Энергетический метод оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта

Лель Ю. И.^{1*}, Глебов И. А.², Мусихина О. В.¹, Ганиев Р. С.¹, Хардик Н. В.³

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

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

³ Уральское управление Ростехнадзора, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: lel49@mail.ru

Реферат

Цель работы – разработка метода оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта.

Актуальность исследования. Увеличение глубины карьеров и внедрение современных моделей автосамосвалов, способных работать на уклонах до 18–24 %, сопровождается усложнением условий эксплуатации технологического автотранспорта. В связи с этим весьма актуальным становится вопрос разработки метода и показателей оценки трудности транспортирования горной массы, а также систематизации на этой основе условий эксплуатации автотранспорта.

Методика проведения исследований. В основу метода оценки трудности транспортирования положен расчет дизельного топлива за транспортный цикл и приведение фактической длины трассы к условному горизонтальному расстоянию с использованием горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы. Установлены экспериментально-аналитические зависимости для расчета горизонтальных эквивалентов. В качестве критерия оценки трудности транспортирования обосновано использование коэффициента сложности условий эксплуатации, показывающего во сколько раз энергозатраты при движении автосамосвалов по реальной трассе превышают энергозатраты при движении по горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием такой же протяженности.

Результаты. В результате проведенных исследований разработан метод оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта. Установлено, что максимальные значения коэффициентов сложности условий для автосамосвалов с колесной формулой 4 × 2 составляют 2,6–3,0, для полноприводных автосамосвалов – 5,0–6,5. По коэффициенту сложности все условия эксплуатации разделены на пять классов (относительно легкие, средние, сложные, весьма сложные, исключительно сложные). Установлено, что условия эксплуатации на большинстве алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» относятся к III–IV классам (сложные и весьма сложные). Внедрение полноприводных автосамосвалов будет сопровождаться переходом условий эксплуатации к V классу (исключительно сложные). Для большинства рудных карьеров Уральского региона характерны условия II–III классов (средние и сложные).

Область применения результатов. Полученные результаты рекомендуется использовать в практике проектирования и эксплуатации карьерного автотранспорта при оценке и систематизации условий эксплуатации, в технологических расчетах при нормировании и планировании расхода дизельного топлива и производительности автосамосвалов, при корректировке нормативов технического обслуживания и т. п.

Ключевые слова: карьер; автотранспорт; условия эксплуатации; приведенное расстояние; горизонтальный эквивалент; коэффициент сложности условий эксплуатации; удельный расход топлива; коэффициент сопротивления качению; уклон автодорог; полноприводные автосамосвалы.

Введение. Увеличение глубины работ и внедрение на карьерах современных автотранспортных средств, в том числе полноприводных автосамосвалов с шарнирно-сочлененной рамой, сопровождается усложнением условий эксплуатации

технологического автотранспорта. При этом важное значение приобретает разработка методики и показателей оценки трудности транспортирования горной массы, а также систематизация на этой основе условий эксплуатации карьерного автотранспорта. Наибольшую известность в этом направлении получил предложенный академиком В. В. Ржевским относительный показатель трудности транспортирования породы P_t [1]. Все транспортируемые горные породы по величине P_t подразделяются на пять классов. Вместе с тем, в отличие от предложенных В. В. Ржевским и получивших признание относительных показателей трудности бурения, дробления взрывом и экскавации горных пород, показатель трудности транспортирования характеризуется сложностью расчета, не учитывает специфики условий эксплуатации карьерного автотранспорта, не имеет ясной энергетической основы и не нашел должного практического применения. Существенным недостатком показателя P_t является то, что входящая в него продолжительность транспортирования T не является независимой переменной, а также определяется комплексом горнотехнических и дорожных условий эксплуатации.

В качестве показателей оценки сложности условий эксплуатации карьерного автотранспорта разными авторами предлагались: расстояние транспортирования, высота подъема горной массы, руководящий и средневзвешенный уклоны трассы, качество дорожного покрытия, сложность трассы в плане и другие факторы в различном их сочетании [2–7]. Однако до настоящего времени единого комплексного показателя трудности транспортирования (сложности условий эксплуатации карьерного автотранспорта), который мог бы использоваться в технологических расчетах, не предложено. Таким образом, разработка метода оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта является актуальной задачей.

Методология проведения исследований. В основу разработанного метода авторами положен энергетический принцип, поскольку расход энергии (дизельного топлива) наиболее адекватно реагирует на изменение условий эксплуатации технологического автотранспорта в карьерах.

Расход дизельного топлива автосамосвалом за цикл ($Q_{ц}$, л) определяется по формуле

$$Q_{ц} = Q_{const} + Q_{пер},$$

где Q_{const} – относительно постоянная часть расхода топлива в цикле, л; $Q_{пер}$ – переменная часть расхода, зависящая от расстояния транспортирования, высоты подъема (спуска) горной массы и других горнотехнических и дорожно-транспортных условий эксплуатации, л;

$$Q_{const} = Q_{п} + Q_{о} + Q_{р} + Q_{мп} + Q_{мр},$$

где $Q_{п}$, $Q_{о}$, $Q_{р}$, $Q_{мп}$, $Q_{мр}$ – расход топлива при погрузке автосамосвала, ожидании погрузки, разгрузке, маневровых операциях при установке на погрузку и разгрузку соответственно, л;

$$Q_{п} + Q_{о} = g_x (t_{п} + t_{о}) / 60,$$

где g_x – удельный расход топлива на холостом ходу двигателя (полный холостой ход), л/ч (определяется экспериментально); $t_{п} + t_{о}$ – суммарная продолжительность погрузки автосамосвала и ожидания погрузки, мин.

Расход топлива при разгрузке и производстве маневровых операций определяется из выражения

$$Q_i = g_i t_i / 60,$$

где Q_i – расход топлива на i -м режиме, л; g_i – удельный расход топлива на i -м режиме, л/ч; t_i – длительность i -го режима, мин;

$$g_i \approx g_n N_d k_{Ni} k_n / 1000 \rho,$$

где g_n – удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя, г/кВт · ч; N_d – номинальная мощность двигателя автосамосвала, кВт; k_{Ni} – коэффициент использования мощности двигателей на i -м режиме (табл. 1); k_n – поправочный коэффициент, учитывающий изменения g_n в зависимости от использования мощности двигателя, $k_n = 1,1-1,2$; ρ – плотность дизельного топлива, кг/л.

Таблица 1. Значения коэффициентов использования мощности двигателя (k_{Ni}) на различных режимах (экспериментальные данные) [8]

Table 1. Motor capacity utilization coefficient value (k_{Ni}) in different modes (observation data) [8]

Характеристика режима.....	k_{Ni}
Маневры при установке:	
на погрузку.....	0,10–0,12
на разгрузку.....	0,38–0,40
Разгрузка.....	0,06–0,08

Переменная часть расхода топлива ($Q_{\text{пер}}$, л) при движении автосамосвала по горизонтальной щебеночной автодороге с коэффициентом сопротивления качению ω_0 определяется из выражения

$$Q_{\text{пер}} = Q_d^r + Q_d^n = \frac{G g_n L \omega_0 [k_t (1 + k_1 k_2) + k_r]}{367 \eta_t \rho}, \quad (1)$$

где Q_d^r – расход топлива при движении груженых самосвалов, л; Q_d^n – расход топлива при движении порожних самосвалов, л; G – грузоподъемность автосамосвала, т; k_r – коэффициент использования грузоподъемности; η_t – коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала; ω_0 – коэффициент сопротивления качению груженых автосамосвалов на автодороге со щебеночным покрытием [8]; k_1 – коэффициент, учитывающий увеличение ω_0 при движении порожних автосамосвалов, $k_1 \approx 1,15-1,20$ [8]; k_2 – коэффициент, учитывающий увеличение удельного расхода дизельного топлива при номинальной нагрузке g_n при движении порожних автосамосвалов, $k_2 \approx 1,1$ [8]; k_t – коэффициент тары самосвала; L – расстояние транспортирования (длина горизонтальной трассы), км.

Формулу (1) можно применить для расчета расхода топлива по реальной трассе, если фактическую длину трассы привести к длине горизонтальной автодороги со щебеночным покрытием.

Общую длину реальной трассы движения (L_ϕ , км) можно представить в виде суммы отдельных участков:

$$L_\phi = L_r + L_i + L_b + L_{\text{кр}},$$

где L_r – суммарная протяженность горизонтальных участков трассы со щебеночным покрытием, км; L_i – суммарная протяженность наклонных участков трассы со щебеночным покрытием, км; L_b – суммарная протяженность горизонтальных участков временных забойных автодорог без покрытия, км; $L_{кр}$ – суммарная протяженность криволинейных участков автодорог со щебеночным покрытием, км.

Рис. 1. Схема к расчету приведенного расстояния транспортирования:

a – подъем горной массы; *б* – спуск горной массы

Fig. 1. Scheme for the reduced transportation distance calculation:

a – rock mass ascent; *б* – rock mass descent

В свою очередь

$$L_i = L_n + L_c = H_n / i_n \cdot 10^{-3} + H_c / i_c \cdot 10^{-3},$$

где L_r – суммарная протяженность наклонных участков с уклоном i_n при движении на подъем, км; L_c – суммарная протяженность наклонных участков с уклоном i_c при движении на спуск, км; H_n , H_c – высота подъема (глубина спуска) горной массы, м; i_n – уклон трассы при движении на подъем, доли ед.; i_c – уклон трассы при движении на спуск, доли ед.

Приведенное расстояние транспортирования ($L_{пр}$, км) рассчитывается по формуле (рис. 1) [9, 10]:

$$L_{пр} = L_r + H_n \cdot \Theta_n \cdot 10^{-3} + H_c \cdot \Theta_c \cdot 10^{-3} + k_{пр} L_b + k_{кр}^x L_{кр}, \quad (2)$$

где Θ_n , Θ_c – горизонтальные эквиваленты вертикального перемещения (подъема, спуска) горной массы, показывающие, какое расстояние транспортирования по горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием эквивалентно по затратам энергии подъему (спуску) горной массы по наклонному участку на высоту

(глубину) 1 м, м/м. Экспериментально-аналитические зависимости для расчета горизонтальных эквивалентов, полученные на основании исследований УГГУ, представлены в табл. 2 [9], где k_3 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении порожних автосамосвалов на спуск в тормозном режиме, $k_3 \approx 1,05–1,07$; k_4 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении груженых автосамосвалов на спуск в тормозном режиме, $k_4 \approx 1,2–1,3$; $i_n (i_c) > \omega_o$.

Таблица 2. Зависимости для расчета горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы

Table 2. Dependences for the calculation of horizontal equivalents of rock mass vertical displacement

Горизонтальные эквиваленты вертикального перемещения, м/м	
Подъем горной массы	Спуск горной массы
$\Theta_n = \frac{k_3(k_r + k_r)(\omega_o + i_n)}{i_n \omega_o [k_r(1 + k_1 k_2) + k_r]}$	$\Theta_n = \frac{k_1 k_2 k_4 k_r (\omega_o + i_c)}{i_c \omega_o [k_r(1 + k_1 k_2) + k_r]}$

При расчете приведенного расстояния транспортирования возникает необходимость приведения участков автодорог к одному типу покрытия – базовому, а также приведения криволинейных участков трассы к горизонтальному расстоянию. В качестве базового рекомендуется принимать наиболее распространенное в карьерах щебеночное покрытие с коэффициентом сопротивления качению $\omega_o = 0,020–0,025$ [8]. В формуле (2) $k_{пр}$ – коэффициент приведения покрытия временных автодорог к базовому (щебеночному) покрытию, а $k_{пр}^k$ – коэффициент приведения криволинейных участков трассы к горизонтальному расстоянию,

$$k_{пр} = \omega_o^B / \omega_o,$$

где ω_o^B – коэффициент сопротивления качению на временных забойных и отвальных автодорогах;

$$k_{пр}^k = \frac{\omega_o + \omega_k}{\omega_o},$$

где ω_k – коэффициент дополнительного сопротивления на криволинейном участке трассы;

$$\omega_k \approx 0,02 \left(\frac{200 - R}{200} \right),$$

где R – радиус кривой, м.

При спиральной форме трассы, характерной для кимберлитовых карьеров, дополнительные сопротивления движению на кривых незначительны и в расчетах могут не учитываться.

Основную трудность в расчете приведенного расстояния транспортирования представляет установление коэффициентов сопротивления качению на карьерных автодорогах. Поскольку удельное сопротивление качению стохастически изменяется в динамике движения автосамосвала по реальной трассе, расчетным путем можно получить лишь усредненное его значение. Основным экспериментальным методом оценки коэффициента сопротивления качению является метод свободного выбега (движение автосамосвалов накатом до полной остановки). Однако его применение в производственных условиях ограничено недостаточной

протяженностью горизонтальных участков автодорог в рабочей зоне карьеров. С внедрением на автотранспорте приборов контроля расхода топлива FMS, а также электронных систем управления ДВС получает распространение оценка коэффициента сопротивления качению по расходу дизельного топлива. Такой метод был использован авторами для установления коэффициентов сопротивления качению в условиях карьеров ОАО «Ураласбест» и АК «АЛРОСА» [11].

Значения горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы и коэффициентов приведения покрытий временных автодорог для автосамосвалов CAT-777D и CAT-785B с колесной формулой 4 × 2 и полноприводных автосамосвалов CAT-745C в горнотехнических условиях кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения горизонтальных эквивалентов и коэффициентов приведения покрытий временных автодорог

Table 3. Values of horizontal equivalents and reduction coefficients for modern roads toppings

Модель и грузоподъемность самосвала	Значения горизонтальных эквивалентов ($k_r = 0,9$; $\omega_o = 0,0225$)								$k_{пр}$
	Δ_n , м/м при i_n				Δ_c , м/м при i_c				
	0,08	0,12	0,18	0,24	0,08	0,12	0,18	0,24	
CAT-777D ($G = 91$ т)	38,54	—	—	—	27,20	—	—	—	1,78
CAT-785B ($G = 136$ т)	38,35	—	—	—	27,42	—	—	—	1,78
CAT-745C ($G = 41$ т)	37,57	34,82	32,99	32,08	28,39	26,32	24,93	24,24	1,78

Умножив расход дизельного топлива за транспортный цикл ($Q_{ц}$, л) на величину $1000\rho/k_r GL_\phi$, где L_ϕ – фактическое расстояние транспортирования в км, и обозначив $L = L_{пр}$, где $L_{пр}$ – приведенное расстояние в км, получим удельный расход дизельного топлива для конкретной модели автосамосвала N_a , г/т · км:

$$N_a = \frac{1000\rho Q_{const}}{k_r GL_\phi} + \frac{2,725g_n\omega_o L_{пр} [k_r(1+k_1k_2) + k_r]}{L_\phi \eta_r k_r}. \quad (3)$$

$$\text{Обозначив } A = \frac{1000\rho Q_{const}}{k_r G}, \quad B = \frac{2,725g_n\omega_o [k_r(1+k_1k_2) + k_r]}{\eta_r k_r}, \quad \mu = L_{пр} / L_\phi -$$

коэффициент сложности условий эксплуатации, получим

$$N_a = A / L_\phi + B\mu. \quad (4)$$

В горнотехнических условиях Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» для автосамосвалов CAT-777D при $Q_{const} = 2,86$ л; $g_n = 225$ г/кВт · ч; $k_r = 0,71$; $k_r = 0,9$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,1$; $\omega_o = 0,0225$; $G = 91$ т; $\eta_r = 0,85$; $\rho = 0,836$ кг/л удельный расход топлива составит:

$$N_a = 29,19 / L_\phi + 45,80\mu. \quad (5)$$

Для полноприводных автосамосвалов CAT-745C, применение которых предполагается при разработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера, при

$Q_{\text{const}} = 1,34$ л; $g_{\text{н}} = 210$ г/кВт · ч; $k_{\text{т}} = 0,80$; $k_{\text{г}} = 0,9$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,1$; $\omega_0 = 0,0225$; $G = 41$ т; $\eta_{\text{т}} = 0,85$; $\rho = 0,836$ кг/л удельный расход топлива составит:

$$N_{\text{а}} = 30,36 / L_{\text{ф}} + 46,48 \mu. \quad (6)$$

Для автосамосвалов САТ-785В, эксплуатирующихся на Удачнинском ГОКе АК «АЛРОСА», при $Q_{\text{const}} = 4,42$ л; $g_{\text{н}} = 209$ г/кВт · ч; $k_{\text{т}} = 0,72$; $k_{\text{г}} = 0,9$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,1$; $\omega_0 = 0,0225$; $G = 136$ т; $\eta_{\text{т}} = 0,90$; $\rho = 0,836$ кг/л удельный расход топлива составит:

$$N_{\text{а}} = 31,85 / L_{\text{ф}} + 40,81 \mu.$$

В качестве примера приведем расчет удельного расхода топлива автосамосвалами САТ-785В в условиях карьера «Удачный». Исходные данные: $L_{\text{ф}} = 5,5$ км; $H_{\text{п}} = 180$ м; $i_{\text{п}} = 0,08$; $L_{\text{в}} = 0,1$ км; $\omega_0 = 0,0225$.

Определяем: $L_{\text{п}} = H_{\text{п}} / i_{\text{п}} \cdot 10^{-3} = 180 / 0,08 \cdot 10^{-3} = 2,25$ км; $L_{\text{г}} = L_{\text{ф}} - L_{\text{п}} - L_{\text{в}} = 5,5 - 2,25 - 0,1 = 3,15$ км.

Приведенное расстояние $L_{\text{пр}} = L_{\text{г}} + H_{\text{п}} \omega_{\text{п}} \cdot 10^{-3} + k_{\text{пр}} L_{\text{в}} = 3,15 + 180 \cdot 38,35 \cdot 10^{-3} + 1,78 \cdot 0,1 = 10,23$ км

Коэффициент сложности условий эксплуатации $\mu = L_{\text{пр}} / L_{\text{ф}} = 10,23 / 5,5 = 1,86$.

Удельный расход топлива $N_{\text{а}} = 31,85 / L_{\text{ф}} + 40,81 \mu = 31,85 / 5,5 + 40,81 \cdot 1,86 = 81,7$ г/т · км.

Фактический расход топлива составил 80 г/т · км. Ошибка $\varepsilon = 2,1$ %.

Таким образом, удельный расход топлива при прочих равных условиях для конкретной модели автосамосвала представляет собой функцию двух переменных – фактического расстояния транспортирования ($L_{\text{ф}}$) и отношения приведенного расстояния к фактическому, т. е. коэффициента сложности условий эксплуатации. Левая часть уравнений (3)–(6) отражает постоянную составляющую удельного расхода топлива, доля которой уменьшается с увеличением расстояния транспортирования. Правая часть указанных уравнений отражает переменную часть расхода, которая линейно зависит от сложности условий эксплуатации.

Коэффициенты A и B определяются топливной экономичностью $g_{\text{н}}$, конструктивными и технологическими параметрами автосамосвалов G , $\eta_{\text{т}}$, использованием грузоподъемности $k_{\text{т}}$, а также продолжительностью погрузочно-разгрузочных и маневровых операций в транспортном цикле. Для конкретных моделей автосамосвалов в определенных горнотехнических условиях указанные коэффициенты характеризуются относительной стабильностью.

Коэффициент сложности условий эксплуатации μ показывает, во сколько раз энергозатраты при движении автосамосвала по реальной трассе протяженностью $L_{\text{ф}}$ превышают энергозатраты при движении по горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием такой же протяженности.

В простейшем случае, когда трасса представлена участком подъема или спуска и коэффициент сопротивления качению ω_i на участке отличается от стандартных значений на автодороге со щебеночным покрытием ω_0 , коэффициент сложности условий эксплуатации определится из следующих выражений: при работе на подъем горной массы

$$\mu = \frac{k_3 (k_{\text{т}} + k_{\text{г}}) (\omega_i + i_{\text{п}})}{\omega_0 [k_{\text{т}} (1 + k_1 k_2) + k_{\text{г}}]},$$

при работе на спуск

$$\mu = \frac{k_1 k_2 k_4 k_r (\omega_i + i_c)}{\omega_o [k_r (1 + k_1 k_2) + k_r]}.$$

Таким образом, коэффициент сложности условий эксплуатации определяется уклоном, сопротивлением качению, зависит от коэффициента тары и коэффициента использования грузоподъемности, а также от эмпирических коэффициентов, учитывающих увеличение сопротивления качению при движении порожних автосамосвалов, увеличение удельного расхода топлива при номинальной нагрузке двигателя при движении порожних автосамосвалов по горизонтальной дороге, расход топлива при движении автосамосвалов в тормозных режимах.

Основное влияние на коэффициент сложности условий эксплуатации оказывают уклон автодорог и качество дорожного покрытия (сопротивление качению).

Установленный показатель является комплексным, объективно отражает изменение горнотехнических и дорожно-транспортных условий работы карьерного автотранспорта, имеет численное выражение и может использоваться в технологических расчетах, в частности расхода дизельного топлива. Этот показатель взят в качестве основы для оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта.

Результаты. Анализ и обсуждение. Установлено, что увеличение сложности условий эксплуатации автотранспорта с ростом глубины разработки является объективной закономерностью развития карьеров. Зависимости коэффициентов сложности условий эксплуатации от глубины карьеров носят нелинейный характер (рис. 2). Темп увеличения коэффициентов сложности варьируется от 0,2–0,3 до 0,5–0,7 на каждые 100 м увеличения глубины и зависит от интенсивности углубки и параметров рабочей зоны карьеров [12].

Максимальное значение коэффициента сложности для глубоких карьеров можно определить по формуле:

$$\mu_{\max} = \Xi_n i_n^{\max} / k_{p.t},$$

где Ξ_n – горизонтальный эквивалент вертикального перемещения горной массы при максимальном значении уклона автодороги, м/м; $i_n^{\max}$ – максимальный уклон автодороги, доли ед.; $k_{p.t}$ – коэффициент развития трассы.

Максимальные значения коэффициентов сложности для автосамосвалов с колесной формулой 4 × 2, работающих на руководящих уклонах $i_p \leq 10$ –12 %, могут составлять 2,6–3,0. При внедрении полноприводных автосамосвалов, эксплуатирующихся на руководящих уклонах до 18–24 %, коэффициент сложности увеличивается до 5,0–6,5.

По коэффициенту сложности все условия эксплуатации можно разделить на пять классов (табл. 4). В настоящее время условия эксплуатации автотранспорта на карьерах АК «АЛРОСА» относятся к III–IV классам (сложные и весьма сложные). Для большинства карьеров Уральского региона характерны условия эксплуатации II–III классов (средние и сложные). К IV классу (весьма сложные) можно отнести условия эксплуатации на двух карьерах, находящихся в стадии доработки: Карагайский карьер комбината «Магнезит» и карьер «Малый Куйбас» Магнитогорского металлургического комбината. Внедрение полноприводных автосамосвалов при доработке алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» будет сопровождаться переходом условий к V классу (исключительно сложные) и по-

требует дополнительных исследований по обеспечению безопасности и эффективности эксплуатации автотранспорта.

Выводы. В результате проведенных исследований разработан метод оценки трудности транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами, основанный на расчете расхода дизельного топлива за транспортный цикл и приведении фактической длины трассы к условному горизонтальному расстоянию

Рис. 2. Зависимость коэффициентов сложности условий эксплуатации автотранспорта μ от глубины карьеров АК «АЛРОСА» H_k :

a – карьер «Нюрбинский»; b – карьер «Юбилейный»; v – карьер «Удачный»

Fig. 2. Dependence between the automobile transport operating conditions difficulty coefficients μ and ALROSA PJSC open pits depth H_p :

a – Nuyrbinsky open-pit; b – Yubileyny open-pit; v – Udachny open-pit

транспортирования с использованием энергетического критерия. В качестве критерия оценки трудности транспортирования обосновано использование коэффициента сложности условий эксплуатации, показывающего во сколько раз энергозатраты при движении автосамосвалов по реальной трассе превышают энергозатраты при движении по горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием такой же протяженности. Получены расчетные формулы для определения приведенного расстояния транспортирования на основе горизонтальных эк-

вивалентов вертикального перемещения горной массы. Проведена систематизация условий эксплуатации карьерного транспорта по критерию сложности. Все условия разделены на пять классов (относительно легкие, средние, сложные, весьма сложные и исключительно сложные). Установлено, что в настоящее время условия эксплуатации автотранспорта на большинстве алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» относятся к III–IV классам (сложные и весьма сложные, $\mu = 2,4\text{--}2,8$). Внедрение полноприводных автосамосвалов, работающих на руководящих уклонах до 18–24 %, будет сопровождаться переходом условий эксплуатации к V классу (исключительно сложные, $\mu = 5,0\text{--}6,5$).

Таблица 4. Систематизация условий эксплуатации карьерного автотранспорта
Table 4. Systematization of open pit automobile transport operating conditions

Класс условий эксплуатации	Коэффициент сложности условий эксплуатации $\mu = L_{\text{сп}}/L_{\text{ф}}$	Характеристика условий эксплуатации	Примечания
I	1,00–1,50	Относительно легкие	Карьеры поверхностного типа глубиной до 40–50 м; $i_p \leq 6\text{--}8\%$; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования – до 40 %. Преимущественное использование автосамосвалов с колесной формулой 4×2 , на грунтах со слабой несущей способностью возможно применение полноприводных автосамосвалов
II	1,51–2,00	Средние	Карьеры глубиной до 100–150 м; $i_p \leq 8\%$; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования – до 60 %. Использование автосамосвалов с колесной формулой 4×2
III	2,01–2,50	Сложные	Карьеры глубиной до 300–350 м; $i_p = 8\text{--}12\%$; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования – до 70 %. Нагорные и нагорно-глубинные карьеры при работе автосамосвалов на спуск горной массы. Использование автосамосвалов с колесной формулой 4×2
IV	2,51–3,00	Весьма сложные	Карьеры глубиной до 600 м; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования – до 80 %. Совместное использование автосамосвалов с колесной формулой 4×2 в верхней и средней зонах карьера ($i_p = 10\text{--}12\%$) и полноприводных автосамосвалов в нижней зоне ($i_p = 18\text{--}24\%$)
V	Более 3,00	Исключительно сложные	Карьеры глубиной более 600 м; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования – более 80 %. Преимущественное использование полноприводных автосамосвалов ($i_p = 18\text{--}24\%$)

Область применения результатов. Результаты апробированы в условиях рудных карьеров Урала и кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА», рекомендуются к использованию в практике проектирования и эксплуатации карьерного автотранспорта для оценки условий эксплуатации, нормирования и планирования эксплуатационных показателей автосамосвалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржевский В. В. Открытые горные работы: производственные процессы. М.: Книжный дом «ЛИБКОМ», 2013. 512 с.
2. Яковлев В. Л., Тарасов П. И., Журавлев А. Г. Новые специализированные виды транспорта для горных работ. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 375 с.
3. Кармаев Г. Д., Глебов А. В. Выбор горнотранспортного оборудования циклично-поточной технологии карьеров. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. 296 с.

4. Яковлев В. Л., Тарасов П. И., Фурин В. О., Зырянов И. В. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 268 с.
5. Atkinson T., Walton G. Design and layout of haul roads for surface mines // Surface Mining and Quarrying. Pap. 2nd Int. Symp. Bristol, 4–6 Oct. 1983.
6. Williamson Owen S. Haul road design for off-highway mining equipment // World Mining Equip. 1987. Vol. 12. No. 3. P. 24–26.
7. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode // 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 – Proceedings. 2011. P. 4404–4407.
8. Смирнов В. П., Лель Ю. И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 355 с.
9. Лель Ю. И., Салахияев Р. Г., Арефьев С. А., Сандригайло И. Н. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 107–116.
10. Галкин В. А., Караулов Г. А., Сидоренко В. Н. Горизонтальный эквивалент вертикального перемещения горной массы карьерными автосамосвалами // Известия вузов. Горный журнал. 1983. № 7. С. 14–18.
11. Лель Ю. И., Арефьев С. А., Глебов А. В., Ильбульдин Д. Х. К вопросу оценки качества карьерных автодорог // Известия УГГУ. 2016. Вып. 3(43). С. 70–73.
12. Формирование рабочей зоны глубоких кимберлитовых карьеров / А. Н. Акишев [и др.]. Новосибирск: Наука, 2015. 204 с.

Поступила в редакцию 8 октября 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

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

Хардик Николай Владимирович – главный государственный инспектор Межрегионального отдела горного надзора Уральского управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). E-mail: nickhardik@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-14-25

Energy method of assessing and systematizing open pit automobile transport operating conditions

Iurii I. Lel¹, Igor A. Glebov², Olga V. Musikhina¹, Ruslan S. Ganiev¹, Nikolai V. Khardik³

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

³ Ural Department of the Federal Environmental, Industrial, and Nuclear Supervision Service of Russia, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim is to develop the method of assessing and systematizing open pit automobile transport operating conditions.

Research relevance. Pit depth growth and the introduction of modern models of dump trucks capable of working on 18–24% slopes complicate the conditions of industrial vehicles operation. In this regard, the development of the method and indicators of rock mass transportation difficulty becomes relevant as well as the systematization of vehicles operation conditions.

Research methodology. The method of evaluating the difficulty of transportation is based on calculating diesel consumption per one haul cycle and reducing the actual length of the route to the relative horizontal distance with the use of rock mass vertical haul horizontal equivalents. Experimental and analytical dependences for horizontal equivalents have been determined. As a criterion of transportation difficulty evaluation, the use of operation conditions difficulty coefficient has been substantiated showing how many times truck's power consumption when moving along the real route is higher than power consumption when moving along the horizontal macadamized route of the same length.

Results. As a result of the research, the method of assessing and systematizing the operation conditions of open pit automobile transport. It has been determined that maximum values for conditions difficulty

coefficients for the trucks with 4×2 wheel configuration are 2.6–3.0, and for all-wheel drive trucks – 5.0–6.5. By the difficulty coefficient, all operating conditions are divided into 5 classes (relatively easy, medium, difficult, very difficult, and extremely difficult). It has been determined that operating conditions in the most of diamond-mining open pits of ALROSA PJSC refer to class 3 and 4 (difficult and very difficult). The introduction of the all-wheel drive trucks will go along with the transition of operating conditions to class 5 (extremely difficult). For most of Ural pits classes 2 and 3 are typical (medium and difficult).

Scope of results. Research results are to be used in open pit automobile transport design and operation when assessing and systematizing operating conditions, in technological calculations when regulating and planning diesel consumption and dump trucks capacity, and when correcting the regulatory standards of maintenance support, etc.

Key words: open pit; automobile transport; operating conditions; reduced distance; horizontal equivalent; operating conditions difficulty coefficient; specific fuel consumption; coefficient of rolling resistance; road grade; all-wheel drive dump trucks.

REFERENCES

1. Rzhhevskii V. V. *Open-pit mining: industrial processes*. Moscow: Knizhnyi dom «LIBKOM» Publishing; 2013. (In Russ.)
2. Iakovlev V. L., Tarasov P. I., Zhuravlev A. G. *New specialized types of transport for mining*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2011. (In Russ.)
3. Karmaev G. D., Glebov A. V. *Selecting mining equipment for cyclic-continuous technology of pit mining*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2012. (In Russ.)
4. Iakovlev V. L., Tarasov P. I., Furin V. O., Zyrianov I. V. *Sinking complex for kimberlite open pits cleaning-up*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2015. (In Russ.)
5. Atkinson T., Walton G. Design and layout of haul roads for surface mines. *Surface Mining and Quarrying. Pap. 2nd Int. Symp.* Bristol, 4–6 Oct. 1983.
6. Willimson Owen S. Haul road design for off-highway mining equipment. *World Mining Equip.* 1987; 12 (3): 24–26.
7. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode. *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 – Proceedings*. 2011. P. 4404–4407.
8. Smirnov V. P., Lel Iu. I. *The theory of open pit heavy haul trucks*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2002. (In Russ.)
9. Lel Iu. I., Salakhiev R. G., Arefiev S. A., Sandrigailo I. N. Perfection of rationing of fuel consumption in dump trucks based on horizontal equivalents of vertical movement of rock mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 2: 107–116. (In Russ.)
10. Galkin V. A., Karaulov G. A., Sidorenko V. N. Horizontal equivalent for vertical movement of rock mass by haul trucks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1983; 7: 14–18. (In Russ.)
11. Lel Iu. I., Arefiev S. A., Glebov A. V., Ilbuldin D. Kh. Regarding the problem of assessing the equality of open pit routes. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2016; 3(43): 70–73. (In Russ.)
12. Akishev A. N. et al. *Developing the production zone of deep kimberlite open pits*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 2015. (In Russ.)

Received 8 October 2020

Information about authors:

Iurii I. Lel – DSc (Engineering), Professor, Head of Open Pit Mining Department, 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

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

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

Nikolai V. Khardik – Chief State Inspector, Interregional Department of Mining Supervision, Ural Department of the Federal Environmental, Industrial, and Nuclear Supervision Service of Russia. E-mail: nickhardik@mail.ru

Для цитирования: Лель Ю. И., Глебов И. А., Мусихина О. В., Ганиев Р. С., Хардик Н. В. Энергетический метод оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 14–25. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-14-25

For citation: Lel Iu. I., Glebov I. A., Musikhina O. V., Ganiev R. S., Khardik N. V. Energy method of assessing and systematizing open pit automobile transport operating conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 8: 14–25 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-14-25