузоподъемности полноприводных автосамосвалов (до 40–45 т) ширина транспортных берм не оказывает существенного влияния на объем дополнительного разноса. При увеличении мощности рудного тела от 50 до 400 м влияние уклона снижается, что объясняется сокращением количества витков спиральной трассы. Так, при уклоне 8 % и глубине карьера 700 м при увеличении мощности рудного тела с 50 до 400 м объем дополнительного разноса бортов сокращается с 339,8 до 223,1 млн м<sup>3</sup> (на 106,7 млн м<sup>3</sup>), а при уклоне автосъездов 30 % объем сокращается на 20,6 млн м<sup>3</sup>, т. е. в 5 раз меньше. Таким образом, эффективность крутонаклонного вскрытия также снижается с увеличением мощности рудного тела, что подтверждается экономическими расчетами.

**Область применения результатов.** Полученные результаты рекомендуется использовать в практике проектирования и эксплуатации глубоких кимберлитовых карьеров при внедрении полноприводных автосамосвалов. Результаты могут найти применение на рудных карьерах при вскрытии глубоких горизонтов спиральными автосъездами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акишев А. Н., Костырин В. Ф. Оптимизация проектных решений по отработке карьера «Юбилейный» // Горный журнал. 2000. № 7. С. 33–35.
2. Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Чаадаев А. С., Махрачев А. Ф. Комплексные исследования и внедрение инновационных геотехнологий добычи и глубокой переработки кимберлитов // Горный журнал. 2011. № 1. С. 10–13.
3. Акишев А. Н., Лель Ю. И., Ильбульдин Д. Х., Мусихина О. В., Глебов И. А. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 4–12.
4. Акишев А. Н., Лель Ю. И., Боккий И. Б., Исаков С. В., Глебов И. А. Инновационная технология открытой разработки кимберлитовых месторождений с изменяемой геометрией нерабочих бортов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 8. С. 5–16.
5. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode // 2011 Int. Conf. on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 – Proceedings. 2011. P. 4404–4407.
6. Мариев П. Л., Егоров А. Н., Войтов В. Т. Особенности работы карьерных самосвалов в условиях глубоких карьеров и повышенных уклонов // Горный журнал. 2011. № 10. С. 63–66.
7. Brown D., Heather R. Development of off-highway articulated dump trucks // SAE Technical Paper, D. J. V. Engineering Ltd. 1979. 12 с.
8. Зырянов И. В., Цымбалова А. И. Испытания САТ-740 В на крутонаклонных съездах карьера «Удачный» АК «АЛРОСА» // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 9. С. 22–25.
9. Лель Ю. И., Горшков Э. В., Ермолаев А. И., Ворошилов Г. А., Неволин Д. Г., Довженко А. С. Обоснование оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 2. С. 5–12.
10. Веретенников В. Г., Синецких В. А. Метод переменного действия. М.: Физматлит, 2005. 272 с.
11. Артамонов М. Д., Иларионов В. А., Морин М. М. Теория автомобиля и автомобильного двигателя. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.
12. Вилкул Ю. Г., Слободянок В. К., Максимов И. И. Теоретические основы определения объемов горнокапитальных работ при вскрытии глубоких карьеров трассами спиральной формы // ГИАБ. 2007. № 7. С. 17–23.

Поступила в редакцию 3 августа 2020 года

#### Сведения об авторах:

**Лель Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: lel49@mail.ru

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

**Буднев Алексей Борисович** – аспирант кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: a.budnev96@yandex.ru

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

**Ганиев Руслан Салаватович** – старший преподаватель кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: sunmail2003@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32

## Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing

Iurii I. Lel<sup>1</sup>, Igor A. Glebov<sup>2</sup>, Aleksei B. Budnev<sup>1</sup>, Sergei V. Isakov<sup>1</sup>, Ruslan S. Ganiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

### Abstract

**Research aim** is to substantiate optimal road grade when operating 4WD dump trucks and to develop analytical method of calculating the volume of additional spacing of non-mining slopes of an opencast from motor transport lanes placement when exposing deep kimberlite pits with spiral routes.

**Research relevance.** Transition to steeply inclined ramps and 4WD dump trucks is a basic trend in improving the efficiency of deep kimberlite pits mining. In this regard, the issues of substantiating road grades and developing the method of calculating the volume of additional spacing of non-mining slopes of an opencast from motor transport lanes placement are becoming increasingly relevant.

**Research methodology.** When substantiating road grade for 4WD dump trucks the physical principle of minimal action was used as well as dump trucks tractive and dynamic, braking and fuel conditions together with some experimental data. A new notion of “specific action” has been introduced. Optimal grade by the criterion of specific action complies with minimum energy for mined rock lifting under maximum hauling capacity. The elaborated analytical method of calculating the volume of additional spacing of non-mining slopes of an opencast is characterized by the integrated record of basic process parameters of uncovering. Graphical method of finding the angle of the non-mining slope has been proposed being a controlled parameter at uncovering with steeply pitching ramps.

**Results.** It has been determined that optimal grade value by physical criterion of specific action are determined by the dependences between transmission efficiency, road speed and specific fuel consumption by 4WD dump trucks and the total traction resistance in slopes. For CAT-745C dump trucks optimal values slopes for macadamized roads within the range of 0.18–0.24. The patterns of basic mine engineering factors influence on the volume of additional spacing of slopes from motor transport lanes placement. Major effect on the volume of flattening is brought about by the depth of the pit, spiral ramps grade and ore body thickness. So, the introduction of steeply inclined uncovering is primarily recommended in kimberlite open pits when mining thin ore bodies.

**Scope of results.** The obtained results may be applied in deep kimberlite open pits design and operation when introducing 4WD dump trucks. The results may also be applied in ore open pits when uncovering deep horizons by spiral ramps.

**Key words:** open pit; pit depth; 4WD dump truck; ramp inclination; principle of minimal action; fuel consumption; additional spacing of a slope; angle of slope; ore body thickness.

### REFERENCES

1. Akishev A. N., Kostyrin V. F. Optimising solution on Iubileyni open pit development. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2000; 7: 33–35. (In Russ.)
2. Chanturiia V. A., Trubetskoi K. N., Kaplunov D. R., Chaadaev A. S., Makhrachev A. F. Integrated study and introduction of innovative geotechnologies of extraction and deep processing of kimberlites. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2011; 1: 10–13. (In Russ.)
3. Akishev A. N., Lel Iu. I., Ilbuldin D. Kh., Musikhina O. V., Glebov I. A. Technological solutions for the Alrosa group Nyurbinsky open pit deep horizons exposing and processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 4–12. (In Russ.)
4. Akishev A. N., Lel Iu. I., Bokii I. B., Isakov S. V., Glebov I. A. Kimberlite deposits opencast mining innovative technology with variable geometry of non-mining open pit edges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 8: 5–16. (In Russ.)
5. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode. *2011 Int. Conf. on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 – Proceedings*. 2011. p. 4404–4407.

6. Mariev P. L., Egorov A. N., Voitov V. T. Features of mine dump truck working in the conditions of deep quarry and higher slopes of pit roads. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2011; 10: 63–66. (In Russ.)

7. Brown D., Heather R. Development of off-highway articulated dump trucks. *SAE Technical Paper, D. J. B. Engineering Ltd*. 1979.

8. Zyrianov I. V., Tsybalova A. I. CAT-740 B trial at steeply inclined ramps of Udachny pit of ALROSA. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2013; 9: 22–25. (In Russ.)

9. Lel Iu. I., Gorshkov E. V., Ermolaev A. I., Voroshilov G. A., Nevolin D. G., Dovzhenok A. S. Justification of optimal highway slopes at working of mountain-deep opencast mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2012; 2: 5–12. (In Russ.)

10. Veretennikov V. G., Sinitsyn V. A. *The method of alternating action*. Moscow: Fizmatlit Publishing; 2005. (In Russ.)

11. Artamonov M. D., Ilarionov V. A., Morin M. M. *The theory of an automobile and auto engine*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1968. (In Russ.)

12. Vilkul Iu. G., Slobodianiuk V. K., Maksimov I. I. Theory of determining the amount of main development when uncovering deep open pits by spiral ramps. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2007; 7: 17–23. (In Russ.)

Received 3 August 2020

#### Information about 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** – junior researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: i.glebov@igduran.ru

**Aleksei B. Budnev** – PhD student, Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: a.budnev96@yandex.ru

**Sergei V. Isakov** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: hemul92@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., 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. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32

**For citation:** 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.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32