

УДК 622.684

Лель Юрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
разработки месторождений открытым способом,
Уральский государственный
горный университет,
620144 г. Екатеринбург, ул. Кубышева, 30
e-mail: lel49@mail.ru

Глебов Игорь Андреевич

студент,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: gleb_igor@mail.ru

Ганиев Руслан Салаватович

ассистент кафедры разработки месторождений
открытым способом,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: sunmail2003@mail.ru

Иванова Ольга Анатольевна

аспирант,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: olga15-07-83@mail.ru

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРНОГО
АВТОТРАНСПОРТА
ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ***Аннотация:*

На основе экспериментально-аналитических исследований разработана методика оценки трудности транспортирования, основанная на расчете расхода дизельного топлива автосамосвалами за транспортный цикл и приведенной фактической длины трассы к условному горизонтальному расстоянию с использованием энергетического критерия. В качестве критерия оценки трудности транспортирования обосновано использование коэффициента сложности трассы, представляющего собой отношение приведенного расстояния транспортирования к фактическому. Получены расчетные зависимости для определения приведенного расстояния на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы. На основе разработанной методики получены зависимости для расчета линейной дифференцированной нормы расхода топлива автосамосвалами Cat-777D и Cat-745C в условиях Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА». Проведена систематизация условий эксплуатации карьерного автотранспорта по критерию сложности трассы. Все условия разделены на пять классов сложности, при варьировании коэффициента сложности трассы от 1 до 3 и более. Установлено, что в настоящее время условия эксплуатации автотранспорта на большинстве алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» отно-

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.016

Lel Yuri I.

Doctor of technical sciences, professor,
the head of Department of surface
deposits development,
The Ural state mining University,
620144, Yekaterinburg, 30 Kuibishev st.
e-mail: lel49@mail.ru

Glebov Igor Andreevich

student,
The Ural state mining University
e-mail: gleb_igor@mail.ru

Ganiev Ruslan S.

assistant professor,
The department of surface
deposits development,
The Ural state mining University
e-mail: sunmail2003@mail.ru

Ivanova Olga A.

post-graduate student,
The Ural state mining University
e-mail: olga15-07-83@mail.ru

**SYSTEMATIZATION OF OPERATING
CONDITIONS FOR OPEN-PIT MOTOR
TRANSPORT ACCORDING
TO ENERGY CRITERION***Abstract:*

While operating modern motor vehicles in deep open pit mines, it is crucially important to develop methods and measures to evaluate the difficulty of mined rock transportation by open-pit dump trucks. It has been found out that currently there is no unified complex measure of transportation difficulty that could be used in technological evaluation of open-pit motor transport. Experimental and analytical researches carried out by the authors serve as a basis for the development of the transportation difficulty evaluation methods based on the calculation of the diesel fuel consumed by dump trucks per a load-haul-dump cycle and the actual load distance corrected in relation to conditional horizontal distance by means of the energy criterion. The coefficient of the haul distance complexity (μ) being the ratio of the corrected haul distance to the actual one is justified to be used as a criterion for the transportation difficulty evaluation. To correct a haul distance on the basis of the horizontal equivalents of the vertical rock mass movement, the calculated correlations have been obtained. It has been discovered that the haul distance complexity is determined by the rate of slope, rolling resistance, tare-load ratio and load capacity utilization factor as well as empirical coefficients, taking into account the increase in the rolling resistance of empty dump trucks in motion, the increase in specific fuel consumption at a rated load of an engine of empty dump trucks moving along a horizontal road, fuel consumption of

сятся к III-IV классам (сложные и весьма сложные, $\mu = 2,0 \dots 3,0$). Внедрение полноприводных автосамосвалов при доработке карьеров будет сопровождаться переходом условий к V классу (исключительно сложные, $\mu = 5,0 \dots 7,0$). Разработанные методические положения прошли апробацию и рекомендуются к использованию в проектной практике и практике эксплуатации карьерного автотранспорта.

Ключевые слова: карьер, автотранспорт, условия эксплуатации, приведенное расстояние, горизонтальный эквивалент вертикального перемещения, расход топлива, коэффициент сложности трассы, коэффициент сопротивления качению, коэффициент тары, коэффициент использования грузоподъемности, высота подъема горной массы

dump trucks in the brake-applied mode. The developed technique has provided the correlations for the calculation of the linear differential fuel allowance of dump trucks Cat-777D Cat-745S under operating conditions of Nyurbinsk open-pit mine of «ALROSA» Diamond Company. Operating conditions for the open-pit motor transport have been systematized by means of the haul distance complexity criterion and divided into five classes (relatively easy, medium, complex, highly complex and extremely complex) with the haul distance complexity coefficient ranging from 1 to 3 and more. It has been found out that the current operating conditions of the motor transport in the majority of the diamond mining pits of «ALROSA» refer to classes III-IV (complex and highly complex, $\mu = 2,0 \dots 3,0$). The introduction of all-wheel drive dump trucks during the cleaning-up stage will be accompanied by the transition to the operating conditions of Class V (extremely complex, $\mu = 5,0 \dots 7,0$). The developed methodological principles have been tested and are recommended for application in open pit motor transport. designing and operating

Key words: open-pit mine, motor transport, operating conditions, corrected distance, horizontal equivalent of the vertical movement, fuel consumption, haul distance complexity coefficient, rolling resistance coefficient, tare-load ratio, load capacity utilization factor, rock mass rise height

Внедрение на карьерах современных моделей автотранспортных средств, в том числе полноприводных автосамосвалов, сопровождается усложнением условий эксплуатации технологического автотранспорта. При этом важное значение приобретает разработка методики и показателей оценки трудности транспортирования горной массы. Наибольшую известность в этом направлении получил предложенный академиком В.В. Ржевским относительный показатель трудности транспортирования породы Π_T , рассчитываемый по эмпирическому выражению [1]:

$$\Pi_T = K_1\gamma + K_2d_{cp}A + K_3WnBC, \quad (1)$$

где γ – плотность породы, кг/м³;

d_{cp} – средний размер кусков породы в транспортном сосуде, м;

$A = 1 + 0,1\sigma_{сдв}$; $\sigma_{сдв}$ – сопротивление породы сдвигу (в образце), МПа;

W – влажность перевозимой породы (в долях единицы);

n – содержание в породе глинистых частиц (в долях единицы);

$B = 1 + \lg(T + 1)$; T – продолжительность транспортирования породы, ч;

$C = 1 - 0,025t$; t – температура воздуха, °C (учитывается только при $t \leq 0^\circ\text{C}$);

K_1, K_2, K_3 – эмпирические коэффициенты.

Все транспортируемые горные породы по величине Π_T подразделяются на пять классов. Вместе с тем, ввиду сложности расчета, указанный показатель не нашел должного практического применения. Существенным недостатком показателя Π_T является то, что входящая в него продолжительность транспортирования (T) также зависит от комплекса горнотехнических и дорожных условий эксплуатации.

В качестве показателей оценки трудности транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами различными авторами предлагались расстояние транспортиро-

вания, высота подъема (спуска) горной массы, средневзвешенный уклон трассы, качество дорожного покрытия, сложность трассы в плане и другие факторы в различном их сочетании [2 – 4]. Однако до настоящего времени единого комплексного показателя трудности транспортирования, который мог бы использоваться в технологических расчетах карьерного автотранспорта, не предложено.

В основу разработанной методики авторами положен энергетический принцип, поскольку расход энергии (дизельного топлива) наиболее адекватно реагирует на изменение условий эксплуатации технологического автотранспорта.

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

$$Q_{ц} = Q_{const} + Q_{пер}, \quad (2)$$

где Q_{const} – относительно постоянная часть расхода топлива в транспортном цикле, л;

$Q_{пер}$ – переменная часть расхода топлива, зависящая от расстояния транспортирования, высоты подъема (спуска) горной массы и других горнотехнических и дорожно-транспортных условий эксплуатации, л.

$$Q_{const} = Q_{п} + Q_{о} + Q_{р} + Q_{мп} + Q_{мр}, \quad (3)$$

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

$$Q_{п} + Q_{о} = g_x (t_{п} + t_{о}) / 60, \quad (4)$$

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

$$Q_i = g_i t_i / 60, \quad (5)$$

где Q_i – расход топлива на i -ом режиме, л;

g_i – удельный расход топлива на i -ом режиме, л/ч;

t_i – длительность i -го режима, мин.

$$g_i \approx g_n N_d k_{Ni} k_{п} / 1000\rho, \quad (6)$$

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 -ом режиме (табл. 1);

$k_{п}$ – поправочный коэффициент, учитывающий изменения g_n в зависимости от использования мощности двигателя ($k_{п} = 1,1 \dots 1,2$);

ρ – плотность дизельного топлива, кг/л.

Таблица 1

Значения коэффициентов использования мощности двигателя (k_{Ni}) на различных режимах (экспериментальные данные) [5]

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 [6]:

$$Q_{\text{пер}} = Q_{\text{д}}^{\text{Г}} + Q_{\text{д}}^{\text{П}} = \frac{G g_{\text{н}} L_{\text{пр}} \omega_0 [k_{\text{Г}}(1 + k_1 k_2) + k_{\text{Г}}]}{367 \eta_{\text{Т}} \rho}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{д}}^{\text{Г}}$ – расход топлива при движении груженых самосвалов, л;

$Q_{\text{д}}^{\text{П}}$ – расход топлива при движении порожних самосвалов, л;

G – грузоподъемность автосамосвала, т;

$k_{\text{Г}}$ – коэффициент использования грузоподъемности;

$\eta_{\text{Т}}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала;

ω_0 – коэффициент сопротивления качению груженых автосамосвалов на автодороге со щебеночным покрытием [10];

k_1 – коэффициент, учитывающий увеличение ω_0 при движении порожних автосамосвалов ($k_1 \approx 1,15 \dots 1,20$) [6];

k_2 – коэффициент, учитывающий увеличение удельного расхода дизтоплива при номинальной нагрузке $g_{\text{н}}$ при движении порожних автосамосвалов ($k_2 \approx 1,1$) [6];

$k_{\text{Г}}$ – коэффициент тары самосвала;

$L_{\text{пр}}$ – расстояние транспортирования (длина горизонтальной трассы), км.

Формулу (7) можно применить для расчета расхода топлива по реальной трассе, если фактическую длину трассы привести к горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием.

Общую длину реальной трассы движения (L , км) можно представить в виде суммы отдельных участков (рис. 1):

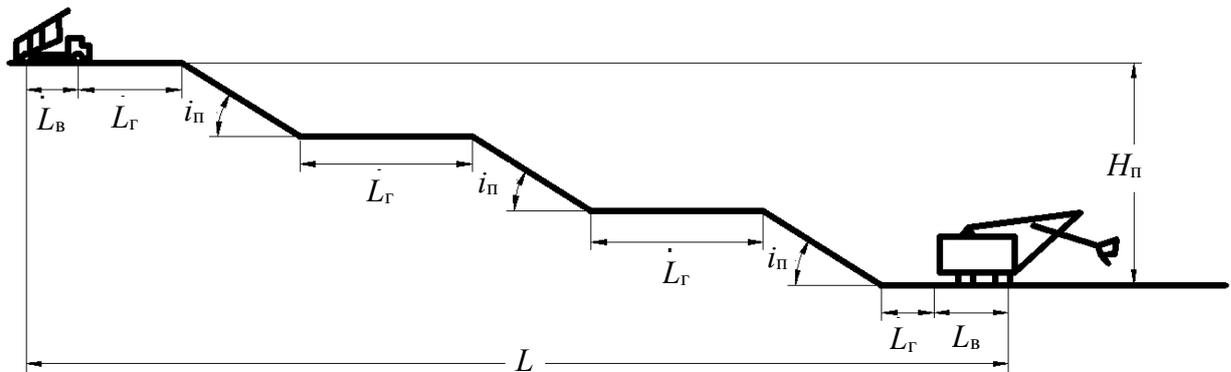


Рис. 1 – Схема к расчету расхода дизтоплива

$$L = L_{\text{Г}} + L_{\text{и}} + L_{\text{в}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{Г}}$ – суммарная протяженность горизонтальных участков со щебеночным покрытием, км;

$L_{\text{в}}$ – суммарная протяженность временных горизонтальных участков без покрытия, км.

$$L_{\text{и}} = L_{\text{п}} + L_{\text{с}} = H_{\text{п}} / i_{\text{п}} \cdot 10^3 + H_{\text{с}} / i_{\text{с}} \cdot 10^3, \quad (9)$$

где $L_{\text{Г}}$ – суммарная протяженность наклонных участков с уклоном $i_{\text{п}}$ при движении на подъем, км;

$L_{\text{с}}$ – суммарная протяженность наклонных участков с уклоном $i_{\text{с}}$ при движении на спуск, км;

$H_{\text{п}}$, $H_{\text{с}}$ – высота подъема (глубина спуска) горной массы, м.

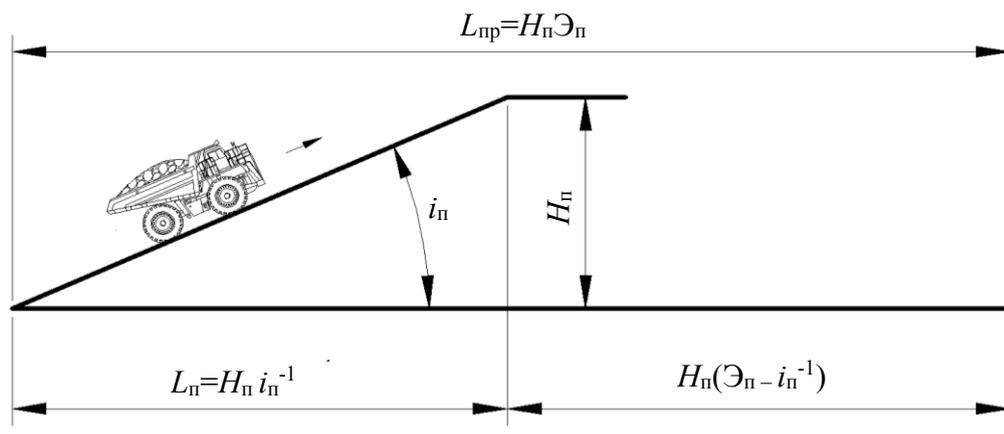


Рис. 2 – Схема к расчету приведенного расстояния транспортирования при работе автосамосвала на подъем горной массы

Приведенное расстояние транспортирования ($L_{пр}$, км) рассчитывается по формуле (рис. 2) [6, 7]:

$$L_{пр} = L_r + H_{п} \mathcal{E}_{п} \cdot 10^{-3} + H_c \mathcal{E}_c \cdot 10^{-3} + k_{пр} L_B, \quad (10)$$

где $\mathcal{E}_{п}$, \mathcal{E}_c – горизонтальные эквиваленты вертикального перемещения (подъема, спуска) горной массы, показывающие, какое расстояние транспортирование 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 [6].

Таблица 2

Зависимости для расчета горизонтальных эквивалентов

Горизонтальные эквиваленты вертикального перемещения, м/м	
Подъем горной массы	Спуск горной массы
$\mathcal{E}_{п} = \frac{k_3(k_T + k_r)(\omega_0 + i_{п})}{i_{п}\omega_0[k_T(1 + k_1k_2) + k_r]}$	$\mathcal{E}_{п} = \frac{k_1k_2k_4k_T(\omega_0 + i_c)}{i_c\omega_0[k_T(1 + k_1k_2) + k_r]}$

Примечание: k_3 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении порожних автосамосвалов на спуск в тормозном режиме ($k_3 = 1,05 \dots 1,07$); k_4 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении груженых автосамосвалов на спуск в тормозном режиме ($k_4 = 1,2 \dots 1,3$); $i_{п} (i_c) > \omega_0$

При расчете приведенного расстояния возникает необходимость приведения участков автодорог к одному типу покрытия – базовому. В качестве базового рекомендуется принимать наиболее распространенное в карьерах щебеночное покрытие с коэффициентом сопротивления качению $\omega_0 = 0,020 \dots 0,025$ [11,12]. В формуле (10) $k_{пр}$ – коэффициент приведения покрытия временных автодорог к базовому (щебеночному) покрытию.

$$k_{пр} = \omega_0^B / \omega_0, \quad (11)$$

где ω_0^B – коэффициент сопротивления качению на временных забойных и отвальных автодорогах.

Значения горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы и коэффициентов приведения покрытий временных автодорог для автосамосвалов Cat-77D с колесной формулой 4×2 и полноприводных автосамосвалов Cat-745C в горнотехнических условиях Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения горизонтальных эквивалентов и коэффициентов приведения покрытий временных автодорог

Модель и грузоподъемность самосвала	Значения горизонтальных эквивалентов ($k_T = 0,9$; $\omega_0 = 0,0225$)								$k_{пр}$
	Э _п , м/м при i_p				Э _с , м/м при i_c				
	0,08	0,12	0,18	0,24	0,08	0,12	0,18	0,24	
Cat-777D (G = 91т)	38,54	–	–	–	27,20	–	–	–	1,78
Cat-745C (G = 41т)	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 $1000\rho/k_T GL$, где L – фактическое расстояние транспортирования в км, получим дифференцированную норму расхода топлива для конкретной модели автосамосвала (N_a , г/ткм):

$$N_a = \frac{1000\rho Q_{const}}{k_T GL} + \frac{2,725 g_H \omega_0 L_{пр} [k_T (1 + k_1 k_2) + k_T]}{L \eta_T k_T}. \quad (12)$$

Обозначив $\mu = \frac{L_{пр}}{L}$ – коэффициент сложности трассы, получим

$$N_a = \frac{1000\rho Q_{const}}{k_T GL} + \frac{2,725 g_H \omega_0 \mu [k_T (1 + k_1 k_2) + k_T]}{\eta_T k_T}. \quad (13)$$

В горнотехнических условиях Нюрбинского карьера для автосамосвалов Cat-777D при $Q_{const} = 2,86$ л; $g_H = 225$ г/кВт·ч; $k_T = 0,71$; $k_T = 0,9$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,1$; $\omega_0 = 0,0225$; $G = 91$ т; $\eta_T = 0,85$; $\rho = 0,836$ кг/л норма расхода топлива составит

$$N_a = \frac{29,19}{L} + 45,80\mu. \quad (14)$$

Сравнение фактического расхода топлива автосамосвалами Cat-777D на Нюрбинском карьере с расчетным показывает высокую точность предлагаемой методики практически в любых диапазонах изменения горнотехнических условий эксплуатации, то есть при любой сложности трасс. Ошибка составляет 2,5–4,0 %.

Для полноприводных автосамосвалов Cat-745C, применение которых предполагается при разработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера, при $Q_{const} = 1,34$ л; $g_H = 210$ г/кВт·ч; $k_T = 0,80$; $k_T = 0,9$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,1$; $\omega_0 = 0,0225$; $G = 41$ т; $\eta_T = 0,85$; $\rho = 0,836$ кг/л норма расхода топлива составит

$$N_a = \frac{30,36}{L} + 46,48\mu. \quad (15)$$

Таким образом, линейная норма расхода топлива при прочих равных условиях для конкретной модели автосамосвала представляет собой функцию двух переменных – фактического расстояния транспортирования (L) и отношения приведенного расстояния к фактическому, то есть сложности трассы. Левая часть уравнений (12) – (15) отражает постоянную составляющую расхода топлива, доля которой в общем расходе за цикл уменьшается с увеличением расстояния транспортирования. Правая часть указанных уравнений отражает переменную часть расхода, которая линейно зависит от сложности трассы.

Коэффициент сложности трассы (μ) показывает, во сколько раз энергозатраты при движении автосамосвала по реальной трассе протяженностью L превышают энергозатраты при движении по горизонтальной автодороге со щебеночным покрытием такой же протяженности.

В простейшем случае, когда трасса представлена участком подъема или спуска, коэффициент сложности трассы определится из следующих выражений:

при работе на подъем горной массы

$$\mu = \frac{L_{\text{пр}}}{L} = \frac{H_{\text{п}} \mathcal{E}_{\text{п}}}{H_{\text{п}}/i_{\text{п}}} = \mathcal{E}_{\text{п}} i_{\text{п}}, \quad (16)$$

при работе на спуск

$$\mu = \frac{L_{\text{пр}}}{L} = \frac{H_{\text{с}} \mathcal{E}_{\text{с}}}{H_{\text{с}}/i_{\text{с}}} = \mathcal{E}_{\text{с}} i_{\text{с}}. \quad (17)$$

В развернутом виде при работе на подъем

$$\mu = \frac{k_3(k_{\text{T}} + k_{\text{Г}})(\omega_{\text{о}} + i_{\text{п}})}{\omega_{\text{о}}[k_{\text{T}}(1 + k_1 k_2) + k_{\text{Г}}]}, \quad (18)$$

при работе на спуск

$$\mu = \frac{k_1 k_2 k_4 k_{\text{T}} (\omega_{\text{о}} + i_{\text{с}})}{\omega_{\text{о}}[k_{\text{T}}(1 + k_1 k_2) + k_{\text{Г}}]}. \quad (19)$$

Если коэффициент сопротивления качению (ω_i) на участке подъема (спуска) отличается от стандартных значений на автодороге со щебеночным покрытием ($\omega_{\text{о}}$), то выражения (18) и (19) принимают следующий вид:

при движении и на подъем

$$\mu = \frac{k_3(k_{\text{T}} + k_{\text{Г}})(\omega_i + i_{\text{п}})}{\omega_{\text{о}}[k_{\text{T}}(1 + k_1 k_2) + k_{\text{Г}}]}, \quad (20)$$

при движении на спуск

$$\mu = \frac{k_1 k_2 k_4 k_{\text{T}} (\omega_i + i_{\text{с}})}{\omega_{\text{о}}[k_{\text{T}}(1 + k_1 k_2) + k_{\text{Г}}]}. \quad (21)$$

Таким образом, сложность трассы 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 сложность трассы оказывает уклон автодорог (рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость линейной нормы расхода топлива автосамосвалов Cat-745C от расстояния транспортирования и коэффициента сложности трассы в условиях Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА».

Установлено, что объективной закономерностью для глубоких карьеров является увеличение сложности трассы с ростом глубины разработки (рис. 5). При этом максимальные значения коэффициентов сложности трассы для автосамосвалов с колесной формулой 4×2, работающих на руководящих уклонах $i_{\text{р}} \leq 10 \dots 12 \%$, могут достигать 2,5 – 3,2. При внедрении полноприводных автосамосвалов, эксплуатирующихся на руководящих уклонах до 18 – 24 %, коэффициент сложности трассы увеличивается до 5 – 7 [8, 9].

Показатель сложности трассы является комплексным, объективно отражает изменения горнотехнических условий эксплуатации карьерного автотранспорта, имеет численное выражение, может использоваться в технологических расчетах расхода дизельного топлива. Этот показатель можно применить в качестве основы для систематизации условий эксплуатации технологического карьерного автотранспорта (табл. 4).

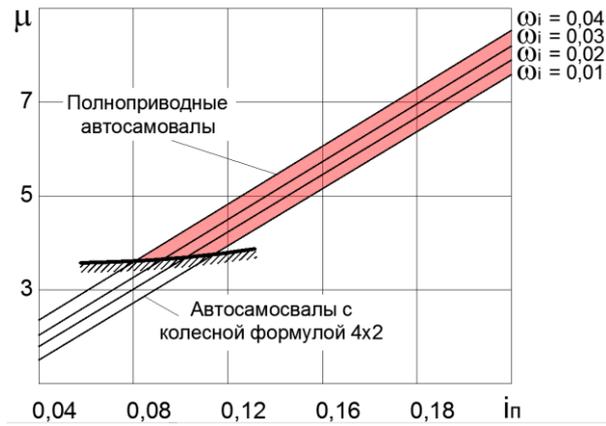


Рис. 3 – Зависимость коэффициента сложности трассы (μ) от уклона автодорог ($i_{п}$) и коэффициента сопротивления качению (ω_i) при работе автосамосвалов на подъем горной массы

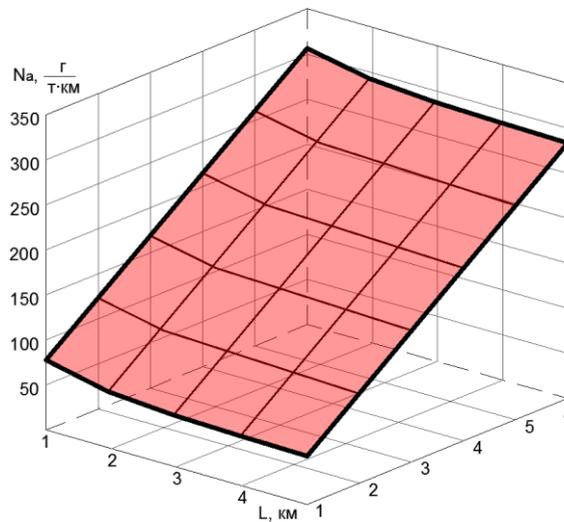


Рис. 4 – Зависимость нормы расхода топлива (N_a , г/ткм) от расстояния транспортирования (L) и коэффициента сложности трассы (μ) (автосамосвал Cat-745C)

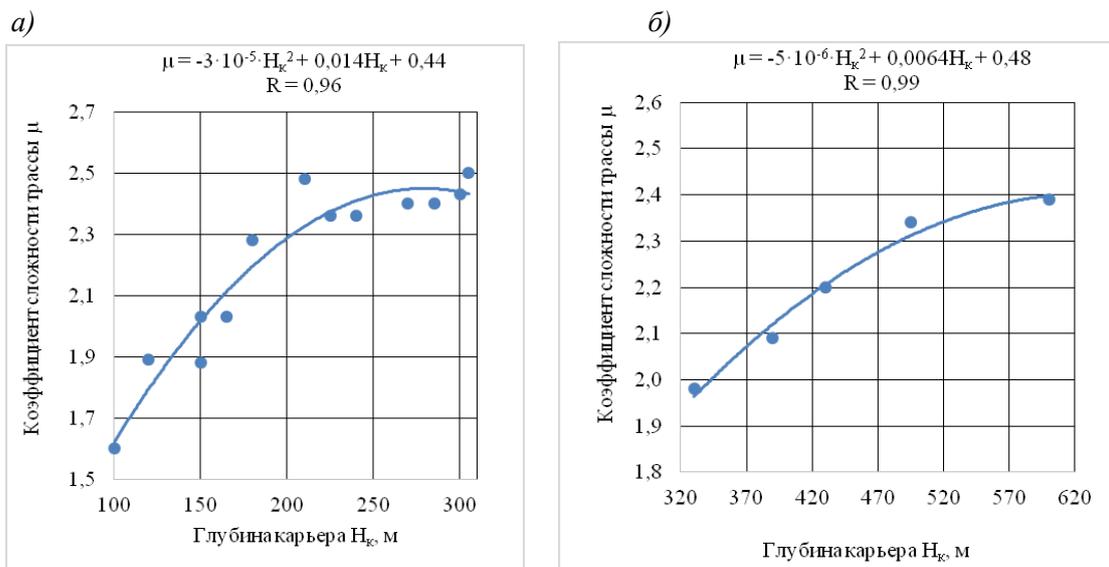


Рис. 5 – Зависимость коэффициента сложности трассы (μ) от глубины карьеров (H_k): а) карьер «Нюрбинский»; б) карьер «Юбилейный» АК «АЛРОСА» (ПАО)

Все условия эксплуатации карьерного автотранспорта разделены на пять классов. В настоящее время условия эксплуатации автотранспорта на карьерах АК «АЛРОСА» (ПАО) 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 «Магnezит» и карьер «Малый Куйбас» Магнитогорского металлургического комбината.

Внедрение полноприводных автосамосвалов при доработке алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО) будет сопровождаться переходом условий к V классу (исключительно сложные) и потребует дополнительных исследований по обеспечению безопасности и эффективности эксплуатации.

Таблица 4

Систематизация условий эксплуатации карьерного транспорта

Класс условий эксплуатации	Коэффициент сложности трассы $m = L_{пр}/L$	Характеристика условий эксплуатации	Примечания
I	1,00 – 1,50	Относительно легкие	Карьеры поверхностного типа глубиной до 40-50 м, $i_p \leq 6...8\%$; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования до 40%. Преимущественное использование автосамосвалов с колесной формулой 4Ч2, 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 4Ч2.
III	2,01 – 2,50	Сложные	Карьеры глубиной до 300-350 м; $i_p = 8...12\%$; 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 4Ч2.
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 4Ч2 в верхней и средней зонах карьера ($i_p = 10...12\%$) и полноприводных автосамосвалов в нижней зоне ($i_p = 18...24\%$).
V	> 3,00	Исключительно сложные	Карьеры глубиной более 600 м; доля уклонов в общем расстоянии транспортирования более 80%. Преимущественное использование полноприводных автосамосвалов ($i_p = 18...24\%$).

Выводы

В результате проведенных исследований разработана методика оценки трудности транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами, основанная на расчете расхода дизельного топлива за транспортный цикл и приведении фактической длины трассы к условному горизонтальному расстоянию транспортирования с использованием

энергетического критерия. В качестве критерия оценки трудности транспортирования обосновано использование коэффициента сложности трассы, 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 эквивалентов вертикального перемещения горной массы. Проведена систематизация условий эксплуатации карьерного транспорта по критерию сложности трассы. 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 $\mu = 2,0 \dots 3,0$). Внедрение полноприводных автосамосвалов, работающих на руководящих уклонах до 18 – 24 %, будет сопровождаться переходом условий эксплуатации к V классу (исключительно сложные, $\mu = 5,0 \dots 7,0$).

Методика может быть использована в проектной практике и в практике эксплуатации технологического карьерного автотранспорта.

Литература

1. Ржевский В.В. Открытые горные работы: Производственные процессы: Учебник. Изв. стереотип / В.В. Ржевский. – М.: Книжный дом «ЛИБКОМ», 2013. – 512 с.
2. Яковлев В.Л. Новые специализированные виды транспорта для горных работ / В.Л. Яковлев, П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 375 с.
3. Кармаев Г.Д. Выбор горно-транспортного оборудования циклично-поточной технологии карьеров / Г.Д. Кармаев, А.В. Глебов. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – 296 с.
4. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров / В.Л. Яковлев, П.И. Тарасов, В.О. Фурин, И.В. Зырянов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. – 268 с.
5. Смирнов В.П. Теория карьерного большегрузного автотранспорта / В.П. Смирнов, Ю.И. Лель. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 355 с.
6. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы / Ю.И. Лель, Р.Г. Салахияев, С.А. Арефьев, И.Н. Сандригайло // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. - № 2. – С. 107 - 116.
7. Галкин В.А. Горизонтальный эквивалент вертикального перемещения горной массы карьерными автосамосвалами / В.А. Галкин, Г.А. Караулов, В.Н. Сидоренко // Изв. вузов. Горный журнал. - 1983. - № 7. – С. 14 - 18.
8. Технологические схемы перехода на новые модели автосамосвалов при доработке глубоких карьеров / Ю.И. Лель, А.В. Глебов, Д.Х. Ильбульдин и др. // Изв. вузов. Горный журнал. – 2015. - № 8. – С. 4 - 13.
9. Формирование рабочей зоны глубоких кимберлитовых карьеров / А.Н. Акишев, И.В. Зырянов, Б.Н. Зарвняев, Г.В. Шубин и др. – Новосибирск: Наука, 2015. – 204 с.
10. К вопросу оценки качества карьерных автодорог / Ю.И. Лель, С.А. Арефьев, А.В. Глебов, Д.Х. Ильбульдин // Известия УГГУ. – Вып. 3(43). – С. 70 - 73.
11. 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»
12. Willimson Owen S. Haul road design for off-highway mining equipment. World Mining Equip. - 1987. - Vol. 12. - № 3. - P. 24 - 26.