

УДК 622.684

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ
АВТОСАМОСВАЛОВ НА РАЗРЕЗАХ ПО КРИТЕРИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ЗАДНЕГО МОСТА****Паначев Иван Андреевич**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: pia.sm@yandex.ru,

Panachev Ivan Andreevich, Dr. Sc., Professor**Широколов Георгий Валентинович**,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: pobedonosec_47@mail.ru,

Shirokolobov Georgiy Valentinovich, C. Sc. (Engineering), Associate Professor**Кузнецов Илья Витальевич**,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: kuznetcov-ilia@yandex.ru,

Kuznetsov Ilya Vitalyevich, C. Sc. (Engineering), Associate Professor**Широколобова Анастасия Георгиевна**

кандидат филол. наук, доцент, e-mail: nastja_shirokolo@rambler.ru

Shirokolobova Anastasia Georgievna, C. Sc. (Philological Sciences), Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, ул. Весенняя, 28,
г. Кемерово, 650000, РФ.

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. *Карьерным автотранспортом с различной грузоподъемностью на разрезах Кузбасса транспортируется более 80 % вскрышных пород и угля. Универсальными показателями условий эксплуатации автотранспорта являются энергоемкость, определяющая затраты энергии на перевозку полезных ископаемых, и долговечность, характеризующая срок службы узла или элемента конструкции автомобиля. Постоянно изменяющиеся горно-геологические и горно-технологические параметры эксплуатации приводят к значительным затратам на дизтопливо и ремонт, к плановым и внеплановым простоям большегрузных автосамосвалов. В связи с изложенным, исследование, направленное на установление допустимых условий эксплуатации большегрузных автосамосвалов на разрезах, является актуальным. Научная работа выполнена посредством анализа оцифрованных данных систем GPS и обработки результатов экспериментальных исследований методами математической статистики и эконометрики. Основные результаты отражаются в следующем: установлено влияние размера среднего куска в забое на удельные затраты энергии; выявлена взаимосвязь математического ожидания амплитуды напряжений, возникающих в металлоконструкциях, и удельных затрат энергии при транспортировании горной массы; определены допустимые диаметры среднего куска взорванной горной массы для автосамосвалов различной грузоподъемности по критерию долговечности заднего моста автомобиля.*

Abstract. *Open pit mine dump trucks with different carrying capacity transport more than 80% of overburden rock and coal from open pit mines of Kuzbass. The universal indicators of vehicles operating conditions are: energy intensity which determines energy consumption for useful minerals transportation, and durability which characterizes operating life of a unit or an element of a vehicle. Constantly changing mining-geological and mining-technological operational parameters lead to significant costs for diesel fuel and repairing works, planned and unplanned downtime for heavy dump trucks. Therefore, the research, aimed to establish admissible operating conditions of heavy dump trucks operation in open pit mines, is of current concern. The scientific work is done by means of GPS systems digitized data analysis, and by means of processing the results of experimental tests by methods of mathematical statistics and econometrics. The main results are the following: the effect of average size pieces in the face at energy consumption per unit is estimated; the interconnection of mathematical expectation of stress amplitude occurring in metal structures and energy consumption per unit under rock mass transportation is determined; admissible average diameters pieces of blasted rock mass for dump trucks of different capacity according to operating life criterion of a back axle of a vehicle are defined.*

Ключевые слова: большегрузные автосамосвалы; эффективность; эксплуатация; удельные затраты энергии; уклон трассы; долговечность; допустимые условия эксплуатации.

актуальным является установление взаимосвязи между качеством подготовки взорванной горной массы к экскавации и производительностью экскаваторно-автомобильного комплекса.

Основным наиболее важным показателем качества подготовки пород к экскавации является грансостав взорванной горной массы, характеризуемый средним диаметром куска в развале. Степень влияния кусковатости существенно влияет на производительность автосамосвалов и снижается с увеличением погрузочно-транспортного оборудования. На рисунке 1 представлена зависимость сменной производительности карьерных экскаваторов от среднего диаметра куска в развале [5].

В результате мониторинга эксплуатации автосамосвалов ЗАО «БелАЗ» различной грузоподъемности на разрезах Кузбасса (Кедровский, Бачатский, Томусинский) с уклоном трассы от 10 % до 100 % установлено влияние среднего диаметра куска в развале на производительность карьерных автомобилей (рис. 2).

При использовании более мощных экскавато-

ров с емкостью ковша 20 м³ и более увеличение диаметра среднего куска до 0,7 м приводит к снижению производительности большегрузных автосамосвалов.

Грансостав взорванной горной массы, оцениваемый средним диаметром куска в развале, влияет не только на производительность горных машин, но и на затраты энергии при транспортировании.

За критерий оценки энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров принята величина удельных затрат энергии, которая определялась по формуле, предложенной профессором Ю.И. Лелем,

$$P_{\phi} = \frac{g}{i} \cdot k_{nep} \cdot k_{yT} \cdot k_d, \quad (1)$$

где P_{ϕ} – удельные затраты энергии на транспортирование 1 т горной массы на 1 м, г.у. т./т·м (грамм условного топлива/т·м); g – удельный расход дизтоплива автосамосвала, г/т·м; i – уклон трассы, %; k_{nep} – коэффициент переработки, учитывающий затраты энергии на получение дизтоплива из нефти ($k_{nep}=1,18 \div 1,20$); k_d – коэффициент, учиты-

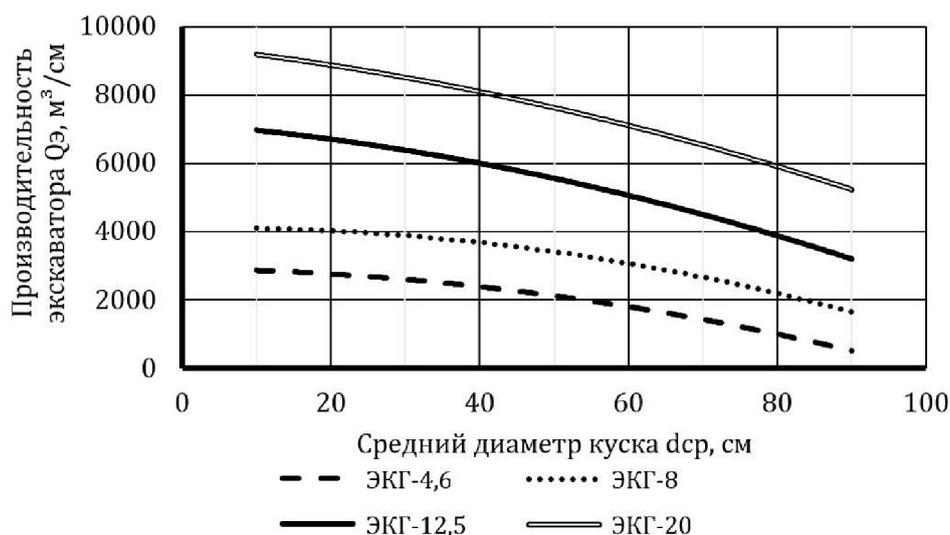


Рисунок 1 – Зависимость производительности экскаватора от среднего диаметра куска в забое

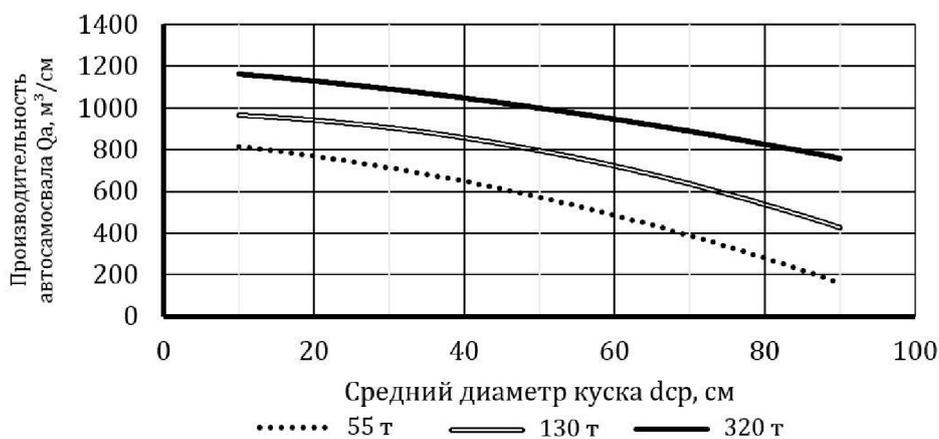


Рисунок 2 - Зависимость производительности автосамосвала от среднего диаметра куска в забое

вающий затраты энергии на добычу и транспортирование информативным показателем производительности

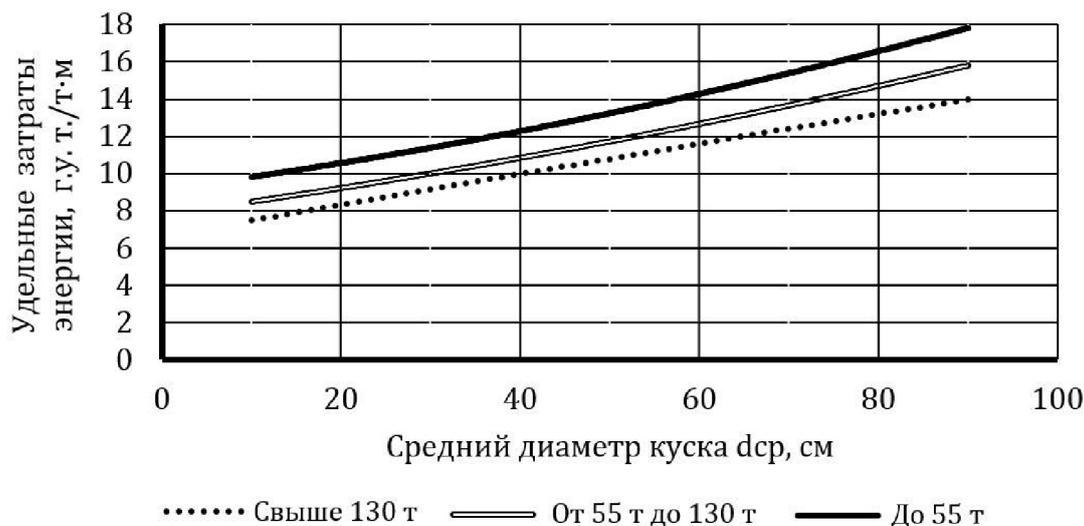


Рисунок 3 – Взаимосвязь удельных затрат энергии большегрузных автосамосвалов от среднего диаметра куска взорванной горной массы

рование топлива ($k_d=1,04\div 1,10$) [6]; k_{yT} – коэффициент, учитывающий разницу удельной теплоты сгорания дизельного и условного топлива ($k_{ym}=1,5$).

Удельный расход дизтоплива автосамосвала вычислялся из выражения

$$g = \frac{Q}{m \cdot l}, \quad (2)$$

где Q – расход дизтоплива, г; m – масса перевозимого груза, т; l – расстояние транспортирования, м.

Удельные затраты энергии являются мульт-

сти и технической готовности большегрузных автосамосвалов. По результатам анализа эксплуатации карьерного автотранспорта различной грузоподъемности на разрезах Кузбасса было установлено влияние среднего диаметра куска в развале на величину удельных затрат энергии при транспортировании горной массы (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что удельные затраты энергии возрастают при увеличении кусковатости в забое, характеризующейся средним диаметром куска, что приводит к значительному увеличению расхода топлива при транспортировании горной массы,

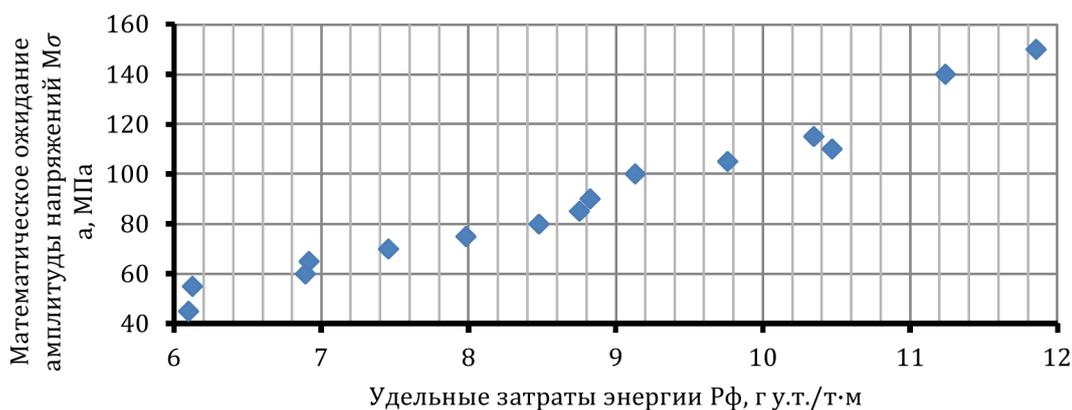


Рисунок 4 - Зависимость математического ожидания амплитуды напряжений от удельных затрат энергии

Таблица 3 – Результаты двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями

1. Гипотетическая разность средних	0
2. Число степеней свободы (df)	14
3. Значение критериальной статистики (t-статистика)	-10,28
4. Вероятность P (T<=t) одностороннее	$3,30 \cdot 10^{-8}$
5. Значение квантиля t критическое одностороннее	1,76
6. Вероятность P (T<=t) двухстороннее	$6,60 \cdot 10^{-8}$
7. Значение квантиля t критическое двухстороннее	2,15

снижению коэффициента наполнения кузова и, как следствие, производительности автосамосвала.

Увеличение среднего куска до 0,7-0,8 м не только снижает производительность экскаваторно-автомобильного комплекса, но и является следствием нестационарного распределения нагрузок и возрастания напряжений в основных элементах и узлах машины (кузов, рама, передний и задний мост), сокращению ресурса и срока эксплуатации. Для установления взаимосвязи напряжений и удельных затрат энергии при транспортировании горной массы с учетом изменения уклона трассы была выполнена оценка напряженного состояния заднего моста автосамосвала БелАЗ-75131 при изменении угла наклона трассы (20-70 %) и расстояний перевозки (2-5 км) путем регистрации амплитудно-частотного цикла на различных участках дороги с помощью тензостанции А17-Т8 и ноутбука AcerAspire 5630 [6].

Расчет удельных затрат энергии, характеризующих энергоемкость процесса транспортирования, производился с использованием средств GPS-навигации.

Results

Для получения эмпирической зависимости между удельными затратами энергии и математическим ожиданием амплитуды напряжений при разных условиях эксплуатации использовались методы аппроксимации.

Область распределения экспериментальных данных представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что напряжения, возникающие в металлоконструкциях заднего моста автосамосвала, достаточно хорошо коррелируют с удельными затратами энергии, затраченной на транспортирование горной массы.

Для проверки гипотезы о равенстве математических ожиданий двух независимых экспериментальных выборок был проведен двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями [7]. Результаты

Из табл. 3 видно, что величина вероятности случайного появления анализируемых выборок достаточно мала и составляет $P(T \leq t) = 6,60 \cdot 10^{-8}$, что меньше, чем уровень значимости, равный 0,05. Это означает, что различия между выборками не могут быть случайными.

Для исследования влияния на измеряемую случайную величину (амплитуду напряжений) независимой величины (удельных затрат энергии) был выполнен однофакторный дисперсионный анализ. Результаты анализа приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа

1. Межгрупповая сумма квадратов (SS)	49173,5
2. Число степеней свободы между группами (df)	1
3. Межгрупповая дисперсия (MS)	49173,5
4. Значение вероятности (P- значение)	$5,2 \cdot 10^{-11}$
5. Значение критериальной статистики (F)	105,8
6. F-критическое	4,2

Из анализа табл.4 следует, что влияние исследуемой переменной можно считать доказанным, т.к. P-значение меньше, чем уровень значимости, равный 0,05.

Результаты анализа взаимосвязи математического ожидания амплитуды напряжений, удельных затрат энергии и постоянный мониторинг параметров нагружения большегрузных автомобилей способствуют принятию оперативных решений по обеспечению работоспособности автосамосвала на длительный период его эксплуатации.

Результаты подбора математической модели для описания экспериментальной зависимости $M_{\sigma_a} = f(P_{\phi})$ представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты подбора математической модели для описания экспериментальной зависимости

Вид функции	Функциональная зависимость	Коэффициент детерминации (R^2)
Линейный	$M_{\sigma_a} = -54,72 + 16,62P_{\phi}$	0,969
Параболический	$M_{\sigma_a} = 1,13P_{\phi}^2 - 3,25P_{\phi} + 29,45$	0,982

Таблица 6 - Обобщенные уравнения зависимости математического ожидания амплитуды напряжений от величины уклона трассы для каждой группы

Грузоподъемность автосамосвала, т	Уравнение зависимости математического ожидания амплитуды напряжений (M_{σ_a} , МПа) от уклона трассы (i , %)
До 55	$M_{\sigma_a} = 0,024i^2 - 1,07i + 39,1$
55 - 130	$M_{\sigma_a} = 0,012i^2 - 0,5i + 33,9$
Свыше 130	$M_{\sigma_a} = 0,006i^2 - 0,23i + 32,7$

расчета приведены в табл. 3.

По результатам анализа полученных уравне-

ний установлено, что линейной зависимостью между амплитудой напряжений и удельными затратами энергии нельзя пользоваться при расчетах взаимосвязи напряжений и угла наклона трассы на подъем, так как в диапазоне уклона от 10 до 30 % в металлоконструкциях возникают отрицательные напряжения, в следствие чего теряется физический смысл. Следовательно, для дальнейших расчетов принимается параболическая зависимость

Для описания экспериментальной зависимости между напряжениями и величиной угла наклона трассы выбиралась модель взаимосвязи математического ожидания амплитуды напряжений и удельных затрат энергии, а также применялась полученная ранее формула [8]

$$F(i, q) = i^2(0,007q^2 - 0,003q + 0,0006) + i(1,144q^2 - 0,674q + 0,094) - 39,374q^2 + 22,032q + 0,167.$$

Закон распределения математического ожидания амплитуды напряжений от величины уклона трассы по каждому самосвалу является параболическим. Коэффициент детерминации зависимостей варьируется от 0,98 до 0,99, что позволяет получить обобщенные уравнения для автосамосвалов определенной грузоподъемности. Коэффициенты уравнения является среднее значение зависимостей соответствующей группы автосамо-

свалов. Результаты анализа представлены в табл. 6.

Полученные зависимости математического ожидания амплитуды напряжений в металлоконструкциях заднего моста от угла наклона трассы позволяют оперативно и рационально выбрать группы автосамосвалов для их эксплуатации в сложных горно-технологических условиях.

Наиболее значимым горно-технологическим фактором, влияющим на показатели работы автосамосвалов, является угол наклона трассы. По результатам выполненного анализа условий эксплуатации карьерных автомобилей построена совместная диаграмма зависимостей математического ожидания амплитуды напряжений ($M_{\sigma a}$) и удельных затрат энергии от уклона трассы для автосамосвалов БелАЗ трех основных групп по грузоподъемности (до 55 т, 55-130 т и более 130 т) (рис. 5).

Коэффициент запаса прочности (n) для большинства металлоконструкций принимается в интервале 1,2-2. При принятом $n=2$ горизонтальная черная (допускаемая) линия ED на диаграмме соответствует допускаемому напряжению, равному 120 МПа. Абсцисса точек пересечения этой линии с кривыми графика 1, 2, 3 (А, В, С) характеризуют уклоны трассы для каждого из названных типов

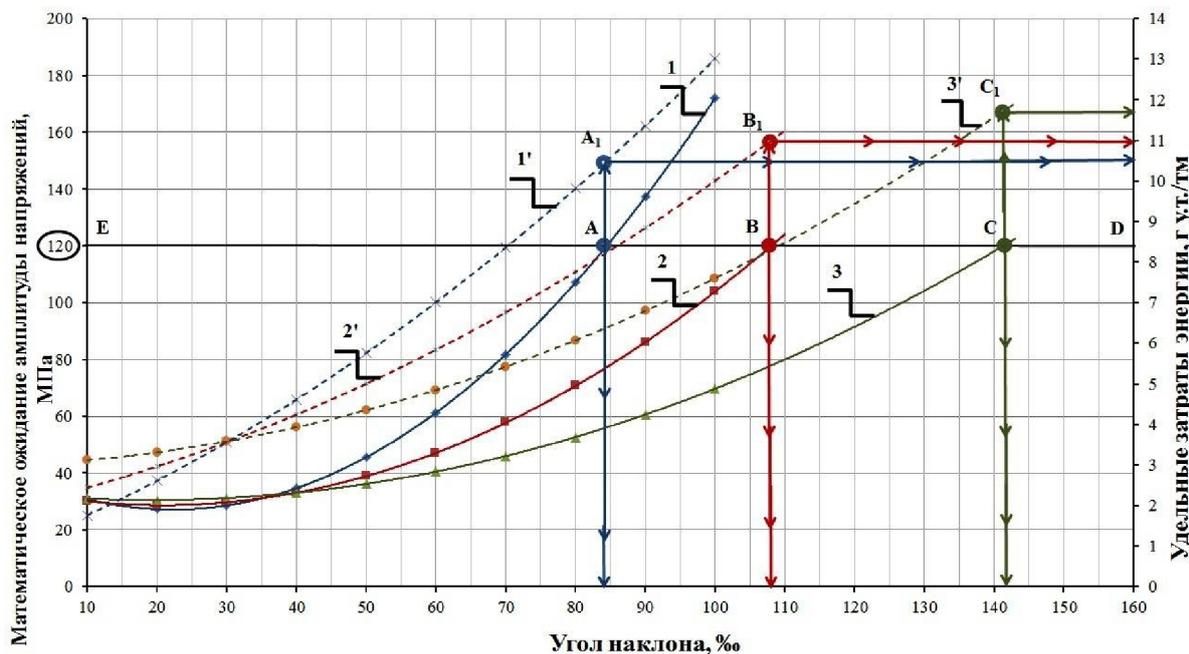


Рисунок 5 - Совместная диаграмма зависимостей математического ожидания амплитуды напряжений (1, 2, 3) и удельных затрат энергии (1', 2', 3') от уклона трассы для автосамосвалов БелАЗ с грузоподъемностью менее 55 т, 55-130 т и свыше 130 т соответственно

Таблица 7 – Допускаемые параметры эксплуатации большегрузных автосамосвалов

Грузоподъемность, т	Удельные затраты энергии, г.у.т./т·м	Уклон трассы на подъем, ‰	Средний диаметр куска в развале, см
менее 55	10,5	85	18
от 55 до 130	11	108	43
свыше 130	11,9	149	62

автосамосвалов, при превышении которых возникающие в металлоконструкциях подвески напряжения приводят к росту трещин, сокращению долговечности и ресурса элементов балки заднего моста. Для вычисленных по диаграмме значений уклонов точки A_1 , B_1 , C_1 соответствуют значениям удельных затрат энергии.

Conclusions

По результатам анализа рисунков 3 и 5 были установлены допускаемые значения параметров эксплуатации большегрузных автосамосвалов по

критерию долговечности металлоконструкций заднего моста, при превышении которых существенно снижается эффективность, производительность и срок службы автомобилей (табл. 7).

При взрывной подготовке пород к экскавации рекомендуется учитывать допускаемые параметры эксплуатации большегрузных автосамосвалов, что способствует рациональному распределению карьерного автопарка с учетом долговечности металлоконструкций заднего моста автосамосвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производственное объединение БелАЗ [электронный ресурс] URL: <http://belaz.minsk.by/>
2. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
3. Лель Ю.И. Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы. /Ю. И. Лель, Г. А. Ворошилов. //Горная техника – 2007: Каталог - справочник. – С.-Петербург: Изд-во ООО «Славутич», 2007. – С. 102-108.
4. Паначев И.А. Анализ влияния угла наклона трассы на энергоемкость транспортирования горной массы большегрузными автосамосвалами [Текст]. / И.А. Паначев, И.В. Кузнецов. // Вестник Кузбасского государственного университета. – 2013. - №6. – С. 67-70.
5. Репин Н.Я. Временная методика расчета параметров взрывной подготовки пород на угольных разрезах. / Репин Н.Я., Бирюков А.В., Паначев И.А., Ташкинов А.С. Москва, 1976. - .49 с.
6. Паначев И.А. К методике сохранения ресурса металлоконструкций заднего моста подвески большегрузных автосамосвалов / И.А. Паначев, И.В. Кузнецов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2015. – №2. – С. 82-90.
7. Паначев И.А. Исследование напряженно-деформированного состояния балки заднего моста автосамосвала БелАЗ-75131 и расчет количества циклов нагружения до отказа / И.А. Паначев, Г.В. Широколов, И.В. Кузнецов // Вестник Кузбасского государственного университета – 2015. – №1. – С. 29-33.
8. Паначев И.А. Предельно-допускаемые параметры условий эксплуатации большегрузных автосамосвалов по критерию эффективности работы двигателя / И.А. Паначев, И.В. Кузнецов // Вестник Кузбасского государственного университета – 2015. – №1. – С. 34-37.
9. Ворошилов Г.А. Особенности эксплуатации горнотранспортного оборудования нагорно-глубинных карьеров. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2007. № 7. – С. 3-8.
10. Зырянов И.В. Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации. /Зырянов И.В./ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.06 «Горные машины». Санкт-Петербург 2006 – 378 с.
11. Карьерные самосвалы БелАЗ-75131, БелАЗ-75306. Руководство по эксплуатации. – М.: Автоэкспорт, 1994.
12. Андлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю.П. Андлер, И.В. Маркова, Ю.В. Грановский // М.: Наука. 280 с.
13. Кулешов А.А. Проектирование и эксплуатация карьерного автотранспорта. // Справочник: Часть II. – СПб. – 1995. – 203 с.
14. Вуйич С. Оптимальное динамическое управление сроком эксплуатации горных машин. Ч. 1. Модели с интервалом неограниченной продолжительности. / Вуйич С., Зайич Б., Милянвич И., Петровски А. // ФТПРПИ. – 2010. – № 4.
15. Манаков А.Л. Создание системы мониторинга технического состояния транспортных и технологических машин / Манаков А.Л., Игумнов А.А., Коларж С.А. // ФТПРПИ. – 2013. – № 4.

REFERENCES

1. Production Association BelAZ [electronic resource] URL: <http://belaz.minsk.by/>
2. Tangaev I.A. The energy intensity of extraction and processing of useful minerals. – М.: Nedra, 1986. – 231 p.
3. Lel Yu.I. The energy intensity of transport systems of quarries: assessment and prospects. /Yu. I. Lel, G.A. Voroshilov. // Mining Machinery – 2007: Reference-guide. - St. Petersburg: Publishing House Ltd.

"Slavutich", 2007. – P. 102-108.

4. Panachev I.A., Kuznetsov I.V. Analysis of impact of route inclination on the energy consumption of mine rock transportation by heavy dump trucks. *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo univeristeta [Vestnik of Kuzbass State Technical University]* 2013. No 6. P. 67-70.

5. Repin N.Ya, Biryukov A.V., Panachev I.A., Tashkinov A.S. Temporary method of calculating the parameters of explosive rock in the open pit mines.. Moscow, 1976. 49 p.

6. Panachev I.A. Management procedure for life cycle of rear axle metalworks of heavy haulers / I.A. Panachev, I.V. Kuznetsov // *Journal of Mining Science* – March 2015, Volume 51, Issue 2, pp 267-273.

7. Panachev I.A. Investigation of stress-strain state of the back axle beam of dump truck BelAZ-75131 and calculation of the number of load cycles to failure / I.A. Panachev, G.V. Shirokolobov, I.V. Kuznetsov // *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo univeristeta [Vestnik of Kuzbass State Technical University]* – 2015. – №1. – P. 29-33.

8. Panachev I.A. Maximum admissible parameters of heavy dump trucks operating conditions according to the criterion of efficiency of the engine operation / I.A. Panachev, I.V. Kuznetsov // *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo univeristeta [Vestnik of Kuzbass State Technical University]* – 2015. – №1. – P. 34-37.

9. Voroshilov G.A. The peculiarities of mining-transport equipment operation in open-pit and mountaintop removal mining pits. // *Proceedings of the higher educational institutions. Mining Journal.* – 2007. № 7. – P. 3-8.

10. Zyryanov I.V. Efficiency improving of open pit mines motor transport systems under extreme operating conditions. / Zyryanov I.V. / The thesis of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.05.06 "Mining machines". St. Petersburg. – 2006. – 378 p.

11. The dump trucks BelAZ-75131, BelAZ-75306. Operating Manual. – M.: Auto export, 1994.

12. Andler Yu.P. The experiment planning in the search for optimal conditions. / Yu.P. Andler, I.V. Markova, Yu.V. Granovsky // M.: Nauka. –280 p.

13. Kuleshov A.A. Design and operation of open pit mine vehicles. // Reference book: Part II. – SPb. – 1995. – 203 p.

14. Manakov A.L. Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines / Manakov A.L. Igumnov A.A., Kolarge S.A. // *Journal of Mining Science*, - July 2013, Volume 49, Issue 4, pp 630-636.

Поступило в редакцию 26.11.2016 г.
Received 26 November 2016