

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 622.271:625.7

DOI 10.21440/2307-2091-2016-3-70-73

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГ

Ю. И. Лель, С. А. Арефьев, А. В. Глебов, Д. Х. Ильбульдин

The issue of quality assessment of quarry roads

Yu. I. Lel', S. A. Aref'ev, A. V. Glebov, D. Kh. Il'bul'din

As a result of studies the authors determined interrelation and area of application of the basic indicators of quality of career roads: rolling resistance, road pavement durability and deformability of road pavement. In the conditions of career «Yubileyny» of «ALROSA» company and JSC «Uralasbest» the authors proposed and tested the method for estimating rolling resistance coefficient of dump trucks by consumption of diesel fuel using fuel consumption monitoring devices FMS and electronic combustion engine controllers. Authors also established close regression relationships of coefficients of rolling resistance with coefficients of road pavement durability and relative deformability of pavements. The research proves that insufficiency of pavements strength provides a good explanation for a large variation (change of 1.8...2.0-fold) and low stability over time of rolling resistance coefficient on quarry roads with the same type of coating. Obtaining a reliable assessment of the rolling resistance coefficients is possible only under the normative values of durability coefficients ($k_{dur} \geq 0,95$), which can be ensured by sealing road pavements. In order to improve quality of quarry roads and reduce their construction costs the authors propose sealing technology with the use of pit dump trucks without excluding them from the technological cycle. The technology consists in strict compliance with sealing modes by adjusting the number of passes of cars on the road width, speed and load of dump trucks. The technology was tested at the experimental site of career of JSC «Uralasbest». The article contains the developed technological regulations of sealing macadam road pavements by dump trucks with carrying capacity of 130 tons; as well as the dependences of road pavement density and durability ratio from the number of dump trucks passes over one track. 15–20 passes of car on compaction area provide the regulatory road pavement quality indicators ($k_{dur} \geq 0,95$).

Keywords: rolling resistance; the strength of road pavement; deformity of road pavement; expenditure of diesel fuel; sealing of road pavement; the number of dump truck passes.

В результате исследований установлены взаимосвязь и область применения основных показателей качества карьерных автодорог: сопротивления качению, прочности дорожной одежды и деформированности дорожного покрытия. Предложен и апробирован в условиях карьера «Юбилейный» АК АЛРОСА и ОАО «Ураласбест» метод оценки коэффициентов сопротивления качению автосамосвалов по расходу дизельного топлива с использованием приборов контроля расхода топлива FMS и электронных систем управления двигателями внутреннего сгорания. Установлены тесные регрессионные взаимосвязи коэффициентов сопротивления качению с коэффициентами прочности дорожной одежды и относительной деформируемостью дорожных покрытий. Доказано, что значительная вариация (изменение в 1,8–2,0 раза) и низкая стабильность во времени коэффициентов сопротивления качению на карьерных автодорогах с одним и тем же типом покрытия объясняется недостаточной прочностью дорожных покрытий. Достоверную оценку коэффициентов сопротивления качению можно получить только при нормативных значениях коэффициентов прочности ($k_{пр} \geq 0,95$), которые обеспечиваются уплотнением дорожных одежд. С целью повышения качества карьерных автодорог и снижения затрат на их строительство предложена технология уплотнения с применением карьерных автосамосвалов без исключения их из технологического цикла. Технология заключается в строгом соблюдении режимов уплотнения путем регулирования количества проходов машин по ширине автодороги, скорости и загрузки автосамосвалов. Технология апробирована на опытном участке карьера ОАО «Ураласбест». Разработан технологический регламент уплотнения щебеночных дорожных одежд автосамосвалами грузоподъемностью 130 т. Получены зависимости плотности дорожной одежды и коэффициента прочности от количества проходов автосамосвалов по одному следу. Установлено, что нормативные показатели качества дорожной одежды ($k_{пр} \geq 0,95$) обеспечиваются за 15–20 проходов машины по уплотненному участку.

Ключевые слова: сопротивление качению; прочность дорожной одежды; деформируемость дорожного покрытия; расход дизельного топлива; уплотнение дорожной одежды; количество проходов автосамосвала.

Основным показателем качества дорожных покрытий, используемым при эксплуатационных расчетах карьерного автотранспорта, является коэффициент сопротивления качению ω_0 [1]. Сопротивление качению по деформируемой поверхности карьерных автодорог представляет собой сложный физико-механический процесс, протекание которого зависит от типа, конструкции и состояния покрытия, совокупности его транспортно-эксплуатационных качеств, давления воздуха в шинах, рисунка протектора и степени его изношенности, удельного давления на поверхность покрытия и скорости движения. Поскольку удельное сопротивление качению стохастически изменяется в динамике движения автосамосвала по реальной трассе, то расчетным путем можно получить лишь усредненное его значение. Основным экспериментальным методом оценки коэффициента сопротив-

ления качению является метод свободного выбега (движение автосамосвала 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 [2, 3]. Такой метод был использован авторами для оценки коэффициентов сопротивления качению в условиях карьеров ОАО «Ураласбест» и АК АЛРОСА (ПАО). В табл. 1 в качестве примера приведены результаты замеров расхода топлива электронной системой, необходимые для оценки коэффициента сопротивления качению. Исследования проведены кафедрой РМОС УГГУ в условиях карьера «Юбилейный» АК АЛРОСА (ПАО) [2].

Коэффициент сопротивления качению ω_0 определяется из выражения

$$\omega_0 = \frac{3,67 \cdot 10^2 v_i^{-1} g_i \eta_r \eta_k \rho}{g_n (G_a + k_r G)} - i,$$

Расчет производится в следующей последовательности.

1. Уточняется удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя g_n , г/(кВт × ч):

$$g_n = g_i \rho \cdot 10^3 / N_d,$$

где g_i – удельный расход топлива в режиме подъема груза, л/ч; ρ – плотность топлива, кг/л; N_d – номинальная мощность двигателя, кВт.

Получаем $g_n = 220,2$ г/(кВт × ч).

Разница между фиксируемыми и паспортными значениями g_n составляет 6,7 % при допуске отклонения ± 10 %.

2. Определяется коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала

$$\eta_a = N / N_d,$$

где N – мощность, снимаемая с электродвигателей мотор-колес, кВт; $\eta_a = 0,9$.

3. Рассчитываем: $\omega_0 = 0,027$.

Предлагаемый метод оценки ω_0 имеет явные преимущества по сравнению с аналогичным методом, рекомендуемым ИГД УрО РАН [3], так

Таблица 1. Эксплуатационные показатели автосамосвалов Unit Rig MT-3300DC.

Показатели	Значение
Паспортные показатели	
Грузоподъемность автосамосвала G , т	136
Собственная масса автосамосвала G_a , т	105,216
Паспортная загрузка автосамосвала $k_f G$, т	122,4
Коэффициент использования грузоподъемности k_f	0,9
Модель двигателя	Cummins QSK-45
Номинальная мощность двигателя N_d , кВт	1103
Удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя g_n , г/(кВт × ч)	206 ± 10 %
Средняя плотность топлива ρ , кг/л	0,841
Коэффициент полезного действия колеса η_k	0,9
Тип дорожного покрытия	Щебеночное (Щ)
Уклон автодороги i , доли ед.	0,08
Показатели, регистрируемые электронной системой ДВС	
Скорость груженого автосамосвала v_i на уклоне $i = 0,08$, км/ч	13,5
Мощность, снимаемая с электродвигателей мотор-колес N , кВт	992,7
Удельный расход топлива в режиме:	
подъема груза g , л/ч	288,83
холостого хода g_x при $n = 800$ мин ⁻¹ , л/ч	28,4
динамического торможения g'_x , л/ч	47,85

как позволяет более точно определить коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала η_t и удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя g_n .

В карьерных условиях коэффициент сопротивления качению изменяется от 0,013 до 0,054 в зависимости от типа и состояния дорожного покрытия, грузоподъемности автосамосвала, скорости движения и других факторов. Установлено, что коэффициент ω_0 в интервале скоростей 10–35 км/ч, наиболее характерных для внутрикарьерных перевозок, изменяется незначительно и для практических расчетов может быть принят постоянным. На временных автодорогах ω_0 в 2,0–2,5 раза выше, чем на постоянных со щебеночным покрытием. При отсутствии фактических данных рекомендуется принимать средние значения ω_0 в зависимости от типа дорожного покрытия и грузоподъемности автосамосвала, установленные в типичных условиях рудных карьеров [1]. Величину коэффициента сопротивления качению порожних автосамосвалов ω'_0 по данным экспериментальных исследований рекомендуется принимать на 15–20 % выше, чем гружёных [1]:

$$\omega'_0 \approx (1,15 - 1,20)\omega_0.$$

Однако при всей универсальности коэффициент сопротивления качению недостаточно всесторонне характеризует качество дорожного покрытия. Исследованиями установлено, что для одного и того же типа покрытия в зависимости от его состояния коэффициент сопротивления качению имеет большую вариацию (изменяется в 1,8–2,0 раза) и низкую стабильность во времени [4]. В связи с этим при проектировании, строительстве и эксплуатации карьерных автодорог используются дополнительные показатели качества, такие, как прочность дорожной одежды и деформированность дорожного покрытия. В то же время в технической литературе отсутствуют исследования, устанавливающие взаимосвязь этих показателей с сопротивлением качению.

Коэффициент прочности дорожной одежды k_{np} – это отношение фактического модуля упругости дорожной одежды на период оценки к требуемому модулю упругости, определенному по интенсивности и составу транспортного потока на расчетный год, предусмотренный в проекте:

$$k_{np} \geq E_\phi / E_{тр},$$

где E_ϕ – фактический модуль упругости дорожной одежды, МПа; $E_{тр}$ – требуемый модуль упругости, МПа.

Фактический модуль упругости определяется по величине упругой деформации

$$E_\phi = \frac{\pi p D (1 - \mu^2)}{4l},$$

где μ – коэффициент Пуассона, среднее значение которого при определении общего модуля упругости слоистой конструкции принимается $\mu = 0,3$; p – удельное давление на покрытие, МПа; l – упругая деформация, см; D – диаметр отпечатка заднего колеса груженого автосамосвала, см.

Значения требуемого модуля упругости определяются по формуле [5]:

$$E_{тр} = 85(\lg \Sigma N - 0,015h) - 218,$$

где ΣN – число проходов задней оси расчетного автомобиля (БелАЗ-548А) за срок службы дорожной одежды для постоянных дорог или за срок использования для временных дорог; h – толщина дорожной одежды, см.

ЗАО «Промтрансстрой» рекомендованы нормативные значения k_{np} для различных категорий автодорог и типов дорожных одежд, которые изменяются в пределах 0,70–1,20 [5].

Относительная деформируемость дорожного покрытия определяется по формуле

$$r = S_d / S_{общ},$$

где S_d – площадь участков с деформированной проезжей частью, м²; $S_{общ}$ – общая площадь опытного участка, м². Оценка деформируемости производится по 3-балльной шкале СоюздорНИИ [6].

Исследованиями канд. техн. наук С. В. Богомолова были установлены тесные регрессионные взаимосвязи коэффициента прочности щебеночных дорожных одежд и коэффициента сопротивления качению с показателями деформируемости [4]:

$$k_{np} \approx 0,615 / (r + 0,41) \quad (R = 0,86); \quad \omega_0 \approx 0,034 / (1,484 - r) \quad (R = 0,80).$$

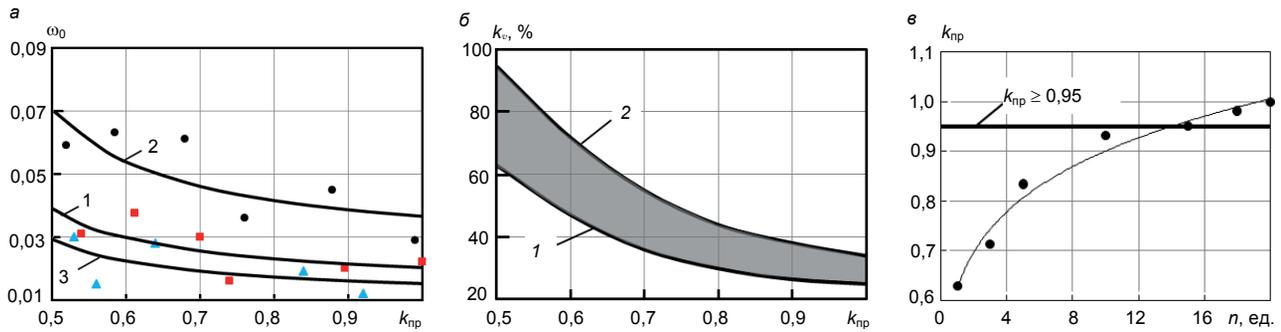
Экспериментальной проверкой установлено, что более универсальный характер будет иметь зависимость

$$\omega_0 \approx 0,026 k_n / (1,484 - r),$$

где k_n – коэффициент, учитывающий тип дорожного покрытия ($k_n = 0,75 - 0,80$ – для постоянных автодорог с асфальтобетонным покрытием; $k_n = 1,0$ – для постоянных автодорог со щебеночным покрытием; $k_n = 1,8 - 2,0$ – для временных автодорог).

На основании проведенных исследований была установлена зависимость коэффициента сопротивления качению от коэффициента прочности дорожного покрытия [7]

$$\omega_0 \approx 0,026 k_n / (1,894 - 0,615 k_n^{-1}) \quad (R = 0,84).$$



Зависимости коэффициентов. а – сопротивления качению ω_0 от коэффициента прочности дорожного покрытия k_{np} : 1 – щебеночное покрытие; 2 – временные автодороги; 3 – асфальтобетонное покрытие; б – вариации сопротивления качению ω_0 , % от коэффициента прочности дорожного покрытия k_{np} : 1 – постоянные автодороги со щебеночным покрытием; 2 – временные автодороги; в – прочности дорожной одежды k_{np} от количества проходов автосамосвалов по одному следу n , ед. / The dependence of the rolling resistance coefficient from the road pavement coefficient of durability; the dependence of the variation rolling resistance coefficient from the road pavement coefficient of durability; the dependence of the durability of road pavement from the number of dump trucks passes on one track.

Экспериментальные зависимости ω_0 от k_{np} приведены на рис., а. Физическую взаимосвязь между коэффициентом сопротивления качению и коэффициентом прочности дорожной одежды можно интерпретировать следующим образом. Например, построено два участка карьерной автодороги со щебеночным покрытием, характеризующихся различными коэффициентами прочности дорожной одежды, $k_{np2} > k_{np1}$. Участки имеют различные нормативные сроки службы, $T_2 > T_1$. В период сдачи участков в эксплуатацию коэффициенты сопротивления качению на них имеют примерно одинаковые значения $\omega_{01} \approx \omega_{02} \approx \omega_0$. Во время эксплуатации дороги коэффициенты сопротивления увеличиваются и за нормативный период достигают предельного значения ω_{0np} , при котором необходим ремонт дорожной одежды [8, 9]. При этом на участке с наименьшим коэффициентом прочности это происходит значительно быстрее. Коэффициент прочности характеризует способность дорожной одежды сохранять приемлемые транспортно-эксплуатационные качества в течение определенного (нормативного) срока эксплуатации. Таким образом, область применения ω_0 – это оценка текущего состояния дорожного покрытия, эксплуатационные расчеты карьерного автотранспорта, оценка и выбор автомобильных трасс. Областью применения k_{np} являются обоснование и расчет конструкций дорожных одежд и технологии строительства карьерных автодорог. При этом достоверная оценка коэффициентов сопротивления качению может быть получена только при нормативных значениях коэффициентов прочности, которые можно обеспечить за счет уплотнения дорожных одежд. Зависимость коэффициента вариации сопротивления качению от коэффициента прочности дорожного покрытия представлена на рис., б.

В настоящее время на большинстве отечественных карьеров не предусматривается проведение специальных работ по уплотнению дорожной одежды. Там, где указанные работы производятся, используется специальное дорогостоящее импортное оборудование – грунтовые и пневмоколесные катки в широкозахватном исполнении. При этом движение автосамосвалов на уплотняемых участках перекрывается и они на длительные периоды исключаются из технологического цикла. С целью повышения качества карьерных автодорог и снижения затрат на их строительство авторами предложена технология уплотнения с применением карьерных самосвалов без исключения их из технологического цикла [7]. Технология заключается в строгом соблюдении режимов уплотне-

ния путем регулирования количества проходов машин по ширине автодороги, скорости и загрузки автосамосвалов и состоит из трех стадий:

- подкатки на малой скорости с минимальной нагрузкой для уплотнения поверхностного слоя и придания ему требуемой плотности;
- укатки или непосредственного уплотнения слоя дорожной одежды на необходимую глубину при постепенном увеличении скорости движения и загрузки автосамосвалов;
- расклиновки или окончательного уплотнения, производимого на минимальной скорости с максимальной нагрузкой.

Направления движения машин, скорости (от 2 до 10–15 км/ч), нагрузка (от 50 до 100 %) и количество проходов по одному следу n регулируются в соответствии с разработанной методикой (табл. 2).

Для апробации предложенной технологии был построен опытный участок автодороги на карьере ОАО «Ураласбест». После строительства участка была произведена оценка его транспортно-эксплуатационных качеств путем сравнения с аналогичными показателями на контрольном участке, построенном по старой технологии.

В качестве критериев оценки использовались плотность слоев дорожной одежды ρ_d , г/см³, и коэффициент прочности k_{np} . Оценка производилась с помощью баллонного плотномера ПБД-КМ, высокоточных нивелиров Н-05 и SDL-50 и дорожной рейки РДУ-Кондор.

С целью определения количества проходов n , необходимых для достижения требуемого коэффициента прочности дорожной одежды $k_{np} \geq 0,95$, после 2–3 проходов по одному следу осуществлялся расчет фактической плотности и модуля упругости дорожной одежды. Получены следующие регрессионные зависимости: $\rho_d = 1,76n^{0,14}$; $k_{np} = 0,62n^{0,17}$. Зависимости характеризуются высокими значениями коэффициентов регрессии $R = 0,977–0,986$.

Зависимость коэффициента прочности дорожной одежды от количества проходов автосамосвалов приведена на рис., в. Установлено, что требуемые показатели качества дорожной одежды обеспечиваются за 15–20 проходов машины по уплотняемому участку.

Испытания показали, что опытный участок по сравнению с контрольным характеризовался более устойчивыми показателями качества и не потребовал в течение года дополнительных затрат на содержание и ремонт. В то же время для обеспечения нормальной эксплуатации контрольного участка потребовалось затратить дополнительно 4,7 тыс. т щебня.

Таблица 2. Технологический регламент уплотнения дорожных одежд постоянных автодорог в карьере ОАО «Ураласбест» автосамосвалами грузоподъемностью 130 т.

Стадия уплотнения	Регламентируемые параметры					
	Загрузка автосамосвала, %	Скорость движения, км/ч	Толщина уплотняемого слоя, м	Количество, ед. машин для уплотнения	Количество, ед. проходов по одному следу	Время уплотнения, ч
Подкатка поверхностного слоя	0	2	0,3	2*	2	1,2
Укатка или уплотнение на глубину	50	5	До 0,5	2	5–8	3,8
	75	10	До 0,7			
Расклиновка или окончательное уплотнение	100	2	До 0,5	2	3–6	1,2–3,0

*Для эффективного перекрытия предыдущего прохода автосамосвала последующим необходимо использовать не менее двух машин. Протяженность участка 200 м, ширина дороги 20 м

Фактический экономический эффект от внедрения разработанной технологии строительства и уплотнения автодорог в условиях ОАО «Ураласбест» составил 455 тыс. руб., ожидаемый – 2,3 млн руб. на 1 км автодороги.

Установленные взаимосвязи показателей качества карьерных автодорог позволяют повысить обоснованность эксплуатационных расчетов карьерного автотранспорта и расчетов конструкций дорожных одежд при проектировании карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. П., Лель Ю. И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 355 с.
2. Разработка удельных норм расхода топлива технологическим транспортом на карьере «Юбилейный»: отчет о НИР (заключит.) / УГГУ; рук. Лель Ю. И. Екатеринбург, 2007. 224 с.
3. Яковлев В. Л., Тарасов П. И., Журавлев А. Г. Новые специализированные виды транспорта для горных работ. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 375 с.
4. Богомолов С. В. Обоснование параметров временных технологических автодорог на угольных разрезах: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИ, 1992. 237 с.
5. Сидяков В. А., Колчанов А. Г. Стенин Ю. В. Карьерные автомобильные дороги. М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2011. 144 с.
6. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1987. 207 с.
7. Арефьев С. А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2015. 20 с.
8. Atkinson T., Walton G. Design and Layout of haul road for surface mines // Surface Mining and Quarrying. Pap.: 2nd Int. Symp. (Bristol, 4–6 Oct., 1983).

Юрий Иванович Лель,

lel49@mail.ru

Степан Александрович Арефьев,

arefevsa@yandex.ru

Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Глебов Андрей Валерьевич,

glebov@igduran.ru

Институт горного дела УрО РАН

Россия, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Ильбульдин Давлят Хурматович,

ilbuldin@yna.alrosa-mir.ru

НИИ «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА»

Россия, Республика Саха (Якутия), Мирный, ул. Ленина, 39

London, 1983. P. 369–381.

9. Williamson O. C. Haul road design for off-highway mining equipment // World Mining Equip. 1987. Vol. 12, № 3. P. 24–26.

REFERENCES

1. Smirnov V. P., Lel' Yu. I. 2002, *Teoriya kar'ernogo bol'shegruznogo avtotransporta* [The theory of quarry heavy trucks], Ekaterinburg, 355 p.
2. 2007, *Razrabotka udel'nykh norm rashhoda topliva tekhnologicheskim transportom na kar'ere «Yubileynyy»: Otchet o NIR (zaklyuchit.)* [Development of specific norms of technological transport fuel consumption in the «Yubileynyy» quarry: Research report (concluded)], Ekaterinburg, 224 p.
3. Yakovlev V. L., Tarasov P. I., Zhuravlev A. G. 2011, *Novye spetsializirovannye vidy transporta dlya gornyykh rabot* [New types of specialized transport for mining operations], Ekaterinburg, 375 p.
4. Bogomolov S. V. 1992, *Obosnovanie parametrov vremennykh tekhnologicheskikh avtodorog na ugol'nykh razrezakh. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of parameters of temporary technological roads on coal cuts. The dissertation of the candidate of technical sciences], Moscow, 237 p.
5. Sidiyakov V. A., Kolchanov A. G. Stenin Yu. V. 2011, *Kar'ernye avtomobil'nye dorogi* [Quarry roads], Moscow, 144 p.
6. Sil'yanov V. V. 1987, *Transportno-ekspluatatsionnye kachestva avtomobil'nykh dorog* [Transport-operational qualities of roads], Moscow, 207 p.
7. Aref'ev S. A. 2015, *Otsenka i obosnovanie ratsional'nykh dorozhnykh usloviy ekspluatatsii kar'ernyykh avtosamosvalov bol'shoy gruzopod'emnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Estimation and substantiation of rational road conditions of exploitation of large capacity mining dump trucks. Synopsis of dissertation of the candidate of technical sciences], Ekaterinburg, 20 p.
8. Atkinson T., Walton G. 1983, Design and Layout of haul road for surface mines. «Surface Mining and Quarrying. Pap. 2nd Int. Symp. Bristol, 4–6 Oct., 1983», London, pp. 369–381.
9. Williamson Owen S. 1987, Haul road design for off-highway mining equipment. World Mining Equip, vol. 12, no. 3, pp. 24–26.

Yuriy Ivanovich Lel',

lel49@mail.ru

Stepan Aleksandrovich Aref'ev,

arefevsa@yandex.ru

Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia

Andrey Valer'evich Glebov,

glebov@igduran.ru

Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences

Ekaterinburg, Russia

Davlyat Khurmatovich Il'bul'din,

ilbuldin@yna.alrosa-mir.ru

Research and project Institute of diamond mining industry «Yakutniiproalmaz»

Mirnyy, Russia