УДК 622.271

Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере

В.М. КУРГАНОВ¹, М.В. ГРЯЗНОВ², С.В. КОЛОБАНОВ³¹ Тверской государственный университет, Тверь, Россия² Научно-исследовательский институт открытых горных работ, Челябинск, Россия³ ООО «Лога», Магнитогорск, Россия

Предложенная в статье методика основана на использовании математического аппарата количественной оценки надежности мажоритарных схем структурного резервирования транспортных процессов, которые предусматривают наличие и использование в транспортном процессе нескольких резервных каналов доставки при возникновении какого-либо сбоя. Принцип многоканальности характерен для карьеров с транспортировкой вскрыши и полезного ископаемого от экскаваторных забоев автомобильным транспортом, когда экскаваторы циклического действия и автосамосвалы функционируют как единый экскаваторно-автомобильный комплекс. Такая организация работ существенно повышает вероятность выполнения суточного плана перевозок горной массы за счет перераспределения автосамосвалов между добычными и вскрышными экскаваторами в случае выхода из строя одной или нескольких единиц выемочно-погрузочного или транспортного оборудования.

Оценка надежности работы экскаваторно-автомобильных комплексов проводится в три этапа: сбор исходных данных для математического моделирования производительности экскаваторно-автомобильного комплекса; решение задачи оптимизации закрепления автосамосвалов за экскаваторами, обеспечивающей максимальную производительность экскаваторно-автомобильного комплекса; оценка надежности его работы на основе расчета вероятности выполнения суточного плана перевозок горной массы.

Предлагаемый методический аппарат реализован в рамках компьютерной программы и дает возможность автоматизировать оперативное управление процессом транспортирования горной массы на карьере с помощью мобильного приложения. Рекомендации, содержащиеся в статье, могут быть использованы на любых карьерах с автомобильным транспортом, независимо от вида добываемого полезного ископаемого, схемы разработки месторождения, способа организации погрузочных фронтов, мощности парка выемочно-погрузочного оборудования и грузоподъемности эксплуатируемых автосамосвалов.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс; надежность транспортного процесса; мажоритарные схемы структурного резервирования; горная масса; оптимальный план перевозок; выемочно-погрузочные работы

Как цитировать эту статью: Курганов В.М. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере / В.М.Курганов, М.В.Грязнов, С.В.Колобанов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 10-21. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.10

Введение. Объем перевозок горной массы за сутки (смену) определяется совокупностью факторов, включая численность исправных экскаваторов и автосамосвалов, расстояние перевозки вскрыши и полезного ископаемого соответственно в отвал или на склад, погодных условий, от которых зависит состояние забоев и карьерных дорог, других факторов. В наибольшей степени вероятность выполнения плана перевозок горной массы снижают отказы выемочно-погрузочного и транспортного оборудования. Внеплановый ремонт техники существенно затрудняет планирование работы карьера, поэтому практически единственным способом выполнения плана перевозок по вскрыше и полезному ископаемому в этом случае является перераспределение исправных автосамосвалов между исправными экскаваторами таким образом, чтобы производительность экскаваторно-автомобильного комплекса была максимальной.

В научной литературе предлагаются различные методики определения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов при сплошных и углубочных системах разработки месторождений полезных ископаемых. В качестве методического базиса в данной статье используются рекомендации по выбору вариантов закрепления автосамосвалов за экскаваторами на основе: учета влияния горно-технических параметров грузового фронта на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса [1, 4, 6]; установления количественного состава экскаваторно-автомобильных комплексов [11] и границ их применения на карьере [12]; обеспечения работоспособности погрузочно-выемочного и транспортного оборудования за счет современных средств диагностирования технического состояния и мониторинга работы [3, 8, 9].

Равенство объемов экскавации и перевозки горной массы требует выбора оптимального варианта закрепления автосамосвалов за экскаваторами. Для решения этой задачи использовался инструментарий методов оптимизации транспортных процессов, в частности алгоритмы определения кратчайших расстояний и оптимизации плана перевозок [10].

Формирование математического аппарата предлагаемой методики основывалось на использовании принципов расчета надежности технических процессов и систем, изложенных в работах [7, 13, 14]. На этих работах основывалась формулировка определений надежности и отказа транспортного процесса, а также систематизация способов его резервирования для повышения его надежности по критерию безотказности функционирования. Результаты проведенных исследований приведены в публикациях авторов, например в работе [5]. Способ расчета надежности транспортного процесса при использовании мажоритарных схем структурного резервирования изложен в работе [2].

Степень исследованности рассматриваемого в данной статье вопроса применительно к частным его задачам довольно высока. Существуют методики расчета производительности горно-транспортного оборудования на карьерах, учитывающие большое разнообразие факторов, определяющих результативность его работы. Известные методы оптимизации транспортных процессов используются для повышения эффективности функционирования технологических процессов открытых горных работ.

Вместе с тем существующие методы не в полной мере обеспечивают возможность использования особенности организации транспортного процесса на карьерах с автомобильным транспортом, состоящей в его многоканальности и мажоритарности, для повышения надежности работы погрузочно-выемочных и транспортных машин. Этим определяется выбор задачи исследования в данной статье: разработка методики оценки надежности работы экскаваторно-автомобильных комплексов на основе мажоритарных схем структурного резервирования. Решение поставленной задачи позволит автоматизировать оперативное управление процессом транспортирования горной массы на карьере с автомобильным транспортом, независимо от схемы открытой разработки месторождения полезного ископаемого, способа организации погрузочных фронтов, мощности парка выемочно-погрузочного оборудования и грузоподъемности эксплуатируемых автосамосвалов.

Методология. Разработка предлагаемой методики оценки была проведена с использованием следующих методов исследования: анализ научной и нормативно-справочной литературы, системный анализ, линейное программирование транспортных процессов, имитационное компьютерное моделирование. Для ее практической реализации потребовались следующие методы исследования: натурные наблюдения, хронометраж и фотография рабочего дня, статистический и технико-экономический анализ.

Описание методов исследования:

1. Разработка предлагаемой методики:

- Анализ научной и нормативно-справочной литературы – изучение существующих методов решения поставленной задачи, а также технических характеристик современного выемочно-погрузочного оборудования и автосамосвалов.

- Системный анализ – установление границ технологических звеньев горно-транспортной системы карьера: выемка, экскавация, погрузка, транспортирование, выгрузка и складирование горной массы.

- Линейное программирование транспортных процессов – написание алгоритма компьютерной программы.

- Имитационное компьютерное моделирование – отладка программы, формализация и оценка корректности результатов расчета.

2. Практическая реализация предлагаемой методики:

- Натурные наблюдения – выявление и оценка степени влияния на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса организационно-технологических факторов.

- Хронометраж и фотография рабочего дня – определение продолжительности выполнения отдельных технологических операций транспортного процесса, структурирование затрат рабочего времени водителей автосамосвалов и машинистов экскаваторов.

Рис. 1. Структура рабочего дня водителей автосамосвалов ООО «Лога», занятых на доставке вскрыши

1 – работа на маршруте; 2 – обеденный перерыв; 3 – передача смены; 4 – нулевой пробег; 5 – потери времени на маршруте; 6 – технологические простои; 7 – нерегламентированные простои

• Статистический анализ – статистическая обработка результатов проводимых хронометражей для формирования массива исходных данных.

• Техничко-экономический анализ – анализ полученных результатов, расчет экономического эффекта.

Корректность полученных результатов расчета и результативность практической реализации предлагаемой методики во многом определяется правильностью выявления и оценки степени влияния на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса различных организационно-технологических факторов. Например, в работе [2] отмечается, как с помощью натурных наблюдений и фотографий рабочего дня водителей было установлено, что в отдельные смены простои экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) из-за технологических перерывов (подготовка экскаваторного забоя, подчистка подъездных путей к грузовому фронту, внутрисменное техническое обслуживание машин) незначительны (около 4 %) (рис.1). Как видно из рисунка, основные потери производительности связаны с нерегламентированными простоями, вызванными низким уровнем организации производства, о чем свидетельствует наличие сверхнормативного послеобеденного отдыха водителей, отвлечение автосамосвалов на подсыпку карьерных дорог, окончание рабочей смены ранее графика.

Перечень организационно-технологических факторов и степень их влияния на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса индивидуальны для любого карьера.

Обсуждение. Математическая модель. Решение задачи оптимального закрепления автосамосвалов за экскаваторами основывается на использовании математической модели, целевая функция которой предусматривает максимизацию суммарного по карьере объема перевезенной горной массы за рабочую смену:

$$Q_{см}^{ЭАК} = \sum_{i=1}^{A_{и}} (n_{об} q_{об})_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $n_{об}$ – число оборотов i -го автосамосвала за смену; $q_{об}$ – объем перевозимой горной массы автосамосвалом за оборот, $м^3$; $A_{и}$ – число автосамосвалов, работающих на линии, ед.

Система ограничений оптимизационной математической модели обусловлена работой автосамосвалов на маятниковых маршрутах неизменного плеча перевозки. Модель работает при превышении численности автосамосвалов над численностью экскаваторов. Кроме того, обязательным является соотношение вместимостей кузова автосамосвала и ковша экскаватора в интервале от 1:3 до 1:7:

$$\begin{cases} l_{е.г} = \text{const}; \\ \beta = 0,5; \\ A_{и} > A_{э}; \\ 3 \leq \frac{Q_{куз}}{Q_{ков}} \leq 7, \end{cases} \quad (2)$$

где $l_{е.г}$ – длина ездки с грузом, км; β – коэффициент использования пробега автосамосвала за езду; $A_{и}$, $A_{э}$ – соответственно число автосамосвалов, задействованных на перевозке и число экскаваторов на погрузке, ед.; $Q_{куз}$, $Q_{ков}$ – соответственно вместимости кузова автосамосвала и ковша экскаватора, $м^3$.

Для предлагаемой математической модели использование выемочно-погрузочной и транспортной техники с одинаковыми технико-эксплуатационными характеристиками не является ог-

раничением. Модель будет применима и в экскаваторах различной вместимости ковша и автосамосвалов неодинаковой грузоподъемности.

По результатам расчета сменной производительности каждого автосамосвала, формирующего экскаваторно-автомобильный комплекс карьера, определяется его суммарная производительность для любой из возможных комбинаций закрепления автосамосвалов за экскаваторами. Эти расчеты легко автоматизируются на ЭВМ, так же как и выбор варианта закрепления. Вариант, обеспечивающий максимальную суммарную производительность, будет оптимальным.

На следующем этапе необходимо провести количественную оценку надежности работы экскаваторно-автомобильного комплекса оптимальной структуры. В теории надежности способ оценки надежности любого объекта зависит от вида схемы соединения его структурных элементов. Схема соединения элементов экскаваторно-автомобильного комплекса формируется из следующих соображений.

Источниками грузопотока на карьере являются вскрышные и добычные экскаваторы. Гашение грузопотока происходит на отвале пустой породы или на складе добытого полезного ископаемого. Складирование пустой породы в отвал производится отвальными бульдозерами. При отсутствии обогатительной фабрики таким же образом складировается добытое полезное ископаемое (рис.2). Наличие обогатительной фабрики ограничивает поток руды, угля или другого добываемого сырья из карьера приемным бункером линии дробления. Автосамосвалы обеспечивают продвижение грузопотока с момента его генерации до погашения.

Совместная работа нескольких экскаваторов, автосамосвалов и бульдозеров обеспечивает постоянное функционирование параллельных каналов доставки горной массы из карьера. Такая организация работ существенно повышает надежность транспортной системы, поскольку для безотказного функционирования не обязательна работа одновременно всех каналов доставки. Достаточно работы минимально необходимого их числа, которым обеспечивается выполнение сменного плана перевозок по вскрышке и полезному ископаемому.

Таким образом, экскаваторно-автомобильный комплекс включает экскаваторный, транспортный и бульдозерный блоки. Формулы для оценки надежности каждого из блоков различны, что объясняется отличиями применяемых методов резервирования. Например, в работе экскаваторного блока используется принцип «скользящего» резерва – один из экскаваторов $\mathcal{E}_p$ является резервным и включается в работу на период проведения планового технического обслуживания или внеплановых ремонтов основных n единиц экскаваторного парка. В теории надежности такие схемы называют мажоритарными схемами общего резервирования замещением. В случае отсутствия «скользящего» резерва, оценка надежности экскаваторного блока будет производиться так же, как и оценка надежности транспортного блока.

В работе транспортного блока используется мажоритарная схема общего постоянного резервирования с дробной кратностью и постоянно включенными в работу резервными каналами доставки горной массы, число которых превышает 1,0. Такая схема резервирования определяет максимально возможное l и необходимое h число каналов, достаточное для бесперебойной доставки вскрыши из карьера в отвал или полезного ископаемого на склад или обогатительную фабрику. Величина h определяется суммарной производительностью каналов доставки, которая обеспечивает выполнение суточного плана перевозок горной массы. Максимально возможное число каналов l равно численности парка автосамосвалов, занятого на доставке. Разность $(l - h)$ представляет собой число резервных каналов доставки.

В работе бульдозерного блока используется принцип «горячего» резерва, когда, например, на отвале размещаются два бульдозера, хотя для его формирования без нарушения принятой технологии ведения горных работ достаточно одного бульдозера из m работающих. При этом неважно, какой из двух бульдозеров является резервным, а какой основным. В данном случае имеет место схема постоянного резервирования с целой кратностью (рис.3).

Рис.2. Схема с верхней погрузкой доставки вскрыши или руды автосамосвалами при отсутствии обогатительной фабрики

Рис.3. Схемное представление экскаваторно-автомобильного комплекса на карьере с аспекта оценки надежности его работы
Э – экскаватор; А – автосамосвал; Б – бульдозер

Количественная оценка надежности экскаваторного и автомобильного блоков рассчитывается с учетом вероятности безотказной их работы в течение времени t :

- экскаваторный блок

$$P_{\text{э}} = P_{l-h} + P_{\text{п}} \sum_{i=1}^{\frac{t}{t-t_i}} [P_{t,t_i} Q_{t,t_i}] Q_{l-h}, \quad (3)$$

где P_{l-h} , Q_{l-h} – соответственно вероятности безотказной работы и отказа основного канала доставки, резервированного $(l-h)$ раз в течение времени t ; P_{t,t_i} , Q_{t,t_i} – соответственно вероятности безотказной работы и отказа одного резервного канала в течение времени $(t-t_i)$; $P_{\text{п}}$ – вероятность безотказной работы переключателя;

- транспортный блок

$$P_{\text{тр}} = 1 - [P^l + lP^{l-1}Q + \frac{l(l-1)}{2!}P^{l-2}Q^2 + \frac{l(l-1)(l-2)}{3!}P^{l-3}Q^3 + \frac{l(l-1)(l-2)(l-3)}{4!}P^{l-4}Q^4 + \dots + Q^l], \quad (4)$$

где P, Q – соответственно вероятности безотказной работы и отказа автосамосвала при работе h основных каналов из l возможных;

- бульдозерный блок

$$P_{\text{б}} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P)_i. \quad (5)$$

Предложенный математический аппарат реализован на примере перевозки вскрышной породы при строительстве Михеевского рудника (Варненский район, Челябинская обл.) одним из подрядчиков ООО «Лога» (г. Магнитогорск).

Расчеты. Перевозимая вскрыша представляет собой глиняно-песчаную смесь плотностью $1,6 \text{ т/м}^3$. Рыхление массива вскрышных пород производится одновременно с их выемкой экскаватором. На сложных участках рыхление выполняется механическим способом с помощью бульдозера, оборудованного рыхлителем. Выемочно-погрузочные работы осуществляются тремя гидравлическими экскаваторами «обратная лопата» с вместимостью ковша $1,44\text{--}2,0 \text{ м}^3$. Четвертый экскаватор находится в резерве.

Грунтовые воды приводят к образованию в зимний период больших кусков смерзшейся породы, вмещаемых в ковш экскаватора. Отдельного складирования и последующего дробления смерзшихся кусков не требуется. Однако большая увлажненность способствует налипанию и намерзанию транспортируемой вскрыши к ковшам экскаваторов, отвалам бульдозеров, днищам и бортам кузовов автосамосвалов, что негативно сказывается на эксплуатационной производительности горно-транспортного оборудования карьера.

Погрузочные фронты на карьере сооружаются как тупиковыми, так и проездными, с верхней или нижней погрузкой. У экскаваторного забоя формируются площадки для маневрирования автосамосвалов. Погрузка вскрыши производится в трех- и четырехосные автосамосвалы грузоподъемностью 20-30 т: HOWO – 1 ед.; CAMC – 2 ед.; DONG-FANG – 4 ед.; MAN – 1 ед.; КАМАЗ-6520 – 4 ед.

Доставка вскрыши осуществляется по маятниковым маршрутам из карьера в отвал. Длина груженой ездки в зависимости от маршрута движения изменяется в пределах 0,5-2,0 км. Максимальный продольный уклон трассы автодороги составляет 10 ‰. Автодороги в карьере временные, поверхность периодически профилируется автогрейдером. Разгрузка вскрышной породы выполняется из автосамосвала на землю на расстоянии 5-7 м до бровки предохранительного вала. После уборки автосамосвала с места разгрузки выгруженная горная масса сталкивается с отвала двумя бульдозерами Б-130.

Наиболее трудоемким является расчет надежности транспортного блока, поскольку для определения минимально необходимого числа каналов доставки, обеспечивающего безотказную работу экскаваторно-автомобильного комплекса, необходимо рассчитать время оборотного рейса автосамосвалов и их сменную производительность. Время оборотного рейса зависит от продолжительности технологических операций, выполняемых автосамосвалом за оборотный рейс, – погрузки, ездки с грузом, маневрировании перед разгрузкой, разгрузки, холостого хода, ожидания погрузки, маневрирования перед погрузкой. Продолжительность технологических операций транспортного процесса устанавливается хронометрированием. Расчет времени оборотного рейса производится для вариантов погрузки автосамосвалов экскаваторами с различной вместимостью ковша. Пример результатов расчета для варианта погрузки экскаватором НІТАСНІ с вместимостью ковша 2,0 м³ приведен в табл.1.

Таблица 1

Результаты расчета времени оборотного рейса автосамосвалов при их погрузке экскаватором НІТАСНІ (2,0 м³)

Марка автосамосвала	Нормативная длина ездки, км	Время оборотного рейса	
		мин:с	ч
КАМАЗ-6520	0,5	12:08	0,202
	1,0	16:55	0,282
	1,5	21:43	0,362
	2,0	26:32	0,442
DONG-FANG	0,5	12:54	0,215
	1,0	17:41	0,295
	1,5	22:29	0,375
	2,0	27:18	0,455
MAN	0,5	15:37	0,260
	1,0	20:24	0,340
	1,5	25:12	0,420
	2,0	30:01	0,500
HOWO	0,5	11:56	0,199
	1,0	16:43	0,279
	1,5	21:31	0,359
	2,0	26:20	0,439
CAMC (3 оси)	0,5	12:29	0,208
	1,0	17:16	0,288
CAMC (3 оси)	1,5	22:04	0,368
	2,0	26:53	0,448
CAMC (4 оси)	0,5	12:29	0,208
	1,0	17:16	0,288
	1,5	22:04	0,368
	2,0	26:53	0,448

Сменная производительность автосамосвала, помимо времени оборотного рейса, определяется временем его работы на маршруте и в наряде, продолжительностью нулевого пробега и обещанного перерыва, другими элементами структуры рабочего дня водителей автосамосвалов (см. рис.1). Результаты расчета сменной производительности рассматриваемых автосамосвалов для граничных значений принятого диапазона изменения длины ездки с грузом (0,5-2,0 км) приведены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчета сменной производительности автосамосвалов, задействованных на перевозке вскрыши

Марка автосамосвала	Число оборотов в смену		Сменная производительность, м ³			
			Насыпной объем		Объем в целике	
	0,5 км	2,0 км	0,5 км	2,0 км	0,5 км	2,0 км
Дневная смена						
<i>Погрузка экскаватором HITACHI</i>						
KAMA3-6520	48	22	283,8	619,2	187,0	408,0
DONG-FANG	45	21	338,1	724,5	231,0	495,0
MAN	37	19	366,7	714,1	228,0	444,0
HOWO	49	22	354,2	788,9	242,0	539,0
CAMC	47	21	338,1	756,7	231,0	517,0
<i>Погрузка экскаватором HYUNDAI</i>						
KAMA3-6520	45	21	270,9	580,5	178,5	382,5
DONG-FANG	41	20	322,0	660,1	220,0	451,0
MAN	34	18	347,4	656,2	216,0	408,0
HOWO	45	21	338,1	724,5	231,0	495,0
CAMC	43	21	338,1	692,3	231,0	473,0
Ночная смена						
<i>Погрузка экскаватором HITACHI</i>						
KAMA3-6520	41	18	232,2	528,9	153,0	348,5
DONG-FANG	38	18	289,8	611,8	198,0	418,5
MAN	32	16	308,8	617,6	192,0	384,0
HOWO	41	18	289,8	660,1	198,0	451,0
CAMC	40	18	289,8	644,0	198,0	440,0
<i>Погрузка экскаватором HYUNDAI</i>						
KAMA3-6520	38	18	232,2	490,2	153,0	323,0
DONG-FANG	35	17	273,7	490,2	187,0	385,0
MAN	29	15	289,5	563,5	180,0	348,0
HOWO	38	18	289,8	559,7	198,0	418,0
CAMC	36	17	273,7	611,8	187,0	396,0

Примечания: 1. Для автосамосвалов CAMC, независимо от числа осей, величина сменной производительности одинакова. 2. Значения приведенных в таблице показателей при погрузке автосамосвалов экскаваторами HITACHI одинаковы, независимо от вместимости ковша.

По табл.2 определяется суммарная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса для любой из возможных комбинаций закрепления автосамосвалов за экскаваторами. Для автоматизации этих расчетов разработана компьютерная программа, которая на основе целевой функции и системы ограничений [см. формулы (1), (2)] оптимизирует вариант закрепления автосамосвалов за экскаваторами посредством максимизации суммарной производительности экскаваторно-автомобильного комплекса карьера за смену. Перечень и последовательность ввода в программу исходных данных приведены на рис.4.

Оптимальный вариант закрепления автосамосвалов за экскаваторами, предлагаемый компьютерной программой, приведен на рис.5. Безотказное функционирование экскаваторно-автомобильного комплекса определяется выполнимостью месячного плана перевозки вскрышной породы для ООО «Лога», составляющей в целике 150 тыс.м³. Перевозка осуществляется

Рис.4. Перечень и последовательность ввода в программу исходных данных

Рис.5. Оптимальный вариант закрепления автосамосвалов за экскаваторами в рассматриваемом примере

по 4-бригадному графику в две смены по 12 ч. Число рабочих смен в месяце принято 60. Соответственно, сменный план доставки вскрыши равен 2,5 тыс.м³.

Предлагаемая компьютерная программа обеспечивает возможность имитационного моделирования выполнимости сменного плана перевозок вскрыши при отказе одного или нескольких автосамосвалов или экскаваторов. На основе данных табл.2 программа перераспределяет оставшиеся исправные автосамосвалы между оставшимися исправными экскаваторами и рассчитывает суммарную производительность экскаваторно-автомобильного комплекса по всем комбинациям нового закрепления, выбирая оптимальный вариант. Комбинации закрепления, обеспечивающие

Рис. 6. Результаты имитационного моделирования выполнимости сменного плана перевозки (пунктирная линия) вскрыши

суммарную сменную производительность менее 2,5 тыс.м³, программой не рассматриваются. Результаты имитационного моделирования выполнимости сменного плана перевозки вскрыши для рассматриваемых условий приведены на рис.6.

При расчете надежности экскаваторно-автомобильного комплекса принимается равнонадежность его элементов внутри каждого из блоков: экскаваторов – независимо от марки и вместимости ковша; автосамосвалов – независимо от марки, грузоподъемности и числа осей. Однорачность отвальных бульдозе-

ров также определяет их равнонадежность. Надежность работы экскаваторов, автосамосвалов и бульдозеров принимается равным коэффициенту их технической готовности – соотношением числа смен занятости в течение месяца соответственно на выемочно-погрузочных работах, на доставке вскрыши и формировании отвала к числу рабочих смен в месяце. Величина искомого показателя составляет: по экскаваторам – 0,9; по автосамосвалам – 0,93; по бульдозерам – 0,95. Надежность экскаваторного блока (Э₁-Э₄) определяется по формуле (3) и составляет 0,9997. Надежность бульдозерного блока (Б₁-Б₂) – по формуле (5) и равна 0,998.

Надежность транспортного блока (А₁-А₁₂) рассчитывается по формуле (4). Расчет состоит в разложении полинома комбинаций возможных состояний полной и частичной работоспособности транспортного блока. Состояние полной работоспособности транспортного блока наблюдается при исправной работе 12 автосамосвалов, частичной – в случае исправности менее 12 автосамосвалов. Первой рассматривается комбинация, когда все автосамосвалы, занятые на перевозке, исправны. При этом суммарная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса максимальная и определяется длиной грузовой ездки обратной зависимостью. Так, при длине грузовой ездки 0,5 км производительность составляет 6,0 тыс.м³ вскрыши в смену. При длине грузовой ездки 2,0 км суммарная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса снижается до 2,65 тыс.м³.

Затем рассматриваются комбинации возможных состояний потери работоспособности одного из 12 автосамосвалов, что потребует от компьютерной программы проведения 12 расчетов суммарной производительности экскаваторно-автомобильного комплекса. Следует отметить, что суммарная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса будет зависеть от марки отказавшего автосамосвала. При потере работоспособности наименее производительного автосамосвала КАМАЗ-6520 суммарная сменная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса во всех возможных состояниях 11 исправных автосамосвалов из 12 будет максимальной. Наименьшая суммарная производительность экскаваторно-автомобильного комплекса будет наблюдаться при отказе высокопроизводительного автосамосвала HOWO. Кривые на рис.6 соответствуют минимальным значениям суммарной производительности экскаваторно-автомобильного комплекса. Из рисунка видно, что план перевозки вскрыши будет выполним, когда средняя длина ездки не будет превышать 2,0 км. Фрагмент макроса для расчета суммарной производительности экскаваторно-автомобильного комплекса приведен на рис.7.

При одновременном отказе двух автосамосвалов компьютерная программа пересчитывает 66 комбинаций состояний работоспособности транспортного блока. Затем последовательно рассматриваются комбинации состояний работоспособности транспортного блока при отказе трех, четырех, пяти и более автосамосвалов. Число рассчитываемых программой комбинаций прямо пропорционально числу отказавших автосамосвалов, однако зависимость между этими параметрами нелинейная. Например, при отказе трех автосамосвалов число комбинаций состояний работоспособности равно 220, при отказе четырех – оно возрастает до 470.

Microsoft Excel - Модель полином													
Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка													
A1 fx 1. Howo													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	1. Howo	2. Camc	Camc	4. Dong-fa	5. Dong-fe	6. Dong-fe	7. Dong-fe	8. Man	9. Камаз	10. Камаз	11. Камаз	12. Камаз	Сум.
2	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	5494
3	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	0	5111,5
4	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	0	382,5	5111,5
5	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	0	382,5	382,5	5111,5
6	539	517	517	495	484	484	484	444	0	382,5	382,5	382,5	5111,5
7	539	517	517	495	484	484	484	0	382,5	382,5	382,5	382,5	5050
8	539	517	517	495	484	484	0	444	382,5	382,5	382,5	382,5	5010
9	539	517	517	495	484	0	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	5010
10	539	517	517	495	0	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	5010
11	539	517	517	0	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	4999
12	539	517	0	495	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	4977
13	539	0	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	4977
14	0	517	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	382,5	382,5	4955
15	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	382,5	0	0	4729
16	539	517	517	495	484	484	484	444	382,5	0	382,5	0	4729
17	539	517	517	495	484	484	484	444	0	382,5	382,5	0	4729
18	539	517	517	495	484	484	484	0	382,5	382,5	382,5	0	4667,5
19	539	517	517	495	484	484	0	444	382,5	382,5	382,5	0	4627,5
20	539	517	517	495	484	0	484	444	382,5	382,5	382,5	0	4627,5

Рис. 7. Фрагмент макроса для расчета суммарной производительности экскаваторно-автомобильного комплекса

По формуле (4) посредством разложения полинома комбинаций возможных состояний полной и частичной работоспособности транспортного блока проводится количественная оценка его надежности как сумма вероятностей выполнения плана перевозки вскрыши при отказе соответственно 1, 2, 3, ..., 7 автосамосвалов. Например, критерий надежности транспортного блока в дневную смену при средней длине груженой ездки 1,0 км будет определяться следующим образом:

$$P_{A_1-A_{12}} = (P^A)^{12} + 12(P^A)^{11}(1 - P^A) + 66(P^A)^{10}(1 - P^A)^2 + 220(P^A)^9(1 - P^A)^3 + \\ + 470(P^A)^8(1 - P^A)^4 + 14(P^A)^7(1 - P^A)^5.$$

При $P^A = 0,93$ критерий надежности транспортного блока при средней длине груженой ездки 1,0 км будет равен 0,9988. По рассчитанным ранее значениям критерия надежности экскаваторного и бульдозерного блоков, а также последовательном их расположении (см. рис.3), определяется критерий надежности работы экскаваторно-автомобильного комплекса при средней длине груженой ездки 1,0 км:

$$P_{1\text{ км}}^{\text{ЭАК}} = 0,9997 \cdot 0,9988 \cdot 0,998 = 0,9965.$$

Как видно из рис.8, надежность работы экскаваторно-автомобильного комплекса обратно пропорциональна длине груженой ездки. Вероятность выполнения плана перевозки при длине груженой ездки более 1,5 км заметно снижается.

Предложенный в данной статье методический инструментарий по автоматизации оперативного планирования позволит перевозчику повысить надежность своей работы, тем самым минимизировать потери в виде штрафных санкций вследствие невыполнения взятых договорных обязательств.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали следующее:

1. Актуальность проблемы обеспечения надежности работы экскаваторно-автомобильных комплексов на карьерах обуславливает вероятностный характер фактического объема перевозок горной массы за сутки (смену). Данный показатель определяется рядом случайных факторов, включая численность исправных экскаваторов и автосамосвалов, расстояние перевозки вскрыши и полезного ископаемого соответственно в отвал или на склад, погодных условий, определяющих состояние забоев и карьерных дорог, других факторов.

2. Существующие методы расчета производительности горно-транспортного оборудования на карьерах не в полной мере обеспечивают возможность использования особенности организации транспортного процесса на карьерах с автомобильным транспортом, состоящей в его многоканальности и мажоритарности для повышения надежности работы погрузочно-выемочных и

Рис.8. Результаты расчета надежности работы экскаваторно-автомобильного комплекса

транспортных машин. Этим определяется выбор задачи исследования – разработка методики оценки надежности работы экскаваторно-автомобильных комплексов на основе мажоритарных схем структурного резервирования.

3. Предлагаемая методика оценки надежности работы экскаваторно-автомобильных комплексов состоит из трех этапов: сбор исходных данных для математического моделирования производительности экскаваторно-автомобильного комплекса;

решение задачи оптимизации закрепления автосамосвалов за экскаваторами, обеспечивающей максимальную производительность экскаваторно-автомобильного комплекса; оценка надежности его работы на основе расчета вероятности выполнения суточного плана перевозки горной массы.

4. Решение задачи оптимального закрепления автосамосвалов за экскаваторами основывается на математической модели, структура которой включает:

- целевую функцию максимизации суммарного по карьере объема перевезенной горной массы за рабочую смену;
- систему ограничений, предусматривающую условия работы автосамосвалов на маятниковых маршрутах неизменного плеча перевозки, превышения численности автосамосвалов над численностью экскаваторов, соотношение вместимостей кузова автосамосвала и ковша экскаватора в интервале от 1:3 до 1:7.

5. Надежность работы экскаваторно-автомобильного комплекса оценивается исходя из схемного представления последовательно-параллельного соединения его элементов с последующей детализацией на экскаваторный транспортный и бульдозерный блоки. Надежность экскаваторного блока основана на определении полной вероятности гипотез безотказности и отказа основного канала доставки. Оценка надежности транспортного блока проводится посредством разложения бинома состояний h основных каналов из возможных l . Надежность работы бульдозерного блока определяется как вероятность возникновения совместного события – безотказной работы одного из бульдозеров.

6. Предлагаемый методический аппарат реализован в рамках компьютерной программы и дает возможность автоматизировать оперативное управление процессом транспортирования горной массы на карьере посредством мобильного приложения. При вводе исходных данных для математического моделирования программа рассчитывает сменную производительность автосамосвалов, задействованных на перевозке горной массы, оптимизирует закрепление автосамосвалов за экскаваторами с учетом выхода из строя одной или нескольких единиц выемочно-погрузочного или транспортного оборудования, определяет величину количественного критерия надежности работы экскаваторно-автомобильного комплекса, а также выдает результаты расчета в числовом и графическом виде.

7. Целесообразность практической реализации предлагаемых рекомендаций доказана на примере перевозки вскрышной породы при строительстве Михеевского рудника (Варненский район, Челябинская обл.) одним из подрядчиков – ООО «Лога» (г. Магнитогорск).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аникин К.В. Исследование влияния длины рабочего фронта и ширины рабочей площадки на уступе на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. Вып. 2. С. 147-155.
2. Грязнов М.В. Оценка надежности перевозки вскрышной породы автосамосвалами ООО «ЛОГА» / М.В.Грязнов, С.В.Колобанов // Автотранспортное предприятие. 2013. Вып. 3. С. 50-53.
3. Кувишинкин С.Ю. Влияние конструктивных параметров рабочего оборудования карьерного экскаватора на динамику нагрузки // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 66-70.
4. Кулешов А.А. Современные методы управления работой мощных экскаваторно-автомобильных комплексов на карьерах // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 7-16.

5. Курганов В.М. Управление надежностью транспортных систем и процессов автомобильных перевозок / В.М.Курганов, М.В.Грязнов. Магнитогорск: Изд-во «Магнитогорский Дом печати», 2013. 318 с.
6. Нецветаев А.Г. Аналитическая модель расчета производительности системы «экскаватор – транспортные средства» / А.Г.Нецветаев, А.М.Хотинский // Вестник КузГТУ. 1998. Вып. 4. С. 70-71.
7. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М.Половко, С.В.Гуров. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
8. Попов Г.А. Бортовая система контроля экскаватора // Записки Горного института. 2008. Т. 177. С. 104-106.
9. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / К.Н.Трубецкой, А.А.Кулешов, А.Ф.Клебанов, Д.Я.Владимиров. М.: Наука, 2007. 360 с.
10. Схрейвер А. Теория линейного и целочисленного программирования. М.: Мир, 1991. 360 с.
11. Сысоев А.А. Управление количественным составом транспортного звена экскаваторно-автомобильных комплексов / А.А.Сысоев, О.И.Литвин // Уголь. 2009. Вып. 2. С. 24-26.
12. Установление границ применения экскаваторно-автомобильных комплексов различной мощности в глубоких карьерах / Б.Р.Ракишев, Е.Б.Мухамеджанов, Г.К.Саменов, А.Е.Куттыбаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. Вып. 7. С. 90-98.
13. Brown Richard E. Electric power distribution reliability. New York: CRC Press, 2009. 294 p.
14. Tomas Marlin U. Reliability and warranties. New York: CRC Press, 2006. 216 p.

Авторы: **В.М.Курганов**, д-р техн. наук, доцент, glavreds@gmail.com (Тверской государственный университет, Тверь, Россия), **М.В.Грязнов**, д-р техн. наук, доцент, gm-autolab@mail.ru (Научно-исследовательский институт открытых горных работ, Челябинск, Россия), **С.В.Колобанов**, директор, ooo_log@mail.ru (ООО «Лога», Магнитогорск, Россия).

Статья поступила в редакцию 27.07.2019.

Статья принята к публикации 13.11.2019.