

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.684

### К МЕТОДИКЕ СОХРАНЕНИЯ РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЗАДНЕГО МОСТА ПОДВЕСКИ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

**И. А. Паначев, И. В. Кузнецов**

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,  
E-mail: kuznetcov-ilia@yandex.ru,  
ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия*

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций ходовой части большегрузных автосамосвалов, установлен закон распределения математического ожидания амплитуды напряжений. Определена полиномиальная зависимость между удельными затратами энергии и математическим ожиданием амплитуды напряжений. Установлены предельно-допустимые условия эксплуатации большегрузных автосамосвалов по критериям энергоемкости процесса транспортирования взорванной горной массы и долговечности их металлоконструкций заднего моста.

*Большегрузные автосамосвалы, энергоемкость, ресурс, уклон трассы, напряженно-деформированное состояние*

Разработка месторождений полезных ископаемых Кузбасса открытым способом представляет собой совокупность трудоемких, энергоемких и дорогостоящих технологических процессов добычи, из которых наиболее энергозатратным является транспортирование горной массы. Карьерным автотранспортом с различной грузоподъемностью на разрезах Кузбасса перевозится более 80 % вскрышных пород и угля. Универсальные показатели условий эксплуатации автотранспорта — энергоемкость, определяющая затраты энергии на перевозку полезных ископаемых, и долговечность, характеризующая срок службы узла или элемента конструкции автомобиля [1]. С увеличением глубины разреза постоянно меняющиеся горно-геологические и горно-технологические параметры эксплуатации (увеличение расстояния транспортирования и уклона трассы на подъем) приводят к значительным плановым и внеплановым простоям большегрузных автосамосвалов и увеличению затрат на дизельное топливо и ремонт [2].

Анализ общего временного фонда простоев карьерного автотранспорта на разрезах Кузбасса показал, что доля простоев из-за отказов их металлоконструкций составляет 20–25 %. Количество отказов узлов автосамосвала зависит от возникновения и развития в них трещин, которые образуются в элементах рамы, кузова и подвески карьерного автомобиля [3]. Исследование напряженного состояния металлоконструкций большегрузных автосамосвалов во время их эксплуатации в условиях разрабатываемого месторождения представляет собой трудоемкий процесс, характеризующийся существенными затратами времени и средств на его реализацию [4].

В связи с изложенным исследованием, направленные на разработку методики оценки ресурса металлоконструкций подвески автосамосвалов посредством комплексного мониторинга энергоемкости процесса транспортирования горной массы на разрезах Кузбасса, являются актуальными. Первоначально необходимо проанализировать напряжения, возникающие в элементах металлоконструкции подвески автосамосвала, а затем определить их взаимосвязь с удельными затратами энергии.

При движении автосамосвала по забойным и технологическим дорогам в металлоконструкциях под действием переменных во времени нагрузок возникают напряжения, значения которых часто превышает предел выносливости [5]. То есть образуются макротрещины, которые со временем прогрессируют и приводят к полному разрушению [6].

Анализируя работу автосамосвала БелАЗ-75131 при транспортировании горной массы от забоя до отвала и обратно в забой в течение одного месяца, установлено количество циклов за время эксплуатации. Расстояние перевозки при этом варьировало от 1.5 до 3 км, среднее количество циклов за один рабочий день составляло 51. Для оценки интенсивности суммарных деформаций и напряжений в металлоконструкциях за один цикл эксплуатации использовались осциллограммы из 550 точек (рис. 1), полученные с помощью экспериментально-вычислительного центра, в состав которого входят ноутбук, тензостанция А-17-18, тензорезисторы, экранированный кабель, аккумуляторная батарея, балансировочная коробочка, электромагнитный экран [7]. Тензорезисторы устанавливались в зонах повышенной концентрации напряжений, которые определялись посредством неразрушающего контроля и визуальной диагностики.

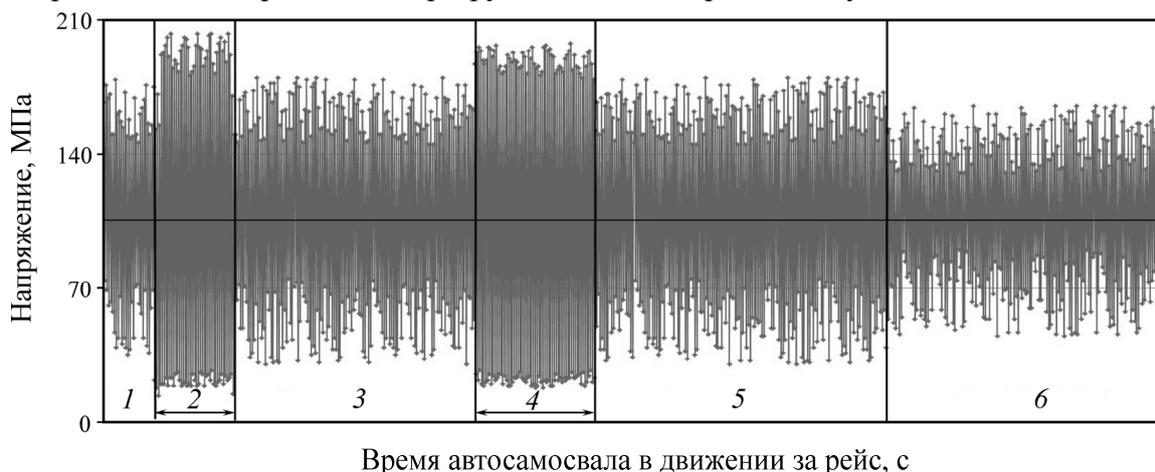


Рис. 1. Диаграмма нагружения металлоконструкций балки заднего моста автосамосвала БелАЗ-75131 при движении от пункта загрузки до пункта разгрузки: 1 — забойная дорога; 2, 4 — уклон трассы на подъем с поворотом; 3, 5 — участок дороги с уклоном на подъем; 6 — участок технологической дороги

Из рис. 1 видно, что участки с наибольшими значениями напряжений характеризуют движение груженого автосамосвала на уклоне с подъемом трассы и поворотом. При прохождении первого поворота от пункта загрузки автосамосвал преодолевает уклон, в 1.5–2 раза больший, чем при последующем повороте, что является причиной возникновения высоких рабочих напряжений в этот момент времени. Значения напряжений, возникающих в металлоконструкциях балки заднего моста при движении груженого автосамосвала по прямым забойным и технологическим дорогам, практически не различаются [8].

Статистическая обработка результатов наблюдений за один месяц работы по напряжениям выполнялась с использованием программного продукта STATISTICA 10.

Отфильтрованная осциллограмма разбивалась на блоки. За блок принимался цикл эксплуатации, включающий погрузку автосамосвала, транспортирование горной массы до места разгрузки, разгрузку автосамосвала, движение до места погрузки, ожидание погрузки. При фильтрации осциллограммы учитывалось то, что при ожидании разгрузки и погрузки и в момент разгрузки напряжения в элементах заднего моста автосамосвала несущественно влияют на его ресурс. Число амплитуд в блоке всегда является репрезентативным, так как замеры напряжений осуществлялись в различных условиях движения автосамосвала. Далее проводился подсчет циклов, имеющих определенную амплитуду (с шагом 15–20 МПа) в пределах заданного интервала напряжений. Все замеренные амплитуды разбивались на группы с определенным интервалом. По полученным результатам строилась ступенчатая диаграмма и определялось распределение, которому соответствует спектр гистограммы. Спектр является основной характеристикой нестационарных циклов (рис. 2). Далее по гистограмме для каждого блока выбирались значения математического ожидания амплитуд напряжений, которые соответствовали данному циклу эксплуатации.

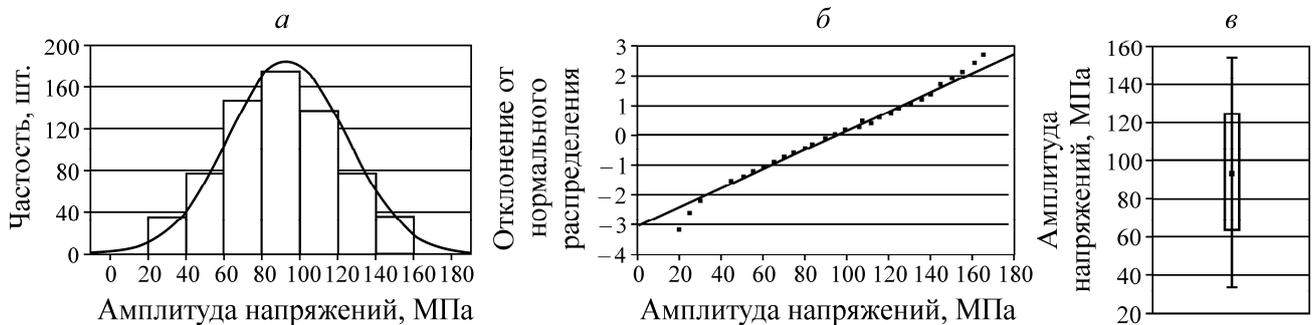


Рис. 2. Суммарный статистический анализ амплитуд напряжений в программе STATISTICA 10: *а* — ступенчатая гистограмма; *б* — нормальный вероятностный график; *в* — диаграмма размаха

На рис. 2*а* представлена ступенчатая гистограмма нормального распределения амплитуд напряжений. При проверке их распределения показатель теста Колмогорова–Смирнова составил  $p < 0.1$ , что доказывает соответствие нормальности распределения. На нормальном вероятностном графике (рис. 2*б*) отображено малое количество выбросов, которыми можно пренебречь. Это свидетельствует о том, что распределение амплитуд напряжений максимально близко к нормальному закону. Отсутствие выбросов и асимметрии на диаграмме размаха (рис. 2*в*) также подтверждает максимальное соответствие нормальному закону распределения.

Наибольший интерес представляют коэффициенты асимметрии (Skewness) и эксцесса (Kurtosis). Коэффициент асимметрии составил  $-0.02$ , что свидетельствует о левостороннем смещении. Однако числовое значение коэффициента меньше  $0.25$ , следовательно, асимметрия незначительна, а ее наличие обусловлено влиянием случайных обстоятельств. Коэффициент эксцесса составил  $-0.62$ , что доказывает отсутствие “островершинности” распределения.

По результатам статистической обработки амплитуд напряжений, полученных экспериментально при исследовании напряженного и деформированного состояния металлоконструкций заднего моста большегрузных автосамосвалов при транспортировании взорванной горной массы от пункта загрузки до пункта разгрузки, построена диаграмма циклов нагружений (рис. 3).

На диаграмме циклы нагружения обозначены следующим образом: 0–1 — погрузка автосамосвала; 1–2 — движение автосамосвала по забойной дороге; 2–5 — движение автосамосвала на подъем; 5–6 — движение автосамосвала по технологической дороге; 6–7 — разгрузка автосамосвала. Из диаграммы видно, что интенсивный рост напряжений в металлоконструкциях заднего моста автосамосвала происходит на участках при движении на подъем.

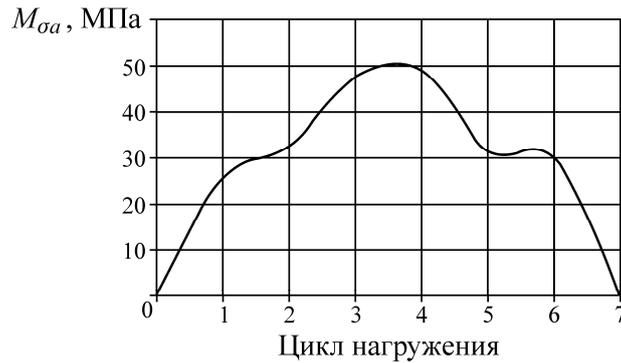


Рис. 3. Диаграмма распределения математического ожидания амплитуды напряжений по циклам нагружения при движении автосамосвала БелАЗ-75131 от забоя до отвала

За критерий оценки энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров принята величина удельных затрат энергии (УЗЭ) на подъем 1 т горной массы из карьера, которая определялась по формуле, предложенной проф. Ю. И. Лелем [9]:

$$P_{\phi} = \frac{g}{i} k_{\text{пер}} k_{\text{у.т.}} k_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $P_{\phi}$  — удельные затраты энергии на подъем 1 т горной массы на 1 м, г у.т./тм;  $g$  — удельный расход дизтоплива автосамосвалами, г/тм;  $i$  — уклон трассы, ‰;  $k_{\text{пер}} = 1.18 - 1.20$  — коэффициент переработки, учитывающий затраты энергии на получение дизельного топлива из нефти;  $k_{\text{д}} = 1.04 - 1.10$  — коэффициент, учитывающий затраты энергии на добычу и транспортирование топлива;  $k_{\text{у.т.}} = 1.5$  — коэффициент, учитывающий разницу удельной теплоты сгорания дизельного и условного топлива.

Для расчета удельных затрат энергии, характеризующих энергоемкость процесса транспортирования, использовались средства GPS-навигации [10]. Данные для расчета эмпирической зависимости, необходимой для оперативного анализа напряженного состояния металлоконструкций подвески заднего моста автосамосвала, между удельными затратами энергии и математическим ожиданием амплитуды напряжений (рис. 4) представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Экспериментальные значения удельных затрат энергии и математических ожиданий амплитуд напряжений

$P_{\phi}$ , г у.т./тм	6.097	6.124	6.894	6.918	7.458	7.982	8.478	8.753	8.826	9.134	9.762	10.469	10.347	11.24	11.85
$M_{\sigma a}$ , МПа	45	55	60	65	70	75	80	85	90	100	105	110	115	140	150

Из рис. 4 видно, что напряжения, возникающие в металлоконструкциях заднего моста автосамосвала, достаточно хорошо коррелируют с удельными затратами энергии, затраченными на транспортирование горной массы. Коэффициент корреляции составил 0.982 при допуске 0.95.

Ресурс металлоконструкций характеризуется долговечностью узлов, элементов и деталей данной конструкции [11]. За критерий долговечности принимается количество циклов нагружения до отказа, которое зависит от напряжений, возникающих в металлоконструкциях. С помощью количества циклов нагружения можно определить наработку на отказ автосамосвала, т. е. от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа [12].

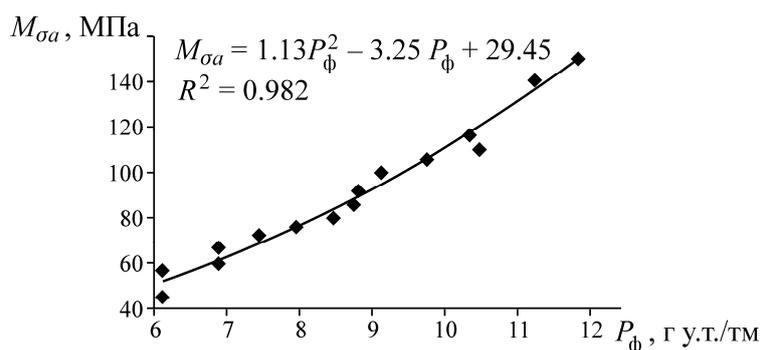


Рис. 4. Эмпирическая зависимость математического ожидания амплитуды напряжений от удельных затрат энергии

Заводом-изготовителем устанавливается наработка на отказ  $T$  автосамосвала: для БелАЗ-75131 она составляет 30 000 моточасов до капитального ремонта, затем еще 30 000 моточасов до списания самосвала. На сегодняшний день карьерный автотранспорт работает в более сложных горно-геологических и горно-технологических условиях, которые не соответствуют рекомендованным заводом.

Для оценки наработки на отказ использовались данные GPS-мониторинга показателей эксплуатации автосамосвала БелАЗ-75131 при транспортировании горной массы на разрезах Кузбасса (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета наработки на отказ автосамосвала БелАЗ-75131

$P_{\phi}$ , г у.т./тм	$M_{\sigma\sigma}$ , МПа	$N_p$ , цикл	$N$ , цикл	$T$ , моточас
2.6	28.7	544	351776142.2	7759767.843
3.2	30.6	558	263253510.9	5661365.826
2.6	28.7	573	353293270.4	7398811.946
3.2	30.7	543	259225017.6	5728729.670
3.4	31.6	537	225746964.4	5044624.904
2.8	29.1	560	330529339.2	7082771.554
3.6	32.4	555	202264959.9	4373296.429
5.8	48.6	562	30884352.61	659452.3689
3.9	33.9	584	163788282.8	3365512.660
3.7	32.7	568	193382586.8	4085547.608
3.6	32.6	544	196486325.6	4334257.182
3.9	34.4	533	153476579.7	3455382.657
5.0	41.7	541	62595796.73	1388446.508
3.8	33.5	531	172734281.7	3903599.586
4.3	36.1	549	122226242.7	2671611.863
6.3	54.2	553	18636251.81	404403.2943
4.3	36.7	566	112939011.4	2394466.673
5.0	41.7	572	62036765.81	1301470.611
4.8	39.9	547	76954201.58	1688209.176
5.0	41.7	559	61958522.0	1330057.717
5.3	43.8	551	49597563.41	1080164.720
4.6	38.3	549	92435838.86	2020455.494

Результаты анализа изменения наработки на отказ автосамосвала при увеличении удельных затрат энергии показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при превышении значений удельных затрат энергии, равных 6 г у.т./тм, происходит резкое сокращение наработки на отказ автосамосвала. С помощью полученной зависимости рассчитаны предельные значения удельных затрат энергии, при которых гарантируемая наработка еще сохраняется (8.6 г у.т./тм) и сокращается до одного полного дня эксплуатации (17.8 г у.т./тм).

Наработка на отказ является основным показателем надежности. Надежность работы автосамосвала определяет его срок службы. Установлено, что с увеличением удельных затрат энергии срок службы автосамосвала сокращается (рис. 6).

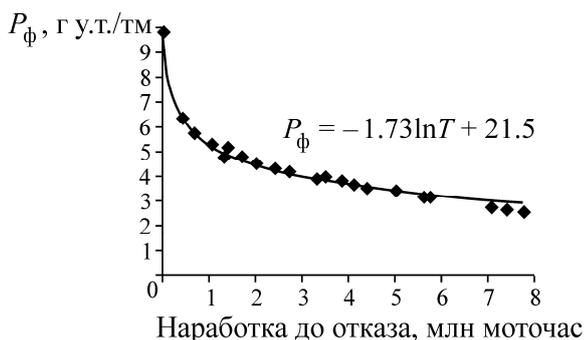


Рис. 5. Взаимосвязь удельных затрат энергии и наработки на отказ автосамосвала БелАЗ-75131

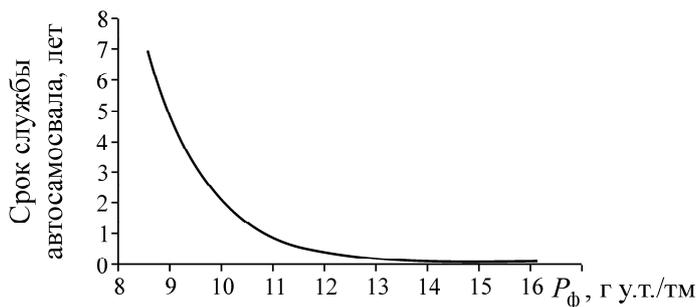


Рис. 6. Зависимость срока службы автосамосвала от удельных затрат энергии

Управление ресурсом металлоконструкций заднего моста подвески представляет собой анализ допустимых и не допустимых областей напряжений на определенных углах наклона, характеризуя долговечность и энергоемкость большегрузных автосамосвалов.

На рис. 7 показана диаграмма определения допустимых условий эксплуатации автосамосвалов на разрезах Кузбасса.

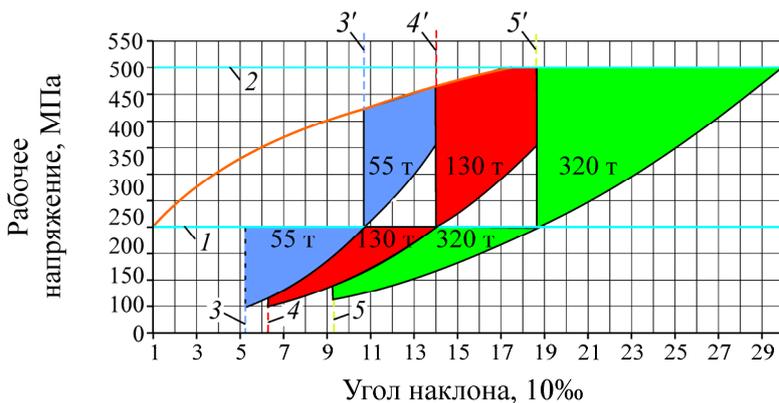


Рис. 7. Диаграмма определения допустимых условий эксплуатации автосамосвалов различной грузоподъемности

Каждой группе автосамосвалов соответствуют две области определенного цвета: синий цвет — БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55 т, красный цвет — БелАЗ-7131 грузоподъемностью 130 т, зеленый цвет — БелАЗ-75600 грузоподъемностью 320 т. Оранжевая линия — отношение длины элемента исследуемой металлоконструкции подвески к критической длине трещины

при различных напряжениях. Голубым цветом обозначены две границы: нижняя 1 — предел выносливости, верхняя 2 — предел прочности. Три области диаграммы, ниже предела выносливости, ограничены вертикальными прямыми линиями (3, 4, 5), соответствующими углам наклона при номинальном расходе топлива. Это означает, что в интервале углов наклона нижних областей происходит увеличение расхода топлива, а следовательно, сокращение ресурса двигателя, но еще не началось образование и рост трещин в металлоконструкциях. Вертикальные границы верхних областей диаграммы (3', 4', 5') соответствуют росту пластических деформаций. В случае возникновения на интервалах углов наклона трассы напряжений, соответствующих области на диаграмме, происходит трещинообразование и рост трещин в металлоконструкциях заднего моста подвески.

Для учета влияния основных показателей эксплуатации автосамосвалов (удельные затраты энергии, напряжения в металлоконструкциях подвески, расход топлива) построена гистограмма характерных углов наклона трассы для автосамосвалов различной грузоподъемности (рис. 8), где отображены характерные углы наклона трассы для следующих показателей эксплуатации:  $Q_{\text{ном}}$  — номинальное значение расхода дизельного топлива, при котором двигатель работает на номинальной мощности (не сокращается ресурс двигателя, заданный заводом-изготовителем);  $P_{\text{ф.ном}}$  — номинальное значение удельных затрат энергии, при котором сохраняется наработка на отказ, указанная в техпаспорте автосамосвала;  $\sigma_{\text{ном}}$  — номинальное значение напряжений в металлоконструкциях подвески, равное пределу выносливости, при котором еще не происходит образование и рост трещин;  $P_{\text{ф.пред}}$  — предельное значение удельных затрат, при котором наработка на отказ составляет 24 моточаса;  $\sigma_{\text{пред}}$  — предельное значение напряжений в металлоконструкциях подвески, при котором напряжения достигают предела прочности.

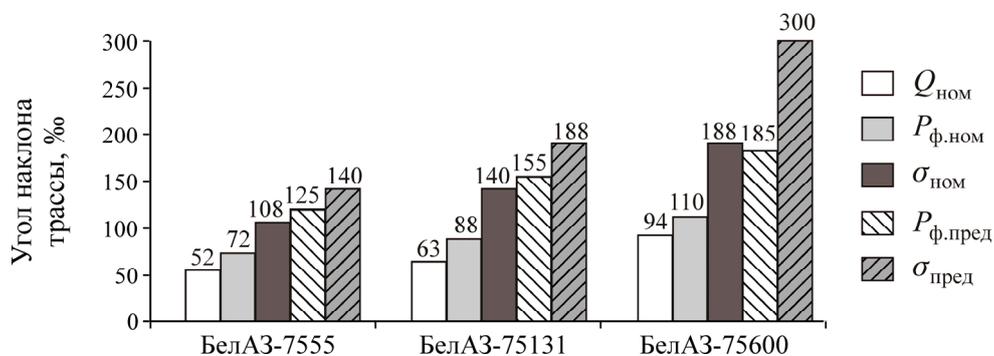


Рис. 8. Гистограмма характерных углов наклона трассы

Более подробный анализ характерных углов наклона трассы представлен в табл. 3, с помощью которого установлены границы эксплуатации большегрузных автосамосвалов.

С целью уменьшения простоев и увеличения долговечности металлоконструкций заднего моста подвески, а также повышения эффективности использования большегрузных автосамосвалов путем постоянного мониторинга горно-технологических параметров и условий эксплуатации посредством GPS-навигации разработан алгоритм по мониторингу ресурса металлоконструкций большегрузных автосамосвалов (рис. 9).

Превышение грузоподъемности, климатические условия эксплуатации, превышение скоростного режима оказывают как совместное влияние на энергоемкость транспортирования и долговечность металлоконструкций, так и отдельное на каждый из этих процессов. Остановка экс-

платации автосамосвала осуществляется в случае превышения номинального значения математического ожидания амплитуды напряжений практически до предела прочности. В этом случае проводятся либо внеплановые ремонтные работы, либо работы по замене детали.

ТАБЛИЦА 3. Подробный анализ характерных углов наклона трассы

Интервал угла наклона, %			Комментарий
БелАЗ-7555 (55 т)	БелАЗ-75131 (130 т)	БелАЗ-75600 (320 т)	
До 52	До 63	До 93	Эксплуатация автосамосвала не ведет к сокращению ресурса двигателя, не происходит трещинообразования в металлоконструкциях подвески, расход топлива в пределах номинального
52–72	63–88	93–110	Мощность автосамосвала выше номинальной, но еще не приводит к резкому сокращению ресурса двигателя. Напряжения не приводят к трещинообразованию. Нарботка на отказ соответствует гарантируемой заводом
72–108	88–140	110–188	Происходит рост трещин и их образование. Ресурс двигателя и наработка на отказ автосамосвала сокращаются примерно на 15–20 %, увеличивается расход топлива
108–125	140–155	188–185	Нарботка на отказ двигателя сокращается до 24 моточасов, ресурс металлоконструкций сокращается на 15–25 %
125–140	155–188	185–300	Для работы на таких уклонах необходим более мощный и надежный двигатель, ресурс металлоконструкций сокращается до 24 моточасов



Рис. 9. Алгоритм по мониторингу ресурса металлоконструкций заднего моста подвески большегрузных автосамосвалов

**ВЫВОДЫ**

В результате использования алгоритма, разработанного на основе контролирования энергоемкости процесса транспортирования горной массы большегрузными автосамосвалами, частично предотвращаются внеплановые простои, а следовательно, повышается ресурс металлоконструкций балки заднего моста на 15–25 %.

Обеспечение эффективной и безотказной работы автосамосвалов, увеличение ресурса металлоконструкций и срока службы системы, снижение энергозатрат на транспортирование горной массы достигается посредством эксплуатации карьерного транспорта на углах наклона, не превышающих 108, 140 и 185 % для типоразмеров с грузоподъемностью до 55 т, от 55 до 130 т и свыше 130 т соответственно.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Хохряков В. С., Лель Ю. И., Ворошилов Г. А., Николаев Н. А.** К оценке энергетической эффективности транспортных систем карьеров в условиях рыночной экономики: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. “Проблемы карьерного транспорта” (20-23 сентября 2005 г.). — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2005.
2. **Зырянов И. В.** Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2006.
3. **Паначев И. А., Кузнецов И. В.** Обоснование нагруженности элементов металлоконструкций большегрузных автосамосвалов при транспортировании горной массы на разрезах Кузбасса: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. “Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности” (8–11 октября 2013 г.). — Кемерово, 2013.
4. **Болотин В. В.** Прогноз ресурса машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1984.
5. **Ворошилов Г. А.** Особенности эксплуатации горнотранспортного оборудования нагорно-глубинных карьеров // Изв. вузов. Горн. журн. — 2007. — № 7.
6. **Вуйич С., Зайич Б., Милянвич И., Петровски А.** Оптимальное динамическое управление сроком эксплуатации горных машин. Ч. 1. Модели с интервалом неограниченной продолжительности // ФТПРПИ. — 2010. — № 4.
7. **Паначев И. А., Черезов А. А.** К методике экспериментальных исследований нагруженности элементов конструкций экскаваторов-мехлопат // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 1.
8. **Васильев М. В., Смирнов В. П., Кулешов А. А.** Эксплуатация карьерного автотранспорта. — М.: Недра, 1979.
9. **Паначев И. А., Кузнецов И. В.** Оценка энергоемкости транспортирования горной массы большегрузными автосамосвалами на разрезах Кузбасса // Вестн. КузГТУ. — 2011. — № 4.
10. **Паначев И. А., Кузнецов И. В.** Анализ влияния угла наклона трассы на энергоемкость транспортирования горной массы большегрузными автосамосвалами // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 6.
11. **Хубаев Б. Г., Твертнев М. В.** Особенности конструкции и перспективы развития карьерных самосвалов грузоподъемностью свыше 30 т: обзорная информация. — М.: НИИ “Автопром”, 1985.
12. **Манакон А. Л., Игумнов А. А., Коларж С. А.** Создание системы мониторинга технического состояния транспортных и технологических машин // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.

*Поступила в редакцию 1/VII 2014*