ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-2):71-83
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.012:658.5:622.68 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_71

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРПОРАТИВНОГО ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Бояндинова[1], Ж.А. Адилханова[1], О.Н. Ткаченко[1]

[1] Филиал РГП «НЦ КПМС» МПС РК «Институт горного дела им. Д.А. Кунаева», Алматы, Казахстан, e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru

Аннотация: Представлено методическое обеспечение корпоративного оперативного планирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса с применением методов имитационного моделирования. Основная трудность традиционных методов планирования состоит в необходимости согласования горно-геометрических и горно-геологических параметров с производственной мощностью применяемого горно-транспортного оборудования, а также отсутствие достаточной оперативности оптимизации при их изменениях. Оценка потенциала горно-транспортного комплекса должна осуществляться с применением методов, позволяющих объективно и максимально точно учитывать влияние таких факторов. Предлагаемый подход к планированию работы горно-транспортного комплекса осуществляется в рамках технологически стабильных периодов с применением методов имитационного моделирования. Это способствует повышению достоверности планирования и достижению максимальной экономической эффективности функционирования геотехнологического комплекса карьера. В процессе имитационного моделирования работы сложных горно-транспортных систем обеспечивается детальный и последовательный учет всех операций, входящих в моделируемый процесс. Пошагово фиксируется состояние каждого элемента системы, отслеживается продолжительность их работы и простоя. Помимо этого собираются данные, характеризующие функционирование системы в целом. Такой подход позволяет выявить качественное и количественное влияние отдельных элементов на конечные результаты работы комплекса и оценить эффективность выбранного варианта организации взаимодействия горно-транспортного оборудования с технологической точки зрения. Система позволит эффективно планировать горно-транспортные работы в оперативном режиме с полной загрузкой производственных мощностей, учитывать большое количество взаимосвязанных факторов, существенно влияющих на работу горно-транспортных систем карьера, а также обеспечит оперативность оценки эффективности получаемых вариантов планирования.

Ключевые слова: геотехнология, открытые горные работы, имитационное моделирование, оптимизация, корпоративное планирование, экскаваторно-автомобильно-конвейерный, методическое обеспечение, эффективность, горно-транспортный комплекс.

Для цитирования: *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А., Ткаченко О. Н.* Методическое обеспечение корпоративного оперативного планирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса на базе имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 71–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_71.

Methodical support for corporate operational planning of an excavator-truck-conveyor complex based on simulation modeling

A.A. Boyandinova[1], Zh.A. Adilkhanova[1], O.N. Tkachenko[1]

[1] Institute of Mining named after D.A. Kunayev, Branch of the «NC CPMS RK» RSE of the Ministry of Industry and Construction of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru

Abstract: In the article the methodical support for corporate operational planning of the excavator-truck-conveyor complex using simulation modeling methods is represented. The main difficulty with traditional planning methods lies in the need to align mining-geometric and mining-geological parameters with the production capacity of the mining and transport equipment used, as well as the lack of sufficient optimization efficiency when these parameters change. Assessing the potential of the mining and transport system should be carried out using methods that allow for an objective and accurate consideration of the impact of such factors. The proposed approach to planning the operation of the mining and transport system is implemented within technologically stable periods using simulation modeling methods. This contributes to increased planning reliability and the achievement of maximum economic efficiency in the open pit's geotechnical system. Simulation modeling of complex mining and transport systems ensures a detailed and consistent accounting of all operations within the modeled process. The status of each system element is recorded step by step, and their operation and downtime are monitored. In addition, data characterizing the functioning of the system as a whole is collected. This approach allows for the identification of the qualitative and quantitative impact of individual elements on the final results of the system's operation and the evaluation of the effectiveness of the chosen option for organizing the interaction of mining and transport equipment from a technological perspective. The system will enable efficient planning of mining and transport operations in real-time, with full capacity utilization, taking into account a large number of interrelated factors that significantly impact the operation of open pit mining and transport systems, and will also ensure prompt evaluation of the effectiveness of the resulting planning options.

Key words: geotechnology, surface mining, simulation modeling, optimization, corporate planning, excavator-truck-conveyor, methodical support, efficiency, mining and transport complex.

For citation: Boyandinova A. A., Adilkhanova Zh. A., Tkachenko O. N. Methodical support for corporate operational planning of an excavator-truck-conveyor complex based on simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):71-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_71.

Введение

На любом производственном объекте, в том числе на горнодобывающем предприятии, сосредоточено значительное количество человеческих и материальных ресурсов, находящихся в тесной взаимосвязи. В связи с этим особенно важно уделять внимание вопросам оперативного и текущего планирования, а именно выбору оптимальных методов и средств управления производственным процессом в течение месяца, недели, суток, смены. Основная цель оперативного планирования и управления заключается в обеспечении слаженной

и равномерной работы всех производственных подразделений для своевременного выполнения производственных задач и снижения себестоимости выпускаемой продукции.

Система планирования горных работ на карьерах находится в тесной взаимосвязи с системой управления ими и включает три основных уровня: перспективное, текущее и оперативное планирование. Наиболее трудно реализуемым и требующим наивысшей степени точности, а также в наибольшей степени ответственным является сменное оперативное планирование. Его особенность заключается в необходимости максимальной согласованности и взаимоувязки систем планирования и управления горными работами. При этом важно учитывать возможные колебания и необходимость корректировки технологических процессов в карьере, вызванные внеплановыми простоями горного и транспортного оборудования, изменениями горно-геологических условий и другими факторами. Основной проблемой традиционных методов планирования всегда являлась, и остается таковой по настоящее время, взаимоувязка горно-геометрических и горно-геологических параметров с производительной мощностью используемого горно-транспортного оборудования.

В рамках оперативного планирования необходимо учитывать количество, типы и расположение основного технологического оборудования в карьере, график проведения ремонтных работ, а также нормативные параметры исходя из соблюдения безопасности добычных работ [1].

На глубоких карьерах со сложными геологическими условиями конвейерный транспорт приобретает все возрастающее значение [2 — 4]. Он эффективно используется в сочетании с другими видами транспорта цикличного действия. Для выполнения заданных объемов работ с использованием комбинированного транспорта необходимо решить ряд задач по обеспечению слаженной, бесперебойной и эффективной работы сочетаемых видов транспорта [5 — 7]. При этом наиболее уязвимым элементом является недостаточный учет взаимосвязи между технологическими параметрами горных работ и производственными показателями [8 — 10]. Эффективное взаимодействие конкретно рассматриваемого горного и транспортного оборудования предполагает соответствующую производительность, которая в своем количественном выражении может быть равна, выше либо ниже намечаемых объемов горных работ. Анализ потенциала горно-транспортного комплекса должен проводиться с использованием методов, обеспечивающих объективный и максимально достоверный учет влияния таких факторов, как организация взаимодействия горного и транспортного оборудования, их размещение по горизонтам карьера и на отвалах и др. Кроме того, экономическая оценка анализируемых вариантов должна проводиться непосредственно в процессе горно-геометрического анализа и служить основой для окончательного выбора оптимального варианта на данном этапе исследований и проектирования карьеров. В связи с этим особое значение приобретают вопросы имитационного моделирования внутрикарьерных грузопотоков и разработки алгоритмов их оперативного управления на моделях. Они занимают ключевое место среди задач, связанных с имитацией работы горно-транспортных систем карьеров. Разработка и внедрение систем имитационного моделирования, планирования и управления экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса на основе достижений современных компьютерных технологий и технических средств

позволит успешно решить эти сложные вопросы.

Методы

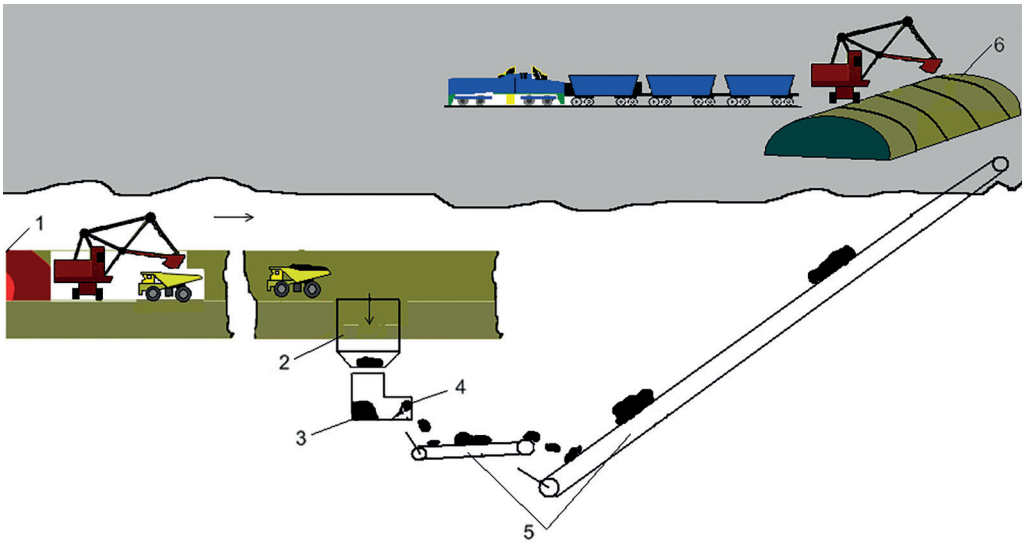
Проведенный обзор литературы и существующих подходов к разработке систем планирования и управления технологическим комплексом карьера показал, что наиболее перспективным направлением дальнейшего их развития является корпоративное управление всем геотехнологическим комплексом карьера. Эффективное развитие производства невозможно без совершенствования его организации, достижения максимальных конечных результатов при минимальных затратах на техническое перевооружение и рационального использования материальных и трудовых ресурсов [11—13]. Рациональное управление режимом и условиями эксплуатации способно значительно повысить эффективность работы технологического комплекса, снизить себестоимость продукции и обеспечить успешную реализацию новой, инновационно-ориентированной стратегии в горнодобывающей промышленности [14—16].

В то же время именно требования к качеству управления напрямую формируют и специфику планирования, поскольку без гибкой и адаптивной модели планирования даже самое эффективное управление не может обеспечить устойчивость производственных процессов [17]. Поэтому ключевой проблемой становится необходимость согласования горно-геометрических и горно-геологических параметров с производственной мощностью используемого горно-транспортного оборудования. Дополнительные трудности создает и недостаточная оперативность оптимизационных процедур при изменении этих параметров, что и остается одним из основных ограничений традиционных методов планирования.

Под корпоративным управлением в данном случае понимается управление и планирование производства на горнодобывающем предприятии, адекватно учитывающее корпоративные интересы структурных подразделений, которые обеспечивают реализацию основных технологических процессов в рамках единой системы управления геотехнологическим комплексом, и позволяющее организовать совместные меры, направленные на достижение единых целей и задач предприятия [18].

Предлагаемый подход к корпоративному оперативному планированию ориентирован на интегрированный учет реальных горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации карьера, что обеспечивает возможность формирования оптимального варианта функционирования горно-транспортного комплекса. Следует отметить, что механизмы отражения влияния указанных условий не получили развернутого представления в рамках данной статьи, поскольку они подробно рассмотрены в предшествующих публикациях авторов. В предлагаемой методологии данные параметры включены в общую структуру корпоративного планирования как базовые компоненты, учитываемые в совокупности с конфигурацией заранее выбранного горно-транспортного оборудования.

Методологической основой подхода является применение имитационного моделирования процессов функционирования горно-транспортных систем карьера, охватывающего автомобильный, железнодорожный и конвейерный транспорт. Такой подход позволяет обеспечить комплексный и адекватный учет взаимодействия горно-геометрических и горно-геологических характеристик карьерного пространства с организационно-технологическими и техническими параметрами транспортных подсистем.



1 – забойный участок; 2 – приемный бункер; 3 – дробильное устройство; 4 – руда;
5 – конвейерная линия; 6 – перегрузочный склад

Укрупненная схема организации работ с использованием автомобильно-конвейерного транспорта
A comprehensive scheme of the organization of work using truck and conveyor transport

Показатели технического состояния оборудования и графики его технического обслуживания и ремонта при этом рассматриваются как самостоятельные, но равнозначно значимые элементы корпоративного планирования. Их подробное изложение в настоящей работе ограничено во избежание дублирования ранее опубликованных материалов, в которых данные аспекты были освещены в полном объеме [18].

Ключевой целью моделирования является оптимизация функционирования горно-транспортного комплекса за счет выявления и устранения потенциальных ограничений («узких мест») уже на стадии планирования, определения рациональной схемы организации горно-транспортных работ, а также минимизации простоев основного технологического оборудования.

Реализация указанной задачи способствует повышению эффективности и устойчивости работы всего горно-транспортного комплекса.

На первоначальном этапе планирования заданный промежуток времени разбивается на технологически стабильные периоды, в течение которых работа горно-транспортного комплекса может считаться относительно непрерывной, однородной и без существенных изменений. Основной принцип предлагаемого подхода заключается в том, что планирование горно-транспортных работ должно осуществляться с адекватным учетом корпоративных интересов всех структурных подразделений, обеспечивающих реализацию основных технологических процессов, в рамках единой системы управления геотехнологическим комплексом [18].

Укрупненная схема организации работ во внутрикарьерном пространстве с использованием автомобильно-конвейерного транспорта представлена на рисунке.

В забоях на добыче работают экскаваторы с автомобильной откаткой добытой горной массы. Доставка осуществ-

ляется на внутрикарьерный перегрузочный склад, который оснащен приемным бункером и дробильной установкой. Измельченная горная масса с дробильной установки поступает на конвейерную ленту и поднимается на поверхность, откуда транспортируется на обогатительную фабрику или в отвал конвейерами либо железнодорожным транспортом в зависимости от выбранного вида транспорта.

Основной принцип реализации корпоративного планирования геотехнологических систем карьеров с применением автомобильно-конвейерного транспорта предусматривает в процессе календарного планирования в рамках каждого устанавливаемого технологически стабильного периода оптимизировать работу горно-транспортного комплекса карьера по наиболее существенным факторам. Оптимизация работы комплекса осуществляется с помощью системы имитационного моделирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса.

Модели разрабатываются на основе теоретических законов и принципов, а также на базе четкого понимания порядка и последовательности операций, происходящих в исследуемой системе. Таким образом, они представляют собой подробное описание системы, уровень детализации которого определяется требуемой достоверностью результатов [19]. Полученное логико статистическое описание может быть проанализировано посредством компьютерных экспериментов и, таким образом, выступает в роли лабораторной версии реального объекта.

Моделирование работы автомобильного конвейерного транспорта предусматривает воспроизведение движения конвейерных лент и технологических автосамосвалов по автодорогам карьера. В процессе моделирования накапливаются статистические данные по производительности, расходу топлива и электроэнергии, износу шин и конвейерного полотна, на основе которых в конечном итоге рассчитываются затраты на выемку, транспортирование и складирование горной массы.

Основной характеристикой непосредственно самого процесса выемочно-погрузочных работ является длительность обслуживания (погрузки-разгрузки) транспортных средств, характеризуемая математическим ожиданием, дисперсией и функцией распределения. Описание выемочно-погрузочных работ на основе статистических оценок позволяет достаточно точно моделировать исследуемый процесс на основе численных оценок продолжительности процесса выемочно-погрузочных работ, приемлемых для использования при имитационном моделировании.

Точность воспроизведения движения транспорта цикличного действия в процессе имитационного моделирования горнотранспортной системы карьера представляет собой одну из важнейших характеристик, определяющих адекватность и достоверность результатов исследования, выполняемого на имитационной модели. Это связано в первую очередь с тем, что процесс транспортирования груженного горной массой транспорта в пункт разгрузки и обратное перемещение порожнего транспорта к пунктам погрузки в технологическом процессе занимает значительную долю времени [18]. Кроме того, скорость и время движения транспортных средств являются важнейшими эксплуатационными показателями процесса горно-транспортных работ, определяющими характер движения по отдельным участкам транспортных коммуникаций и время полного оборота.

Факторы, учитываемые при моделировании, можно разделить на две группы. К первой относятся факторы, которые,

взаимодействуя с другими факторами, сохраняют неизменными свои качественные и количественные характеристики (длина блок-участков транспортной сети и автотрассы, количество и параметры горного и транспортного оборудования и т.п.) [19]. Исходные данные по таким факторам задаются постоянными величинами соответственно тем значениям, которые они имеют в реальности. Вторая группа охватывает факторы, являющиеся производными от первых и непрерывно изменяющие свои значения в процессе взаимодействия с другими факторами (время погрузки и разгрузки, время движения подвижных средств по участкам, организация и интенсивность потоков). Таким образом, ключевая задача учета влияния взаимодействующих факторов на имитационной модели сводится практически к выбору рациональных способов воспроизведения действия факторов, характеризующихся непостоянством своих качественных и количественных значений, в том числе и случайных факторов.

Результаты исследований

Основополагающими принципами моделирования работы горно транспортного комплекса являются ориентированность на рациональное соотношение горного и транспортного оборудования, а также обеспечение равномерной загрузки каждой единицы оборудования в единицу времени работы. При этом парк погрузочного и транспортного оборудования должен быть сбалансирован по таким показателям, как: количество экскаваторов и автосамосвалов, объем ковша экскаватора и кузова машины, производительность дробильной установки и конвейера и др.

В числе ключевых принципов моделирования работы горно транспортного комплекса выделяются: обеспечение скоординированной работы оборудования и минимизация необоснованных простоев единиц техники. Возможности комплекса имитационного моделирования позволяют не только определять параметризацию маршрутов, статистику простоев, но также оперативно и достоверно выявлять причины простоев: иррациональная организация работы горно-транспортного комплекса, наличие узких мест в структуре транспортных коммуникаций, недостаточное количество транспорта и прочее. На основании полученных данных принимать конструктивные решения по оптимизации организации работы горно-транспортного комплекса.

В связи со спецификой организации работы экскаваторно-автомобильно-конвейерных комплексов имитация процессов взаимодействия горного и транспортного оборудования, а также накопление текущей информации по их работе осуществляется на основе событийного подхода, однако временная точность моделирования может варьироваться в диапазоне одной минуты [18].

Укрупненно последовательность имитационного моделирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса можно представить следующим образом. Первоначально происходит формирование исходных данных — это нормативно-справочная информация по моделям горно-транспортного оборудования и их технико-экономические показатели [18, 20—22], фактические технико-технологические параметры горно-транспортного оборудования, дробильных установок и автотрассы, а также плановые показатели по объемам горно-транспортных работ. Далее осуществляется моделирование работы комплекса. Для каждой единицы оборудования осуществляется прохождение соответствующего цикла моделирования.

Другой блок представляет собой цикл моделирования экскаваторов и является одним из основных. В имитационной

модели можно установить несколько различных шагов моделирования от 1 с до 1 мин. Сначала определяется состояние каждого экскаватора. Если он находится в работе, то осуществляется подсчет отгруженной экскаватором горной массы и продолжительность его работы. При каждом прохождении данного блока с каждым последующим шагом моделирования к уже имеющемуся объему горной массы прибавляется производительность за шаг моделирования.

По такому же принципу рассчитывается время работы экскаватора:

$$V_i^э = V_{i-1}^э + \Delta V^э, \text{ м}^3,$$

$$t_i^э = t_{i-1}^э + \Delta t^э, \text{ с}, \quad (1)$$

где $V_{i-1}^э$ — ранее отгруженный экскаватором объем горной массы, м^3; $\Delta V^э$ — отгружаемый объем горной массы за один шаг моделирования, м^3; $t_{i-1}^э$ — время в работе на начало текущего шага моделирования, с; $\Delta t^э$ — продолжительность шага моделирования, с.

Если экскаватор находится в состоянии простоя, то осуществляется расчет общего времени простоя оборудования с начала моделирования:

$$t_{пр_i}^э = t_{пр_{i-1}}^э + \Delta t_{пр}^э, \text{ с}, \quad (2)$$

где $t_{пр_{i-1}}^э$ — суммарное время простоев перегружателя на начало текущего шага моделирования, с; $\Delta t_{пр}^э$ — продолжительность шага моделирования, с.

При этом причины простоя могут быть различными: плановыми или внеплановыми — в виду неверной организации работ, нехватки автосамосвалов и прочих факторов. В процессе следующего этапа — оптимизации — внеплановые простои сводятся к минимуму.

На следующем этапе производится расчет технико-экономических показателей работы или простоя экскаватора: расход электроэнергии (в режиме «холостого хода»), коэффициент занятости пунктов погрузки, стоимостные показатели и др [19, 22]. Далее цикл повторяется.

После успешного завершения одного цикла (одного шага моделирования) по экскаваторам начинается другой основной цикл — моделирование работы автосамосвалов.

При имитационном моделировании автотранспорта особое внимание уделяется воспроизведению элементов движения автосамосвалов: разгон, движение на постоянной скорости, торможение. Причем, вычисление скорости движения автосамосвала на участках трассы производится согласно тяговым характеристикам машины, а также с учетом внешних условий: параметры, профиль и качество покрытия автотрассы, вес перевозимой горной массы, погруженной экскаваторами на предыдущем цикле моделирования и т.п.

В тяговых расчетах, при вычислении скорости движения и расходе топлива автосамосвалами, учитывается их техническое состояние через коэффициент полезного действия (КПД) двигателей. Показателем качества покрытия автотрасс является удельное сопротивление качению [18].

Далее определяется состояние каждого автосамосвала, функционирующего в комплексе. Если автосамосвал находится в состоянии простоя, то аналогично формуле (2) осуществляется расчет общего времени простоя оборудования с начала моделирования, рассчитываются технико-экономические показатели простоя автосамосвала.

Если автосамосвал находится в работе, то определяется его загруженность. Если оборудование груженное, то осуществляется подсчет перевезенной транспортом горной массы и продолжительность его работы, рассчитываются технико-экономические показатели работы автосамосвала: расстояние транспортирования горной массы, средневзвешенная

высота подъема горной массы, средняя скорость движения, общий и удельный расходы топлива, показатели расхода шин автосамосвалов и др.

Если автосамосвал порожний, то определяется время движения оборудования в порожняковом направлении и рассчитываются технико-экономические показатели работы порожнего автосамосвала:

$$t_{n_i}^{ac} = t_{n_{i-1}}^{ac} + \Delta t_n^{ac}, \text{ с}, \qquad (3)$$

где $t_{n_{i-1}}^{ac}$ — суммарное время движения автосамосвала в порожняковом направлении на начало текущего шага моделирования, с; Δt_n^{ac} — продолжительность шага моделирования, с.

Необходимо отметить, что при моделировании работы автосамосвалов учитываются маневровые работы, как на пунктах погрузки, так и на пунктах разгрузки, как в груженном, так и в порожняковом направлениях.

После этого начинается цикл моделирования работы дробильной установки. Если дробильная установка находится в работе, то рассчитываются объемы работ с начала моделирования и время работы дробилки. Далее осуществляется расчет технико-экономических показателей работы дробильной установки: количество передробленной горной массы, расход электроэнергии, амортизационные затраты и др.

Если дробильная установка находится в состоянии простоя, то осуществляется расчет общего времени простоя с начала моделирования рассчитываются технико-экономические показатели простоя дробильной установки.

После начинается цикл моделирования по конвейерам. Здесь осуществляется подсчет перевезенной конвейером горной массы за определенный период времени, равный шагу моделирования. Производится расчет технико-экономических показателей работы конвейерного транспорта: расход электроэнергии, средняя высота подъема горной массы, степень выполнения плана, себестоимость транспортировки 1 т горной массы и др.

После этого осуществляется воспроизведение следующего шага моделирования, алгоритм возвращается в цикл моделирования по экскаваторам и проходит все этапы заново с накоплением показателей.

Обсуждение результатов

На основе полученных результатов моделирования система корпоративного оперативного планирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса позволит производить полномасштабный технико-экономический анализ работы всей системы и ее отдельных компонентов — звеньев и элементов.

Анализ охватывает эксплуатационные расходы, затраты на оборудование как в рабочем состоянии, так и в период простоя, а также степень загрузки горного и транспортного оборудования и транспортных коммуникаций.

На основании технико экономического анализа составляется диаграмма распределения всех учтенных затрат на эксплуатацию и поддержание работоспособности горно транспортных систем карьера.

Для каждого технологически стабильного периода в отдельности находится оптимальный вариант работы горно-транспортной системы карьера. Путем накопления оптимальных вариантов ее работы в каждый технологически стабильный период определяется оптимальный вариант работы комплекса в течение всего планируемого периода с минимальными простоями, максимальной производительностью оборудования и минимальными экономическими затратами.

Заключение

Таким образом, разработано методическое обеспечение корпоративного оперативного планирование горно-транспортных работ с применением автомобильно-конвейерного транспорта с использованием методов имитационного моделирования. Оно обеспечивает последовательное вычисление технико-экономических показателей работы горно-транспортного комплекса. В результате моделирования получают: экономические и технологические параметры функционирования каждого звена горно-транспортного комплекса за заданный период, а также показатели по автотрассе, пунктам погрузки, разгрузки и перегрузки. Реализация данного методического обеспечения позволяет создать имитационную модель, которая способствует совершенствованию организации работы технологического комплекса за счет повышения эффективности использования основного оборудования и постоянного выявления резервов повышения производительности.

Принципиальная новизна предлагаемого подхода заключается в комплексной интеграции методов планирования горно-транспортных работ, реализуемых в пределах технологически стабильных периодов, и инструментов имитационного моделирования. Это позволяет перейти от традиционных статичных схем планирования к динамическому, адаптивному управлению производственными процессами, ориентированному на максимизацию эффективности использования производственных мощностей горного предприятия.

Разработанный подход обеспечивает возможность комплексного учета множества взаимосвязанных факторов, определяющих функционирование горно-транспортных систем карьеров, включая геолого-технические, организационно-технологические, эксплуатационные и экономические параметры. Применение имитационного моделирования позволяет не только детализировать влияние каждого из этих факторов на конечные производственные показатели, но и оценивать их совокупное воздействие в условиях реальной вариативности и неопределенности производственной среды.

Существенным преимуществом является высокая оперативность и гибкость планирования: использование цифровых моделей позволяет быстро формировать и оценивать альтернативные варианты планов, прогнозировать производственные риски и оперативно корректировать текущие решения при изменении исходных условий.

Кроме того, предложенный подход служит основой для создания интеллектуальной системы оперативного планирования горнотранспортными процессами, обеспечивающей технологическую устойчивость, рост производительности и снижение издержек за счет рационального распределения ресурсов и оптимизации взаимодействия всех элементов транспортно-технологической цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boyandinova A.*, *Adilkhanova Z.* Methodological provisions for the evaluation of economic efficiency for calendar planning of technological processes taking into account flexible rationing / 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. 2019, vol. 19, pp. 415 – 422. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3/S03.053.

2. *Tomašková M.*, *Sinay J.* The use of screw conveyors in practical applications // Applied Mechanics and Materials. 2014, vol. 683, pp. 225 – 231.

3. *Parreiras T. M.*, *Rocha A. V.*, *Justino J. C. G.*, *de Cardoso Filho B. J.* True unit power factor active front end for high capacity belt conveyor systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016, vol. 52, no. 3. DOI: 10.1109/TIA.2016.2533499.

4. *Gavrishev S. E.*, *Burmistrov K. V.*, *Tomilina N. G.* Increasing the work scope of conveyor transport at mining companies // Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 1317 — 1321. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.306.

5. *Глебов А. В.* Методические принципы выбора основного оборудования структур механизации циклично-поточной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 296 — 308. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_296.

6. *Lucio J. C.*, *Senra C. T.*, *Souza A.* Paving the future — A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines / Iron Ore 2009 Conference. Perth, WA, 2009, pp. 269 — 276.

7. *Rocha A. V.*, *de Paula H.*, *dos Santos M. E.*, *de Cardoso Filho B. J.* Increasing long belt-conveyors availability by using fault-resilient medium voltage AC drives. Part II. Reliability and maintenance assessment // 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2012, pp. 1 — 8. DOI: 10.1109/IAS.2012.6374079.

8. *Vera-Burau A.*, *Alvárez-Ramírez D.*, *Sanmiquel-Pera L.*, *Bascompta M.* A Comparison of the fuel consumption and truck models in different production scenarios // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 9, article 5769. DOI: 10.3390/app13095769.

9. *Li Z.* A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining // Mining Science and Technology. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 337 — 340. DOI: 10.1016/0167-9031(90)90543-2

10. *Adams K. K.*, *Bansah K. J.* Review of operational delays in shovel — Truck system of surface mining operations / 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference. 2016, pp. 60 — 65.

11. *Nieto A.*, *Medina J. F.* Development of a socio-economic strategic risk index as an aid for the feasibility assessment of mining projects and operations // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2020, vol. 120, no. 7, pp. 433 — 450. DOI: 10.17159/2411-9717/711/2020.

12. *Mariz J. L. V.*, *Peroni R.*, *de Abreu Silva R. M.*, *Badiozamani M. M.*, *Askari-Nasab H.* A multi-objective constraint programming approach to address clustering problems in mine planning // Engineering Computations. 2024, vol. 41, no. 3, pp. 2682 — 2706. DOI: 10.1108/EC-01-2024-0046.

13. *Sobczyk E. J.*, *Galica D.*, *Kopacz M.*, *Sobczyk W.* Selecting the optimal exploitation option using a digital deposit model and the AHP // Resources Policy. 2022, vol. 78, article 102952.

14. *Aquino E. D. R.*, *Girao Sotomayor J. M.*, *Navarro-Torres V. F.* Qualification of geotechnical parameters with 3D geotechnical modelling to improve mine planning reliability // Mining Technology Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. 2024, vol. 133, no. 1, pp. 74 — 85.

15. *Tyurin A.*, *Kuvataev I.* Improving the efficiency of a mining enterprise by coordinating production processes // E3S Web of Conference. 2020, vol. 174, article 01059. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401059.

16. *Зырянов И. В.*, *Корняков М. В.*, *Непомнящих К. А.*, *Труфанов А. И.*, *Храмовских В. А.*, *Шевченко А. Н.* Сетевая платформа автоматизации прогнозирования отказов карьерных самосвалов // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 56 — 63. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-56-63.

17. *Захаров В. Н.*, *Кубрин С. С.* Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 31 — 47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

18. *Adilkhanova Zh.*, *Boyandinova A.* Concept of management system of technological processes at open pits / Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Albena, Bulgaria, 2018, pp. 191 — 196. DOI: 10.5593/sgem2018/1.3/S03.025.

19. *Boyandinova A. A.*, *Adilkhanova Z. A.* An information support for management system of technological processes at open pits / Proceedings of the 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. 2020, pp. 441 — 448. DOI: 10.5593/sgem2020/2.1/s08.057

20. *Čech J.*, *Sofranko M.* Economic projection and evaluation of mining venture // E+M Ekonomie a Management. 2018, vol. 21, no. 2, pp. 38 — 52.

21. *Topal E.*, *Ramazan S.* Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost // Journal of Coal Science and Engineering (China). 2012, vol. 18, no. 3. DOI: 10.1007/s12404-012-0316-4.

22. *Журавлев А. Г.* Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 583 — 601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601. ГИАБ

REFERENCES

1. Boyandinova A., Adilkhanova Z. Methodological provisions for the evaluation of economic efficiency for calendar planning of technological processes taking into account flexible rationing. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. 2019, vol. 19, pp. 415 — 422. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3/S03.053.

2. Tomašková M., Sinay J. The use of screw conveyors in practical applications. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 683, pp. 225 — 231.

3. Parreiras T. M., Rocha A. V., Justino J. C. G., de Cardoso Filho B. J. True unit power factor active front end for high capacity belt conveyor systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016, vol. 52, no. 3. DOI: 10.1109/TIA.2016.2533499.

4. Gavrishev S. E., Burmistrov K. V., Tomilina N. G. Increasing the work scope of conveyor transport at mining companies. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 1317 — 1321. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.306.

5. Glebov A. V. Methodological principles of equipment selection for cyclical-andcontinuous technology mechanization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 296 — 308. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_296.

6. Lucio J. C., Senra C. T., Souza A. Paving the future — A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines. *Iron Ore 2009 Conference*. Perth, WA, 2009, pp. 269 — 276.

7. Rocha A. V., de Paula H., dos Santos M. E., de Cardoso Filho B. J. Increasing long belt-conveyors availability by using fault-resilient medium voltage AC drives. Part II. Reliability and maintenance assessment. *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2012, pp. 1 — 8. DOI: 10.1109/IAS.2012.6374079.

8. Vera-Burau A., Alvárez-Ramírez D., Sanmiquel-Pera L., Bascompta M. A Comparison of the fuel consumption and truck models in different production scenarios. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 9, article 5769. DOI: 10.3390/app13095769.

9. Li Z. A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. *Mining Science and Technology*. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 337 — 340. DOI: 10.1016/0167-9031(90)90543-2

10. Adams K. K., Bansah K. J. Review of operational delays in shovel — Truck system of surface mining operations. *4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. 2016, pp. 60 — 65.

11. Nieto A., Medina J. F. Development of a socio-economic strategic risk index as an aid for the feasibility assessment of mining projects and operations. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 120, no. 7, pp. 433 — 450. DOI: 10.17159/2411-9717/711/2020.

12. Mariz J. L. V., Peroni R., de Abreu Silva R. M., Badiozamani M. M., Askari-Nasab H. A multi-objective constraint programming approach to address clustering problems in mine planning. *Engineering Computations*. 2024, vol. 41, no. 3, pp. 2682 — 2706. DOI: 10.1108/EC-01-2024-0046.

13. Sobczyk E. J., Galica D., Kopacz M., Sobczyk W. Selecting the optimal exploitation option using a digital deposit model and the AHP. *Resources Policy*. 2022, vol. 78, article 102952.

14. Aquino E. D. R., Girao Sotomayor J. M., Navarro-Torres V. F. Qualification of geotechnical parameters with 3D geotechnical modelling to improve mine planning reliability. *Mining Technology Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2024, vol. 133, no. 1, pp. 74 — 85.

15. Tyurin A., Kuvataev I. Improving the efficiency of a mining enterprise by coordinating production processes. *E3S Web of Conference*. 2020, vol. 174, article 01059. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401059.

16. Zyryanov I. V., Kornyakov M. V., Nepomnyashchikh K. A., Trufanov A. I., Khramovskikh V. A., Shevchenko A. N. Network platform for automating the prediction of failures of quarry dump trucks. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 3, pp. 56 — 63. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-56-63.

17. Zakharov V. N., Kubrin S. S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 31 — 47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

18. Adilkhanova Zh., Boyandinova A. Concept of management system of technological processes at open pits. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. Albena, Bulgaria, 2018, pp. 191 — 196. DOI: 10.5593/sgem2018/1.3/S03.025.

19. Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. An information support for management system of technological processes at open pits. *Proceedings of the 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. 2020, pp. 441 – 448. DOI: 10.5593/sgem2020/2.1/s08.057
20. Čech J., Sofranko M. Economic projection and evaluation of mining venture. *E+M Ekonomie a Management*. 2018, vol. 21, no. 2, pp. 38 – 52.
21. Topal E., Ramazan S. Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2012, vol. 18, no. 3. DOI: 10.1007/s12404-012-0316-4.
22. Zhuravlev A. G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 583 – 601. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бояндинова Асия Адылкановна[1] – д-р техн. наук, доцент,
ученый секретарь, e-mail: A.Boyandinova@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-5197-4599,
Адилханова Жанна Адилхановна[1] – канд. техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2637-4006,
Ткаченко Оксана Николаевна[1] – канд. техн. наук,
младший научный сотрудник,
e-mail: oksananecolaevna@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1372-7113,
[1] Филиал РГП «НЦ КПМС» МПС РК «Институт горного дела им. Д.А. Кунаева»,
Алматы, Казахстан.
Для контактов: Адилханова Ж.А., e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Boyandinova[1], Dr. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Scientific Secretary,
e-mail: A.Boyandinova@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-5197-4599,
Zh.A. Adilkhanova[1], Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2637-4006,
O.N. Tkachenko[1], Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher,
e-mail: oksananecolaevna@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1372-7113,
[1] Institute of Mining named after D.A. Kunayev, Branch of the «NC CPMS RK»
RSE of the Ministry of Industry and Construction of the Republic of Kazakhstan,
050046, Almaty, Kazakhstan.
Corresponding author: Zh.A. Adilkhanova, e-mail: Zhanna_mark10@mail.ru.

Получена редакцией 20.10.2025; получена после рецензии 10.11.2025; принята к печати 17.11.2025.
Received by the editors 20.10.2025; received after the review 10.11.2025; accepted for printing 17.11.2025.