ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Проектирование геотехнических комплексов карьера с обеспечением устойчивого функционирования горно-добывающего предприятия

А.В.Глебов✉, В.Л.Яковлев
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Глебов А.В., Яковлев В.Л. Проектирование геотехнических комплексов карьера с обеспечением устойчивого функционирования горно-добывающего предприятия // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 90-97. EDN YBMQBH

Аннотация
В статье рассмотрена проблема снижения конкурентоспособности горно-добывающих предприятий вследствие роста затрат на транспортирование горной массы из-за возникновения взаимного несоответствия транспортной и горно-технической систем карьера. Изложен подход к проектированию горно-технических систем глубоких карьеров, основанный на учете надежности технической подсистемы, обеспечивающей грузооборот горной массы. Формирование устойчивого грузооборота горной массы является актуальной научно-практической задачей для обеспечения конкурентоспособности горно-добывающего предприятия. Параметры и показатели подсистем горно-технической системы имеют большое количество взаимосвязей и изменяются в течение срока существования карьера, их формирование рассматривается как совокупность горно-транспортного оборудования, составляющего геотехнические комплексы – буровзрывной, экскаваторно-автомобильный, дробильно-конвейерный, дробильно-перегрузочный и др., являющиеся основным звеном по извлечению и доставке полезного ископаемого на дневную поверхность. Приведены математические модели надежности грузопотоков, формируемых технической подсистемой горно-технической системы карьера, учитывающие зависимость между надежностью системы и эксплуатационной надежностью составляющего ее горно-транспортного оборудования (автомобильного, железнодорожного и конвейерного транспорта, буровых станков, экскаваторов) при различных схемах взаимодействия. Приведенные зависимости могут применяться для моделирования как в процессе проектирования горно-технических систем карьера, так и в анализе надежности отдельных схем транспортирования горной массы и транспортной системы в целом. Целью исследования является разработка схем и математических моделей для определения надежности грузооборота, обеспеченного технической подсистемой карьера (сочетание геотехнических комплексов, оказывающих существенное влияние на технологическую подсистему, грузооборот и производительность карьера).

Ключевые слова
карьер; горно-техническая система; геотехнологический комплекс; горно-транспортное оборудование; надежность; коэффициент готовности; производительность; эффективность

Финансирование
Статья подготовлена в рамках Государственного задания по теме 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), № 1022040200004-9-1.5.1.

Поступила: 11.07.2025 ***Принята: 04.03.2026*** ***Онлайн: 09.06.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Введение

Проектирование карьеров для освоения месторождений твердых полезных ископаемых, как правило, осуществляется на 25-30 лет, иногда на 50 лет и более. За этот период оборудование, предусмотренное проектом, физически и морально устаревает, ухудшаются показатели работы геотехнических комплексов по мере углубления карьера, что в совокупности приводит к удорожанию добычи полезных ископаемых и снижению рентабельности горно-добывающего производства [1-3]. На большинстве крупных горно-добывающих предприятий России грузопотоки глубоких карьеров характеризуются высокой концентрацией перевозок, нестабильностью основных параметров и разнородностью транспортируемой горной массы. Это подтверждается и на зарубежных предприятиях [4-6].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Согласно определению чл.-кор. РАН Д.Р.Каплунова горно-техническая система (ГТС) – это совокупность горных конструкций и технологических подсистем во взаимодействии с вмещающими их участками недр. Развивая данное направление для повышения объективности исследования процесса накопления технических, технологических и других несоответствий транспортной системы условиям ее функционирования при увеличении глубины карьера, закономерно приводящего к росту затрат, авторы данной статьи выделили две взаимосвязанных подсистемы ГТС – технологическую и техническую.

Технологическая подсистема ГТС – совокупность элементов подготовительных, вскрышных и добычных выработок, обеспечивающих размещение геотехнических комплексов и доступ к георесурсам с целью их добычи.

Техническая подсистема ГТС – цепь взаимосвязанных геотехнических комплексов, осуществляющих контролируемый и управляемый людьми процесс перемещения горной массы во времени и пространстве. В данном исследовании технической подсистемой ГТС является автомобильно-конвейерный транспорт.

Геотехнический комплекс – цепь взаимосвязанных машин и механизмов, обеспечивающих полностью механизированный, автоматизированный или роботизированный процесс во всех его звеньях и на всех его этапах (погрузка, транспортирование, дробление, сортировка).

Вопросам оценки качества эксплуатации [7] и определения рациональной структуры [8-10] парка горно-транспортного оборудования уделяют внимание как российские [11], так и зарубежные специалисты [12, 13], используя в том числе многокритериальный подход [14]. Большое внимание уделяется вопросам надежности [15, 16], оценке показателей результативности системы эксплуатации оборудования технологического комплекса горно-добывающих предприятий при различном взаимодействии ее подсистем [17].

Проблема надежности грузопотоков глубоких карьеров заключается в том, чтобы обеспечить выемку, погрузку и доставку горной массы на отвалы, перегрузочные и усреднительные склады, перерабатывающее производство (ДСК, обогатительные фабрики и т.п.), по объемам и времени соответствующие наиболее эффективному режиму горных работ при минимальных эксплуатационных расходах. На современном этапе развития горного производства и достигнутом техническом уровне горно-транспортного оборудования первоочередными задачами решения данной проблемы являются:

– разработка методов учета надежности функционирования геотехнических комплексов карьеров при проектировании, оперативном, текущем и перспективном планировании горных работ, формировании парка машин, определении трудовых и материальных ресурсов;

– определение рациональных уровней резервирования в процессах подготовки горной массы к выемке, погрузки, транспортирования, перегрузки и первичной переработки в зависимости от показателей надежности горно-транспортного оборудования, характеристик грузопотока и развития системы технического сервиса;

– разработка эффективных систем управления для согласования во времени и пространстве работы горно-транспортного оборудования, распределения грузопотоков в соответствии с заданными критериями (качественный состав руды, ограничения по вместимости перегрузочных складов или пропускной способности транспортных коммуникаций и др.);

– разработка современных автоматизированных методов и средств диагностирования текущего состояния машин.

Для решения задач надежности грузопотоков используются вероятностные оценки оборудования [18] или процессов, такие как вероятность функционирования грузопотоков [19] с заданной интенсивностью в установленный период, вероятность выполнения заданных объемов добычи и перевозки горной массы в смену, сутки, месяц, год, вероятность обеспечения качества руды в определенный период времени и т.д.

При проектировании горно-технических систем провозная способность транспортных коммуникаций ограничивается объемом выдаваемой из карьера горной массы и полезного ископаемого, а число транспортных коммуникаций и их расположение зависят от множества взаимоувязанных факторов. Повышение эффективности горно-добывающего производства направлено на улучшение эксплуатационных показателей оборудования геотехнических комплексов: буровзрывного (БВР),

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

экскаваторно-автомобильного (ЭАК) [20-22], дробильно-конвейерного (ДКК) [23, 24], дробильно-перегрузочного (ДПП) [25] и других, являющихся основным звеном по извлечению полезного ископаемого в карьере и доставке его на дневную поверхность.

Эффективность и устойчивость процесса транспортирования горной массы [26-28] в карьерах определяется не только надежностью транспортных средств и собственно транспортной схемой, но и надежностью и четкостью работы всех машин в смежных звеньях технологической цепи [29-31]. С точки зрения надежности необходимо рассматривать совместную работу всего горного и транспортного оборудования и оценивать надежность каждого геотехнического комплекса (ЭАК, ДКК и др.), а также надежность их совместной работы как технической подсистемы (ТС) горно-технической системы карьера.

Для достижения поставленной цели исследования решается задача развития методов комплексной оценки надежности горно-транспортного оборудования и его сочетаний в геотехнических комплексах при проектировании горно-технической системы карьера.

Методы

Техническая подсистема горно-технической системы карьера должна быть стабильной для достижения поставленных целей – формирования устойчивого грузооборота горной массы от забоя до конечных пунктов (ОФ, склады, отвалы) с целью обеспечения заданной производительности в определенных условиях эксплуатации. Надежность технической подсистемы определяется по формуле

$$W_{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{n} Q\left(P_i\right) P_i\left(tG\right),$$

где $Q(P_i) = q_i / q_m$ – эффективность i-го состояния ТС; $P_i(tG)$ – вероятность появления i-го состояния ТС при заданных условиях эксплуатации; n – число возможных состояний ТС; t – выбранный интервал времени, ч (смена, месяц, год); q_i – производительность ТС, находящейся в i-м состоянии, м^3/ед. времени t; q_m – максимальная производительность ТС, м^3/ед. времени t.

Технические подсистемы подразделяются на простые и сложные. К простым относятся геотехнические комплексы с наличием жесткой связи между элементами, характерной для автомобильно-конвейерного, автомобильно-скипового и автомобильно-железнодорожного транспорта с применением эстакадно-бункерных перегрузочных пунктов. Сложные геотехнические комплексы характеризуются отсутствием жесткой связи между элементами. В карьерах работают одновременно до 10 и более забоев, от двух до восьми перегрузочных пунктов, образующих множество маршрутов различной протяженности, горно-технические системы карьеров могут сочетать рудопотоки с усреднением и без усреднения руд, независимые и смешанные грузопотоки руды и вскрыши. Грузопотоки обеспечиваются различными схемами взаимодействия горно-транспортного оборудования – последовательными (монотранспортными), комбинированными или параллельными.

Для описания надежности ТС использован биноминальный закон распределения Бернулли [32, 33], основанный на том, что каждый элемент горно-транспортного оборудования любого геотехнического комплекса может находиться в двух состояниях: работоспособном (нормальное функционирование) и отказа. Следовательно, состояние геотехнического комплекса, состоящего из нескольких параллельно работающих независимых элементов, описывается биноминальным законом распределения.

Обсуждение результатов

В целях моделирования [34, 35] процесса транспортирования горной массы на карьерах предлагается использовать схемы взаимодействия горно-транспортного оборудования с учетом современных требований к проектированию горно-технических систем:

• Последовательная схема предусматривает последовательное соединение элементов геотехнических комплексов: Э – экскаватор в забое, К – конвейер, ПР – пункт разгрузки (отвал, рудный склад, бункер и т.п.). Этот вариант наиболее распространен при использовании непрерывного транспорта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

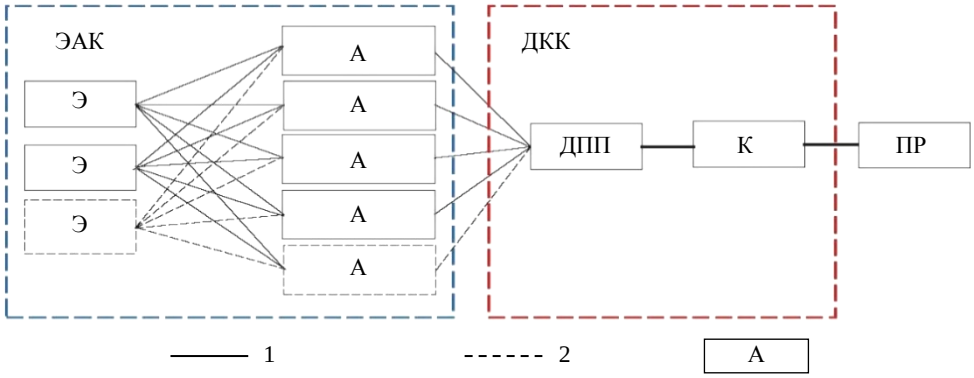


Рис.1. Разветвленная схема взаимодействия элементов геотехнических комплексов ТС с частичным резервированием

1 – основное оборудование; 2 – резервное оборудование; А – автосамосвал

Последовательная схема характерна тем, что при отказе одного из элементов весь геотехнический комплекс становится неработоспособным, а надежность такой схемы имеет вид:

$$W_{\text{ТС}} = \prod_{i=1}^{n} k_{\text{гi}} / k_{\text{тгi}},$$

где n – количество машин в геотехническом комплексе; $k_{\text{гi}}$ – коэффициент готовности i-го элемента комплекса оборудования; $k_{\text{тгi}}$ – коэффициент технической готовности i-го элемента комплекса оборудования.

• Схема с частичным резервированием применяется при разработке рыхлых и скальных пород и сочетании работающих выемочно-погрузочных и транспортных машин, чаще всего при циклично-поточной технологии (рис.1). В данной схеме элементы ДКК и ПР работают по последовательной схеме, ЭАК состоит из технологических звеньев с параллельно работающими элементами, что обеспечивает работоспособность при одновременной работе разного числа экскаваторов и автосамосвалов, поддерживающих определенную техническую эффективность ТС.

В этом случае надежность ТС примет вид:

$$W_{\text{ТС}} = \prod_{l=1}^{n} k_{\text{гl}} / k_{\text{тгl}} \sum_{i=1}^{m} N_m^i k_{\text{гэ}}^i (1-k_{\text{гэ}})^{m-i} \left[\sum_{j=1}^{\beta i} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} Q_j + \sum_{j=\beta i+1}^{s} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} Q_i \right],$$

где n – количество транспортных звеньев в ТС; l – количество оборудования ДКК; m, s – число экскаваторов и автосамосвалов (либо железнодорожных составов), составляющих ЭАК; $k_{\text{гl}}$ – коэффициент готовности l-го элемента (оборудования) ДКК; $k_{\text{гэ}}$, $k_{\text{га}}$ – коэффициент готовности экскаваторов и автосамосвалов, составляющих ЭАК; β – коэффициент, определяющий соотношение между элементами в процессах (комплексах), в данном случае $\beta = s/m$; Q_i, Q_j – эффективность отдельных состояний системы, когда работоспособны i и j элементы погрузочных и транспортных процессов; N_m^i, N_s^j – количество сочетаний, соответственно m по i и s по j.

Как показывает опыт эксплуатации, устойчивость грузопотока, организованного автомобильно-конвейерным транспортом, во многом зависит от внезапных отказов ДКК, которые дестабилизируют работу сборочного автотранспорта и снижают надежность ТС. Повышение надежности ТС и сокращение простоев автосамосвалов возможно путем организации работы сборочного автотранспорта по магистральной схеме. Это позволяет осуществить резервирование всей ТС, но принятие организационных решений в этом случае должно основываться на технико-экономической оценке.

• Резервированная схема взаимодействия горно-транспортного оборудования предусматривает наличие определенного количества машин на каждом участке грузопотока. На действующих и проектируемых карьерах этот вариант наиболее распространен при применении автомобильного (А) и железнодорожного (Ж) транспорта, работающих как параллельно, так и в комбинации друг с другом (в случае непосредственной перегрузки горной массы из автосамосвалов в думпкары) (рис.2).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 90-97
© А.В.Глебов, В.Л.Яковлев, 2026

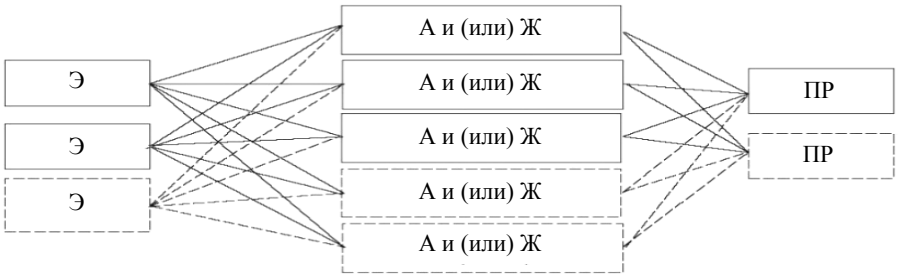


Рис.2. Схема взаимодействия элементов ТС с полным резервированием

Данная схема организации грузопотока в карьере позволяет обеспечить надежность ТС при выходе из строя некоторых участвующих в процессе работы машин. Однако при отказе машин в различных звеньях техническая эффективность не остается постоянной и определяется тем количеством оборудования, которое работает в данный период времени.

На примере работы ЭАК по доставке горной массы из карьера на внешний отвал и (или) рудный склад на поверхности модель надежности ТС примет следующий вид:

$$W_{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{m} N_m^i k_{\text{гэ}}^i (1-k_{\text{гэ}})^{m-i} \left\{ \sum_{j=1}^{\beta i} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_t + \right.\right.$$
$$\left. + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_j \right] + \sum_{j=\beta i+1}^{s} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_t + \right.$$
$$\left.\left. + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_j \right] \right\},$$

где m, s, z – количество экскаваторов, автосамосвалов и бульдозеров в выемочно-погрузочном, транспортном и отвальном (складирование) процессах; $k_{\text{гэ}}$, $k_{\text{га}}$, $k_{\text{го}}$– коэффициенты готовности экскаваторов, автосамосвалов и бульдозеров в выемочно-погрузочном, транспортном и отвальном (складирование) процессах; α, β – коэффициенты, определяющие соотношение между элементами в смежных процессах (экскавация, транспортирование и отвалообразование (складирование), в данном случае $\beta = s/m$, $\alpha = z/s$; Q_t – эффективность отдельных состояний системы, когда работоспособны t элементы выемочно-погрузочного, транспортного и отвального процессов; N_z^t – количество сочетаний z по t.

• Аккумулирующая схема взаимодействия горно-транспортного оборудования предусматривает аккумулирующие элементы (склады, оборудование, сооружения) как особый вид взаимосвязи между отдельными технологическими процессами (подготовка горной массы к выемке, выемочно-погрузочные работы, транспортирование, отвалообразование и складирование). Схема применяется при автомобильном, железнодорожном, конвейерном и других видах транспорта, главным образом при их различных комбинациях. В качестве аккумулирующих складов, оборудования, сооружений служат запас взорванной горной массы в забое, внутрикарьерные склады пород и руд, бункеры-накопители и т.п.

Рассмотрим данную схему на примере железнодорожного транспорта, где в качестве аккумулирующего элемента выступает развал горной массы (РГМ) в забое, подготовленный к выемке буровзрывным способом (рис.3).

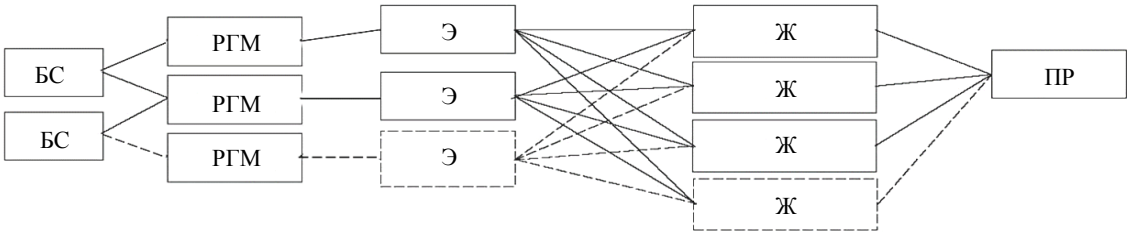


Рис.3. Аккумулирующая схема взаимодействия горно-транспортного оборудования геотехнических комплексов горно-технической системы

БС – буровой станок

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В данной схеме аккумулирующие элементы служат соединительными звеньями в технологической цепи по извлечению и доставке руды на рудный склад, вскрышных пород на отвалы. При достаточной емкости аккумулирующих элементов недостаточная надежность геотехнических комплексов, работающих до них, может не оказать какого-либо влияния на надежность грузопотока в целом. Взаимосвязь предыдущих процессов (бурение и взрывание массива горных пород) и обеспечивающих их геотехническими комплексами с последующими заключается в постоянном обеспечении их необходимым фронтом работ. Если обозначить вероятность обеспечения требуемым фронтом работ геотехнических комплексов, функционирующих после аккумулирующих элементов, через γ, то модель надежности ТС примет следующий вид:

$$W_{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{m} N_m^i \gamma k_{\text{гэ}}^i (1-\gamma k_{\text{гэ}})^{m-i} \left\{ \sum_{j=1}^{\beta_2 i} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_t + \right.\right.$$
$$\left. + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_j \right] + \sum_{j=\beta_2 i+1}^{s} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_t + \right.$$
$$\left.\left. + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_j \right] \right\}.$$

• Комбинированные схемы взаимодействия горно-транспортного оборудования ТС представляют собой различные сочетания рассмотренных схем. В них нередко наряду с несколькими выемочно-погрузочными машинами и многими разгрузочно-приемными пунктами принимают участие два, три и более видов транспорта, например комбинированная схема автомобиль – конвейер – железнодорожный транспорт – отвал (рис.4). Комбинации рассмотренных схем грузопотоков и модели их надежности весьма различны и непостоянны, поэтому моделирование необходимо в каждом конкретном случае.

Схема (рис.4) подразумевает следующий вариант организации грузопотоков в карьере. С верхних горизонтов карьера горная масса вывозится непосредственно из забоев до пункта разгрузки железнодорожным транспортом, с нижних горная масса поступает в пункты приема и разгрузки через перегрузочные внутрикарьерные склады. В технологических процессах участвует следующее оборудование: буровое, выемочно-погрузочное, автотранспортное, перегрузочное, железнодорожного транспорта, приемо-разгрузочное. В качестве аккумулирующих устройств служит запас взорванной горной массы в забоях и накопление ее на перегрузочных складах, которые делят грузопоток на три части.

При рассматриваемой системе общее звено для обоих случаев – железнодорожный транспорт и разгрузочные пункты. Железнодорожный транспорт в данном случае используется с экскаваторами на перегрузке, а также с работающими в забоях верхних горизонтов карьера. Но работа забойных и перегрузочных экскаваторов имеет существенные отличия.

На работу экскаваторов на перегрузке влияет работа предыдущих звеньев технологической цепи. Экскаваторы в забоях верхних горизонтов карьера не связаны с работой предыдущих звеньев системы и при обеспеченности взорванной горной массой работают независимо. Это принципиальное отличие вызывает некоторые особенности в составлении модели надежности ТС, организованной по комбинированной схеме.

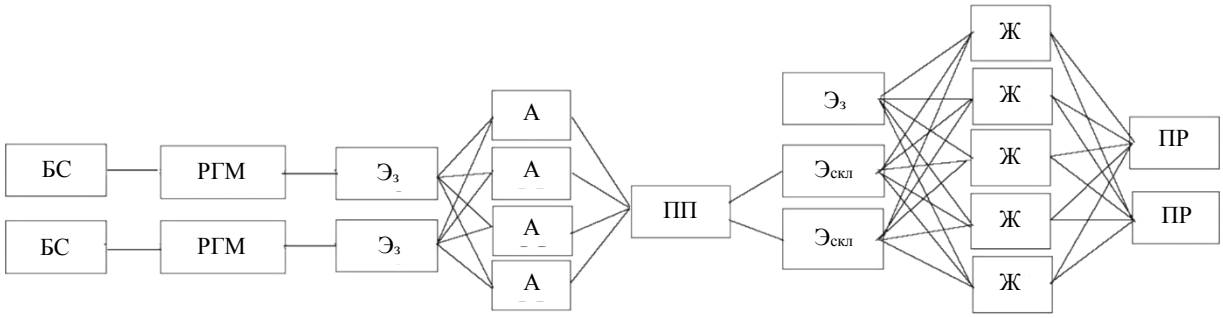


Рис.4. Комбинированная схема взаимодействия горно-транспортного оборудования геотехнических комплексов горно-технической системы карьера

$Э_з$ – экскаватор в забое; $Э_{скл}$ – экскаватор на складе; ПП – перегрузочный пункт (склад)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Математическая модель надежности в данном случае имеет следующий вид:

$$W_{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{f} N_f^g k_{\text{гф}}^g (1-k_{\text{гф}})^{f-g} \sum_{i=1}^{m} N_m^i (\gamma k_{\text{гэ}}^j)^i (1-\gamma k_{\text{гэ}})^{m-i} \left\{ \sum_{j=1}^{\beta(i+g)} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \times \right.$$
$$\times \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_j \right] + \sum_{j=\beta_2 i+1}^{s} N_s^j k_{\text{га}}^j (1-k_{\text{га}})^{s-j} \times$$
$$\left. \times \left[\sum_{t=1}^{\alpha j} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_t + \sum_{t=\alpha j+1}^{z} N_z^t k_{\text{го}}^t (1-k_{\text{го}})^{z-t} Q_i \right] \right\},$$

где m, s, z, f – число экскаваторов, автосамосвалов, машин в пунктах разгрузки и работающих на верхних горизонтах; g – число работоспособных экскаваторов на верхних горизонтах; $k_{\text{гф}}$ – коэффициент готовности экскаваторов, работающих на верхних горизонтах.

Заключение

Математические модели надежности грузопотоков, формируемых ТС горно-технической системы карьера, учитывают зависимость между надежностью системы и эксплуатационной надежностью составляющего ее горно-транспортного оборудования при различных схемах взаимодействия. Приведенные зависимости могут применяться для моделирования как в процессе проектирования горно-технических систем карьера, так и в процессе анализа надежности отдельных схем транспортирования горной массы и ТС в целом.

При помощи разработанных моделей надежности могут быть решены следующие основные задачи:

– оценка и сравнение надежности различных транспортных схем при проектировании карьера и выбор варианта технического решения, максимально удовлетворяющего требованиям надежности;

– исследование влияния надежности отдельных машин при различном их взаимодействии на надежность транспортной схемы или всей ТС.

Результаты исследования позволяют с использованием имитационного моделирования оценить целесообразность различных мероприятий повышения надежности машин и определить их оптимальную надежность, в том числе:

– оптимальное количество горно-транспортного оборудования в ТС, обеспечивающего грузопоток горной массы в карьере, начиная с процесса подготовки до пунктов разгрузки на дневной поверхности;

– влияние емкости аккумулирующих элементов на надежность транспортной схемы и ТС в целом, в результате чего может быть выявлена оптимальная емкость перегрузочных пунктов, усреднительных складов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлев А.Г. и др.* Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 6. С. 85-97. DOI: 10.15372/FTPRPI20240610

2. *Яковлев В.Л.* Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2019. 284 с. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311

3. *Paricheh M., Osanloo M.* Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, 5-7 October 2016, Istanbul, Turkey. Istanbul: AGRO ARGE Danışmanlık San. ve Tic. A.Ş., 2016. № CAMI2016-34.

4. *Moniri-Morad A., Pourgol-Mohammad M., Aghababaei H., Sattarvand J.* A methodology for truck allocation problems considering dynamic circumstances in open pit mines, case study of the Sungun copper mine // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2019. Vol. 34. № 4. P. 57-65. DOI: 10.17794/rgn.2019.4.6

5. *Kamrani A., Pourrahimian Y., Askari-Nasab H.* In-Pit Crushing and Conveying Systems in Long-term Open Pit Mine Planning – Literature Review // MOL Report Ten – 2021/2022. Edmonton: University of Alberta, 2022. P. 21-37.

6. *Afrapoli A.M., Tabesh M., Askari-Nasab H.* A multiple objective transportation problem approach to dynamic truck dispatching in surface mines // European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 276. Iss. 1. P. 331-342. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.01.008

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

8. *Воронов Ю.Е., Воронов А.Ю., Дубинкин Д.М., Максимова О.С.* Сравнительная оценка качества функционирования действующих и роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Уголь. 2023. № 11. С. 65-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71

9. *Воронов А.Ю., Хорешок А.А., Воронов Ю.Е. и др.* Оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 2 (148). С. 19-26. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-19-26

10. *Бурмистров К.В., Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Багдасарян М.А.* Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 7. С. 29-44. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

11. *Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В.* Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 86-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94

12. *Dindarloo S.R., Osanloo M., Frimpong S.* A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. № 3. P. 209-219.

13. *Nehring M., Knights P.F., Kizil M.S., Hay E.* A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 205-214. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.12.026

14. *Комленович Д.* Многокритериальный подход к выбору горного оборудования // Горное дело. 2017. № 2 (12). С. 10-19, 33-41.

15. *Moniri-Morad A., Sattarvand J.* A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks // Journal of Engineering and Applied Science. 2023. Vol. 70. № 103. DOI: 10.1186/s44147-023-00272-y

16. *Jakkula B., Mandela G.R., Chivukula S.M.* Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of Load Haul Dumpers (LHDs): a case study // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 504-515. DOI: 10.1007/s13198-021-01154-3

17. *Хажиев В.А.* Оценка результативности системы эксплуатации оборудования технологического комплекса горнодобывающего предприятия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 3 (151). С. 64-74. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-64-74

18. *Зырянов И.В.* Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова, 2006. 40 с.

19. *Агафонов О.А., Афонина Н.Б.* Уточнение методов расчета грузопотоков конвейерных транспортных систем угольных шахт // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 89-94. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-89-94

20. *Волокитин А.Н., Наумов К.С., Бурмистров К.В. и др.* Выбор комплекса горнотранспортного оборудования для карьеров по добыче известняка в сложных горнотехнических условиях // Рациональное освоение недр. 2021. № 5. С. 59-65. DOI: 10.26121/RON.2021.72.91.007

21. *Насиров У.Ф., Заиров Ш.Ш., Каримов Ш.В.* Исследование и оценка технологического автотранспорта для эффективной транспортировки горной массы в глубоких карьерах // Уголь. 2023. № 12. С. 67-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-67-72

22. *Воронов А.Ю., Хорешок А.А., Воронов Ю.Е. и др.* Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 92-98. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98

23. *Yarmuch J., Epstein R., Cancino R., Peña J.C.* Evaluating crusher system location in an open pit mine using Markov chains // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 24-37. DOI: 10.1080/17480930.2015.1105649

24. *Paricheh M., Osanloo M.* Concurrent open-pit mine production and in-pit crushing-conveying system planning // Engineering Optimization. 2020. Vol. 52. Iss. 10. P. 1780-1795. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1678150

25. *Paricheh M., Osanloo M., Rahmanpour M.* A heuristic approach for in-pit crusher and conveyor system's time and location problem in large open-pit mining // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. Vol. 32. Iss. 1. P. 35-55. DOI: 10.1080/17480930.2016.1247206

26. *Заляднов В.Ю.* Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы открытой геотехнологии на основе интегрального показателя горных возможностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2024. Т. 22. № 2. С. 5-13. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-5-13

27. *Patterson S.R., Kozan E., Hyland P.* Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 262. Iss. 2. P. 759-770. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.081

28. *Бурмистров К.В., Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Юсупов М.Э.* Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 12. С. 76-96. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223

29. *Bakhtavar E., Mahmoudi H.* Development of a scenario-based robust model for the optimal truck-shovel allocation in open-pit mining // Computers & Operations Research. 2020. Vol. 115. № 104539. DOI: 10.1016/j.cor.2018.08.003

30. *Черных В.Г., Отроков А.В., Гринько Д.А. и др.* Определение параметров надежностно-ориентированного технического обслуживания автосамосвалов угольного разреза // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 2 (178). С. 50-58. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-50-58

31. *Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю.* Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. Вып. 3 (43). С. 74-77. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-74-77

32. *Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Тимохин А.В.* Методика планирования экскаваторных работ в карьере на основе компьютерного моделирования // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 75-80. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-75-80

33. *Яковлев А.М., Кантемиров В.Д., Титов Р.С.* Методика оценки фронтов горных работ глубоких карьеров на основе ГГИС моделирования рабочей зоны // Проблемы недропользования. 2023. № 1 (36). С. 41-52. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.041

34. *Журавлев А.Г., Кардашин Е.Д.* Моделирование грузопотоков при функционировании дробильно-конвейерного комплекса карьера // Проблемы недропользования. 2024. № 4 (43). С. 6-15. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.006

35. *Cheban A.Y., Khrunina N.P.* Intensification of Open Mining Operations with a Small Distance of Transportation of Rock Mass // International Journal of Engineering Research in Africa. 2018. Vol. 38. P. 100-114. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.38.100

***Авторы*: Андрей Валерьевич Глебов,** *д-р техн. наук, заместитель директора по научным вопросам* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *glebov@igduran.ru, https://orcid.org/0000-0001-5039-8422*, **Виктор Леонтьевич Яковлев,** *д-р техн. наук, советник РАН, главный научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5860-9626*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0