

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КАРЬЕРОВ

А.Г. Журавлев

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

Аннотация: Затраты на технологический транспорт при добыче полезных ископаемых открытым способом для средних по глубине карьеров достигают 50 % от полной себестоимости добычи товарной руды, а для глубоких – превышают этот показатель. Поэтому оптимизация транспортных систем карьеров является важным элементом повышения эффективности добычи полезных ископаемых. Важнейшим элементом оптимизации является сквозной ее характер – применение оптимизации ко всем процессам на базе увязанных объективных критериев эффективности, единства и объективности исходных данных, использования разноуровневых данных: от показаний датчиков, установленных на горных и транспортных машинах, до итоговых экономических показателей по периодам. Перспективным направлением для реализации инструментов оптимизации процессов открытых горных работ и в частности транспортных систем карьеров как одной из важнейших подсистем, является сквозная цифровизация горного производства. В статье представлены результаты исследований и методологический подход к созданию методик оптимизации сложных транспортных систем на базе комплексного компьютерного моделирования как имитационного, так и экономико-математического. Предложена концепция методов оптимизации ТСК при отсутствии выраженных максимумов или минимумов функция, отражающих параметры оптимизации. Показаны возможности оптимизации транспортных систем за счет управляемых переходных процессов, установлено, что рациональная организация переходного процесса обеспечивает экономию затрат до 2 раз и более. Представлена концепция динамической модели развития транспортной системы карьера, отражающей переходные процессы в ее формировании.

Ключевые слова: транспортная система карьера, оптимизация, моделирование, цифровизация, технико-экономические показатели, переходный процесс.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075–00581–19–00, тема №0405–2019–0005.

Для цитирования: 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.

The issues of optimization parameters of quarry transport systems

A.G. Zhuravlev

The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The cost of technological transport in open-pit mining for medium-depth quarries reaches 50 % of the total cost of production of commercial ore, and for deep-exceed this figure.

Therefore, optimization of quarry transport systems is an important element in improving the efficiency of mining. The most important element of optimization is through her character the use of optimization to all linked processes on the basis of objective criteria of efficiency, unity and objectivity of the source data, using multilevel data from sensors mounted on the mining and transport machines to total economic values for processing. A promising direction for the implementation of tools for optimizing the processes of open pit mining and in particular transport systems of quarries, as one of the most important subsystems, is the end-to-end digitalization of mining production. The article presents the results of research and methodological approach to the creation of methods of optimization of complex transport systems on the basis of complex computer modeling, both simulation and economic and mathematical. The concept of TSC optimization methods in the absence of expressed maxima or minima of the parameters reflecting the optimization parameters is proposed. The possibilities of optimization of transport systems due to controlled transients are shown, it is established that the rational organization of the transition process provides cost savings of up to 2 times or more. The concept of a dynamic model of the quarry transport system development, reflecting the transition processes in its formation, is presented.

Key words: quarry transport system, optimization, modeling, digitalization, technical and economic indicators, simulation.

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the State task № 075-00581-19-00, subject № 0405-2019-0005

For citation: Zhuravlev A.G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):583-601. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

Введение

Затраты на технологический транспорт при добыче полезных ископаемых открытым способом для средних по глубине карьеров достигают 50 % от полной себестоимости добычи товарной руды (см. рис. 1), а для глубоких — превышают этот показатель. Поэтому повышение эффективности функционирования транспортных систем карьеров делает существенный вклад в снижение себестоимости добычи.

Анализ итоговых показателей работы карьера затруднен, а подчас невозможен без использования детальной информации о происходящих изменениях, особенностях технологических процессов, выполняемых реконструкциях, технических перевооружениях, динамики микро- и макроэкономических показателей. Например, по данным рис. 1, невозможно говорить об эффективности или неэф-

фективности принятых управленческих мер и технологических решений: в период возрастания глубины карьера при закономерном росте доли затрат на добычу руды затраты на транспорт снижаются, а в период стабилизации глубины, наоборот, доля затрат на добычу снижается, а на транспорт растет. Углубленный анализ фактической ситуации показал, что снижение себестоимости технологического автомобильного транспорта в 2000—2005 гг. достигнуто за счет масштабного технического перевооружения, оптимизации структуры управления технологическим транспортом, внедрением автоматизированных систем диспетчеризации у чета. Начиная с 2005 г. в связи с уходом средневзвешенной высоты подъема горной массы транспортом на большие глубины принятые меры не смогли сдерживать рост себестоимости, и, тем не менее, она в итоге на 20—40 % ниже той, которая была

бы достигнута без принятых мер оптимизации. Планомерное снижение доли затрат на добычу связан с меньшей их зависимостью от глубины ведения горных работ, а потому принятые оптимизационные и организационно-технологические меры позволили добиться планомерного их снижения.

Перспективным направлением для реализации инструментов оптимизации процессов открытых горных работ и в частности транспортных систем карьеров, как одной из важнейших подсистем, является сквозная цифровизация горного производства. Под этим подразумевается создание системы сбора, хранения и обработки информации, охватывающей все аспекты, процессы и объекты горнодобывающих предприятий от сбора данных о параметрах работы конкретных горных машин до системы поддержки принятия управленческих решений как на уровне оперативного, так и стратегического планирования.

Ключевыми условиями эффективного использования возможностей цифровизации являются доступность и комплексное использование информации разного уровня, а также использование научно обоснованных методик обработки информации, обеспечивающих формирование действительно оптимальных параметров рассматриваемого процесса или технологического комплекса в целом.

Подход к созданию таких методик — использование компьютерного моделирования рассматриваемого процесса или системы в разных видах в зависимости от количества и достоверности имеющейся информации: статистического, имитационного (в том числе с использованием так называемых «цифровых двойников» [1]), экономико-математического и др.

Незаменимость имитационного моделирования при решении вопро-

сов оптимизации транспортных систем карьеров подтверждается сложностью оценки истинных взаимосвязей горнотехнических факторов и показателей горного производства. Для примера на рис. 2 приведена динамика показателей себестоимости перевозок карьерным автотранспортом во времени для одного из действующих карьеров. Поверхностный анализ может привести к выводу, что себестоимость линейно зависит от глубины карьера. Однако если привести стоимостные показатели к одному моменту времени (с учетом инфляции), то видно, что корреляции по данному набору статистических данных не прослеживается вообще. Связано это с тем, что с глубиной меняются и производительность карьера по руде и вскрыше, и распределение горизонтов по объемам выемки, кроме того существует этапность разработки месторождения и др. факторы. Сохранение себестоимости в достаточно длительный период на одинаковом уровне для данного карьера объясняется сохранением средневзвешенной глубины перевозок с учетом наращивания разноса бортов в верхней части карьера, несмотря на уход вглубь добычных работ, а также комплексом мероприятий, позволяющих оптимизировать (сократить) текущие расходы на технологический транспорт.

Следовательно, достоверной взаимосвязи себестоимости перевозок с высотой подъема горной массы по данному (ограниченному) набору информации установить не представляется возможным. Ведение же учета в необходимом объеме потребует от горнодобывающих предприятий увеличить количество учитываемых параметров в 2–4 раза и выстроить систему оперативного доступа к этой информации специалистов всех уровней. Это приведет к значительным дополнительным расходам.

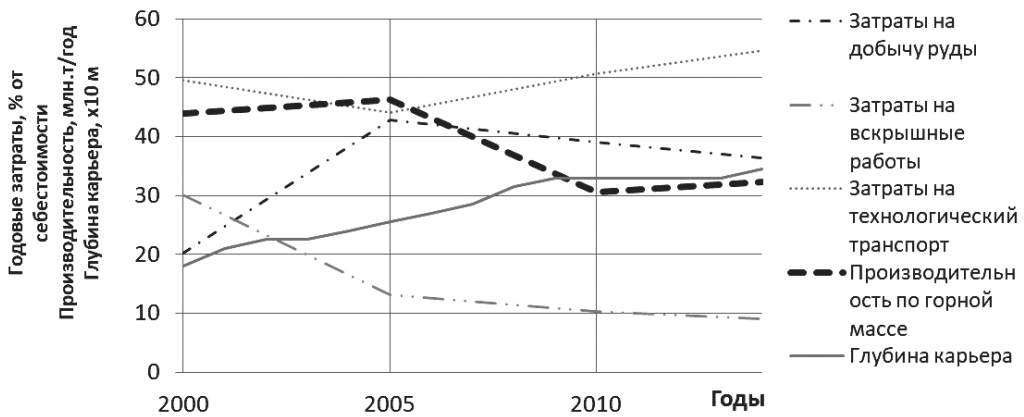


Рис. 1. Динамика структуры затрат на добычу полезного ископаемого во времени для одного из действующих карьеров

Fig. 1. Dynamics of the structure of mineral extraction costs over time for one of the existing quarries

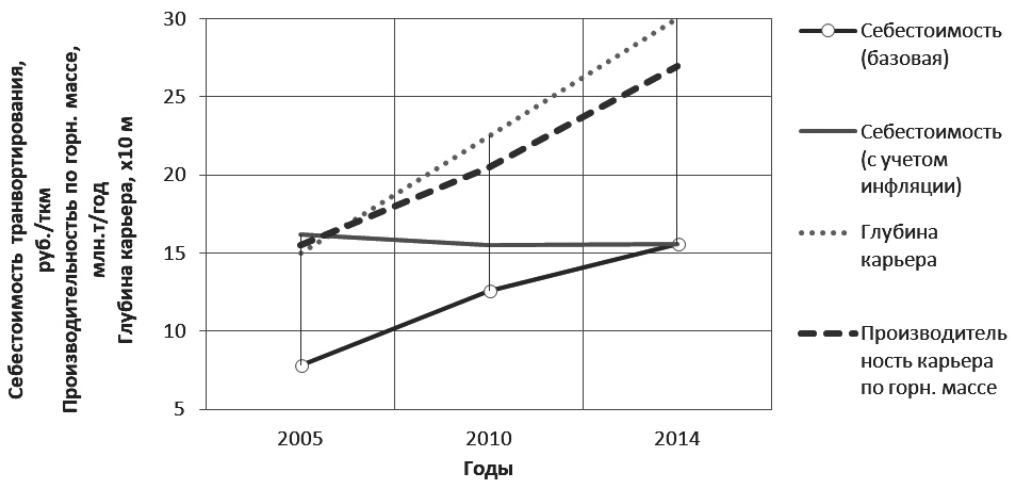


Рис. 2. Динамика себестоимости транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами в увязке с глубиной карьера (по фактическим данным действующего карьера)

Fig. 2. Dynamics of the cost of transportation of rock mass by dump trucks in connection with the depth of the quarry (according to the actual data of the existing quarry)

Выходом является автоматизация учета производственных показателей и факторов (цифровизация) и применение моделирования, которое в дополнение к обработке фактических данных учета горнодобывающего предприятия позволяет принимать обоснованные

управленческие решения. Для примера на рис. 3 приведены результаты комплексного имитационного и технико-экономического моделирования по разработанным в ИГД УрО РАН методикам [2], которое позволяет при ограниченном наборе исходных данных

установить необходимые зависимости и тренды, отражающие реальные взаимосвязи и закономерности технологических процессов.

С учетом достаточно длительной истории развития современного мощного карьерного транспорта конструктивные характеристики транспортных машин достигли высокого уровня и продолжают совершенствоваться. Однако если на первых этапах развития комплекс конструктивных решений мог увеличить эффек-

тивность работы машины на 20–50 %, то на сегодня шаг совершенствования эксплуатационных показателей лежит в пределах 1–5 %, а в отдельных случаях до 10 %, и работа по усовершенствованию становится все более наукоемкой и трудоемкой. Сохранение темпов развития на среднесрочную перспективу связано со все более точным учетом факторов, влияющих на формирование эффективных инновационных технологий добычи полезных ископаемых.

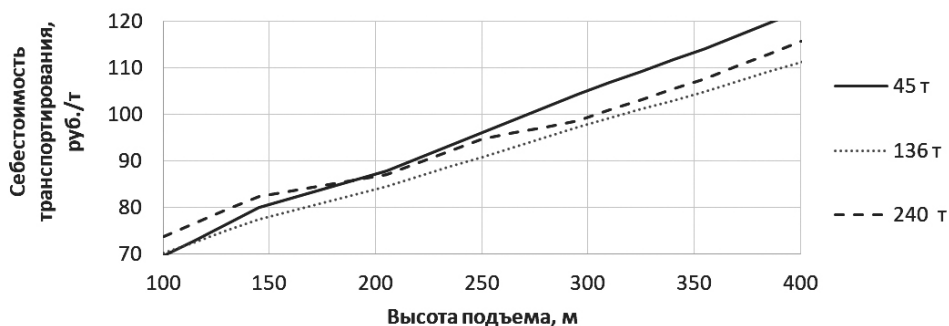


Рис. 3. Прогноз изменения себестоимости транспортирования горной массы автомобильным транспортом с ростом высоты подъема на основе компьютерного моделирования (при разной грузоподъемности автосамосвалов)

Fig. 3. Dependence of the cost of transportation by quarry dump trucks of different loading capacity on the height of lifting according to the results of simulation modeling and technical and economic calculation

Таблица 1

Особенности комплексной оптимизации ТСК по этапам

Features of complex optimization of quarry transport system by stages

Этап	Временной масштаб прогноза	Особенности
1. Проработка стратегии формирования (развития) транспортной системы карьера на весь жизненный цикл с учетом динамики ее параметров и трансформации схем вскрытия	а) весь жизненный цикл; б) 20–25 лет	1. Компьютерное моделирование функционирования транспортной системы на разных этапах
		2. Компьютерное моделирование карьера в увязке с принимаемыми видами транспорта
		3. Учет переходных процессов в формировании ТСК, обоснование оптимальных сроков трансформации схем вскрытия и транспортной системы по этапам развития и оптимизация осуществления переходных процессов
		4. Возможен пересмотр принятой стратегии в процессе функционирования карьера на основе уточненных данных о горно-геологических и горнотехнических условиях

Окончание табл. 1

Этап	Временной масштаб прогноза	Особенности
II. Выбор рациональных видов транспорта на стадии проектирования карьера	10–20 лет	1. Рассмотрение перспективы развития карьера на жизненном цикле
		2. Прогнозирование изменения параметров по видам транспорта с учетом научно-технического прогресса
		3. Точное определение параметров по видам транспорта, адаптированное к конкретным горнотехническим условиям на основе компьютерного моделирования
		4. Учет влияния разных схем вскрытия и соответствующих им видов транспорта на параметры карьера и экономику добычи полезного ископаемого
III. Оперативная оптимизация ТСК	5–10 лет	1. Технологическая оптимизация комплекса выемочно-погрузочных и транспортных машин (уточнение типоразмеров с учетом эффективного взаимодействия, уточнение парка машин с учетом реальной конфигурации выемочных единиц и транспортных коммуникаций, требуемой производительности карьера, планов опережающей подготовки запасов и т. п.)
	1–5 лет	2. Эксплуатационная оптимизация выемочно-погрузочных и транспортных машин (подбор моделей, имеющих минимальные эксплуатационные затраты, приемлемую/максимальную надежность, рациональные затраты на создание и функционирование ремонтно-эксплуатационной базы)
IV. Оптимизированное управление ТСК	час-сутки	Системы диспетчерского управления с прогнозной аналитикой, позволяющей оптимизировать суточное и мгновенное распределение машин с учетом заданных критериев (минимум затрат, максимум производительности и т. п.), имеющихся ограничений (недостаточный парк самосвалов, например, в связи с простоем в ремонте и т. п.), оперативных изменений (выход из строя экскаваторов, временное закрытие перегрузочных пунктов и т. п.)

Следовательно, заметного повышения эффективности функционирования транспортных систем карьеров (ТСК) можно добиться за счет их комплексной оптимизации. Некоторые особен-

ности такой оптимизации приведены в табл. 1.

При обосновании стратегии формирования (развития) ТСК следует рас-

смагивать горно-технологическую систему до конца жизненного цикла, это позволит прогнозировать необходимость и планировать параметры переходных процессов заранее, осуществлять их управляемо и эффективно. При этом необходимо рассматривать несколько уровней прогнозирования:

- весь жизненный цикл горнодобывающего предприятия до конца разработки месторождения (достижение высокого уровня точности прогноза затруднено, однако требуется сформировать наиболее эффективное направление развития горно-технологической системы, предусмотреть этапы и моменты осуществления переходных процессов);

- долгосрочная перспектива 20–25 лет (предъявляются повышенные требования к точности прогнозирования; принятые на основе прогноза технологические, технические и организационные решения должны с высокой вероятностью обеспечить выполнение плановых задач добычи полезного ископаемого и достижение технико-экономических показателей)

Необходимость развития методов оптимизации ТСК на базе методов компьютерного моделирования не вызывает сомнения и подтверждается большим объемом исследований в этом направлении как в России, так и за рубежом [3–8].

Методы

Для выполнения исследований применялись: анализ и обобщение фактических показателей работы карьеров, в т. ч. методом функционально-факторной регрессии [9], имитационное компьютерное моделирование в программе «Самосвал» [10], разработанной в ИГД УрО РАН, экономическо-математическое моделирование параметров транспортной системы карьеров (по методике

ИГД УрО РАН), горно-геометрический анализ, трехмерное моделирование горных выработок (карьеров) — в программном комплексе «Mineframe» [11].

Результаты

Развитие методик обработки данных и оптимизации транспортных систем карьеров научно-исследовательскими организациями и вычислительных возможностей проектных и горнодобывающих предприятий позволит выполнять оптимизацию, учитывающую все факторы при средней или максимальной детализации, тем самым повысить точность прогнозирования. Такой подход потребует:

- объединения всех информационных систем в единый комплекс (цифровую платформу);

- совершенствования методик оптимизации функционирования подсистем в новой комплексной цифровой среде.

Важнейшим элементом оптимизации является сквозной ее характер — применение оптимизации ко всем процессам на базе увязанных объективных критериев эффективности, единства и объективности исходных данных, использования разноуровневых данных: от показаний датчиков, установленных на горных и транспортных машинах, до итоговых экономических показателей по переделам.

Выполненные в ИГД УрО РАН исследования позволили выявить резервы повышения эффективности ТСК за счет оптимизации. В частности, установлено, что рациональное управление переходными процессами в ТСК (например, техническое перевооружение или изменение схемы вскрытия на очередном этапе с заменой видов транспорта) позволяет снизить затраты.

Под переходным процессом понимается управляемое изменение структуры и параметров транспортной системы

карьера, целью которого является ее приспособление к изменяющимся условиям или целевым показателям функционирования [12].

В традиционной научной постановке [13] момент перехода на другой вид транспорта определяется на основании объемной модели совмещенных функций по критерию минимума затрат с учетом динамики показателей за некоторый период оптимизации. В практике проектирования момент перехода определяется с меньшей детальностью: либо технико-экономическим сравнением вариантов, либо только по технологическим соображениям с учетом горнотехнических условий карьера и ориентировочных рациональных зон эксплуатации видов транспорта (по справочникам).

Предлагаемая методика предполагает дополнительно учет динамики изменения натуральных и стоимостных показателей транспортной системы в период переходного процесса. А в качестве критерия применяется минимум потока дисконтированных затрат или чистого дисконтированного дохода по годам. При этом рассматривается период на год ранее переходного процесса до его окончания + 1 год.

Такой подход позволяет учесть не только преимущества вариантов транспортной системы «в статике», но и учесть динамику перехода. В результате итоговые показатели на выходе из переходного процесса могут отличаться от параметров, определенных по методике «на расчетный год». Учитывая столь широкие возможности методики, могут рассматриваться несколько вариантов управляемого переходного процесса с выбором оптимального.

В качестве целевых функций оптимизации должны рассматриваться как экономические показатели, соответ-

ствующие решаемой задаче, так и технологические (например, обеспечение заданной производительности).

Концептуальная схема учета динамики переходного процесса приведена на рис. 4. Видно, что при одинаковых входных и выходных параметрах эксплуатационных и капитальных затрат различная динамика переходного процесса (а по сути разные организационно-технические решения по адаптации транспортной системы) влечет за собой разный экономический результат.

Рассмотрим применение указанной методики на конкретном примере.

На рис. 5 представлено, насколько могут различаться затраты при различной динамике переходного процесса на примере замены стандартных дизель-электрических автосамосвалов БелАЗ-75583 грузоподъемностью 90 т (базовый вариант) на инновационные дизель-аккумуляторные автосамосвалы (ДАКС) на базе БелАЗ грузоподъемностью 90 т (разработка ИГД УрО РАН [14]). Расчеты выполнены на смоделированном карьере, обрабатываемом от начальной глубины 15 м (на момент сдачи в эксплуатацию) до конечной глубины 270 м. Расчеты эксплуатационных параметров самосвалов проводились на базе компьютерного моделирования в программе «Самосвал», разработанной в ИГД УрО РАН [10].

Затраты переведены в относительных единицах. За 100 отн. ед. приняты показатели по наилучшему варианту «При внедрении ДАКС с начала разработки карьера» на 16-й год расчета (принят двукратный период относительно самого длительного переходного процесса для стабилизации трендов экономических показателей).

Расчеты показали, что применение ДАКС становится технологически оправданным при достижении карьером

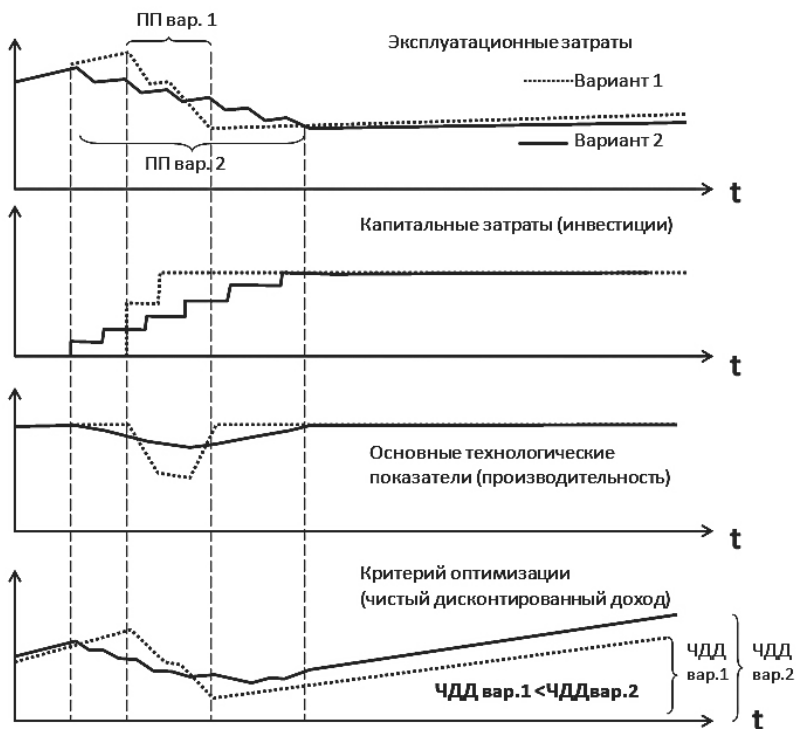


Рис. 4. Концептуальная схема оптимизация динамики переходного процесса при адаптации транспортной системы с максимальной эффективностью: Вар. 1 – базовый вариант, Вар.2 – оптимизированный вариант

Fig. 4. Optimization of the dynamics of the transition process in the adaptation of the transport system with maximum efficiency: var. 1 – basic version, var. 2 – optimized version

глубины 60 м (на 4-й год разработки), что объясняется возможностью полностью зарядить мощный тяговый аккумулятор при спуске в карьер.

Как видно по графикам (рис. 5), отсутствие оптимизации переходного процесса (разовая замена парка автосамосвалов в варианте «разовой замены парка» при ПП = 1 год начиная с 4-го года эксплуатации, когда применение ДАКС становится технологически оправданным) приводит к значительной неэффективности. Это связано с тем, что функционирующий на момент начала переходного процесса (4-й год эксплуатации) парк карьерных автосамосвалов еще не выработал свой ресурс, а потому полная одновременная замена парка

влечет значительные капитальные затраты, которые не окупаются полностью с течением времени. Постепенная же замена дизельных автосамосвалов на ДАКС (вариант «Постепенная замена парка на ДАКС», ПП=8 лет) по мере их списания обеспечивает заметную экономию. Однако используя специальный подход, когда базовые шасси закупаются и применяются с 1-го года эксплуатации, а с 4-го года дооборудуются аккумуляторными (вариант «При внедрении ДАКС с начала разработки карьера», ПП=4 года), возможно достичь максимального экономического эффекта. Таким образом, учет динамики управляемого переходного процесса позволяет увеличить эксплуатационно-технологические

Разница затрат в сравнении с базовым вариантом, отн.ед.

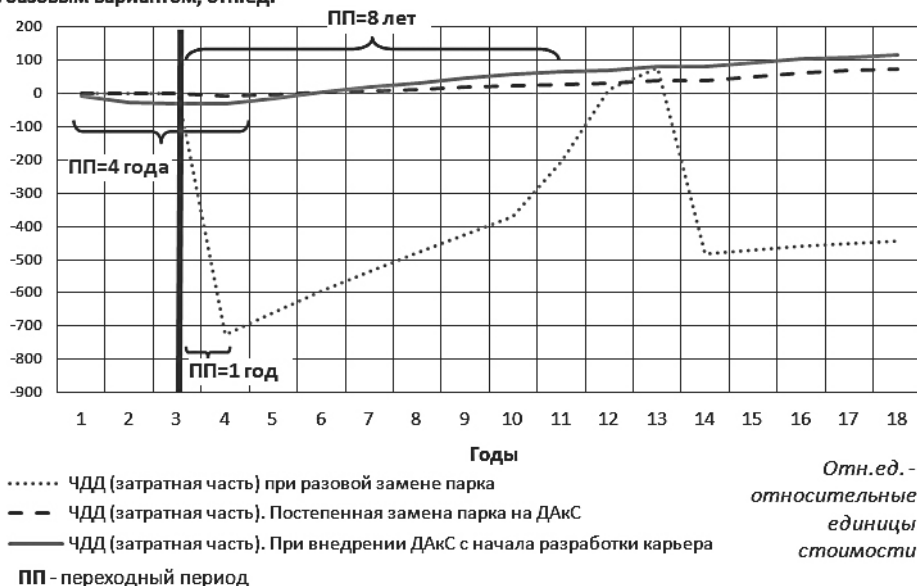


Рис. 5. Условный чистый дисконтированный доход (рассчитан как разница затрат между рассматриваемым и базовым вариантом) от внедрения дизель-аккумуляторных самосвалов (ДАКС) с учетом динамики переходного процесса по вариантам (1, 4 и 8 лет)

Fig. 5. Conditional net discounted income (calculated as the cost difference between the considered and the basic option) from the introduction of diesel-battery dump trucks (DAcS) taking into account the dynamics of the transition process for options (1, 4 and 8 years)

и организационно-экономические эффекты в процессе формирования и развития транспортной системы карьера.

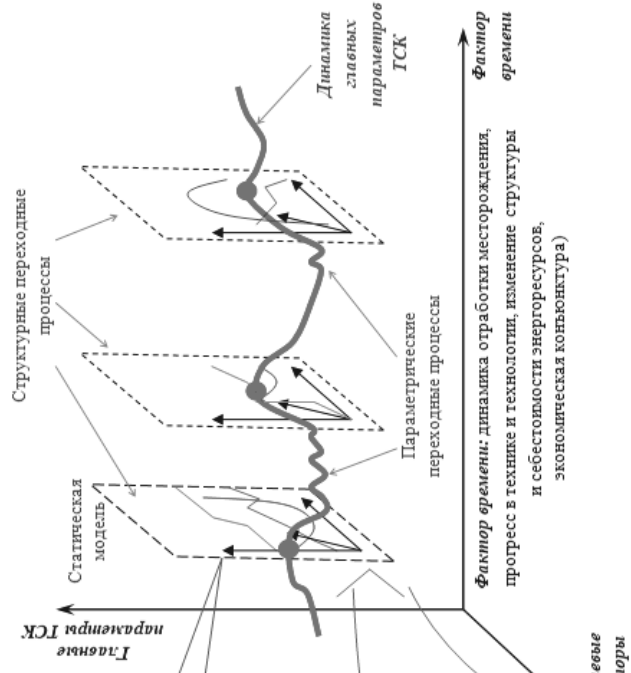
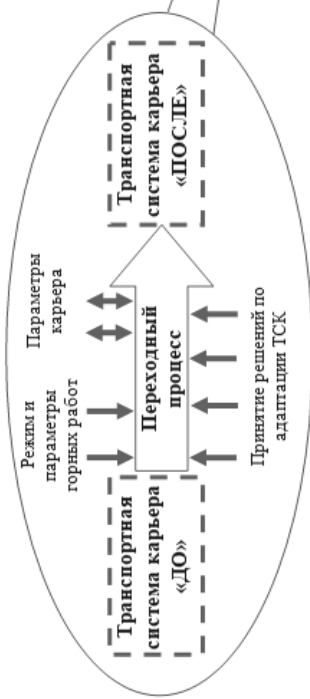
Многолетний опыт исследований позволил сформировать динамическую модель жизненного цикла транспортной системы карьера. В ней функционирование транспортной системы характеризуется состояниями с относительно постоянными параметрами и периодами их изменения — переходными процессами, — вызванными изменением главных параметров ТСК вслед за изменением ключевых экзогенных и эндогенных факторов (например, повышение затрат на транспортирование вслед за увеличением глубины карьера). Переходные процессы могут характеризоваться как относительно небольшим изменением главных пара-

метров (такие изменения компенсируются параметрической адаптацией), так и значительными их перепадами (требуется структурная или структурно-параметрическая адаптация) [15].

На рис. 6 представлена схема, иллюстрирующая перспективную динамическую адаптивную модель транспортной системы карьера, учитывающей переходные процессы в ее развитии. Она отражает формализованное представление о месте и роли переходных процессов и иллюстрирует направления развития методического инструментария для обоснования параметров ТСК в динамической системе. В каждый локальный период времени ТСК может быть описана с достаточной точностью квазистатической имитационной моделью на уже имеющемся научно-методическом и алгоритмическом аппарате

**ДИНАМИЧЕСКАЯ АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ
КАРЬЕРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС



**Методика принятия решений
по структурной и параметрической адаптации ТСК**

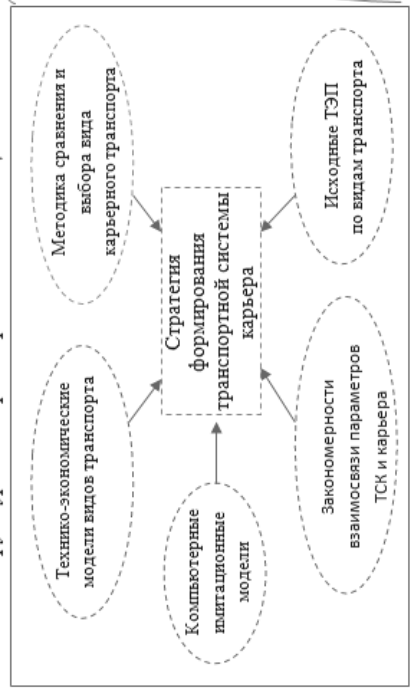


Рис. 6. Формализованное описание динамической модели развития транспортной системы карьера, отражающей переходные процессы в ее формировании

Fig. 6. Formalized description of the dynamic development model of the quarry transport system, reflecting the transition processes in its formation

без применения сложных уникальных имитационных моделей и суперкомпьютеров. А периоды ее трансформации (переходные процессы) описываются соответствующими моделями перехода от одного стабильного состояния к другому.

При этом такая модель может быть сопряжена с другими моделями, описывающими горно-технологическую систему в целом (карьер) или отдельные ее элементы (схема вскрытия и параметры вскрывающих выработок, режим горных работ, подготовка горных пород к выемке и др.) через главные параметры и ключевые факторы.

К ключевым факторам относятся, например:

- параметры вскрывающих выработок (высота подъема, дальность транспортирования, руководящий и средневзвешенный уклон и др.);
- геометрические и временные характеристики грузопотоков (направления, конфигурация, объемы и т. п.);
- параметры перевозимой горной массы (как по гранулометрическому составу, так и качественные показатели, если они учитываются в модели);
- параметры источников и приемников грузопотоков (погрузочная техника, приемные бункеры обогатительных фабрик, складов и т. п.) и др.

К главным параметрам относятся (но могут дополняться в зависимости от конкретной решаемой задачи):

- а) количественные:
 - производительность номинальная и максимальная;
 - себестоимость транспортирования горной массы (как правило, в виде функции от ключевых факторов);
 - расход ресурсов (материальных, энергетических, людских и т. д.) и др.

- б) качественные, например, предпочтительные условия применения или более конкретно оптимальные зоны

применения видов транспорта, локализованные в карьерном поле.

Важным звеном представленной концепции является комплексная методика принятия решений по структурной и параметрической адаптации ТСК. В ее основе лежат методы технико-технологического и технико-экономического сравнения и выбора рационального варианта транспортной системы карьера. Комплекс оптимизирующих методик позволяет с высокой точностью прогнозировать технологические и технико-экономические параметры перспективных видов транспорта (даже таких, опыт применения которых отсутствует или является ограниченным).

Ядром методики являются модели:

- функционирования транспортных единиц;
- функционирования транспортных систем;
- экономико-математическая модель горнотранспортной системы карьера.

Путем реализации каждой из вышеуказанных моделей можно получить эксплуатационные, а на их основе — и технико-экономические показатели функционирования транспортной системы с простым или комбинированным транспортом. Методика позволяет решать как прямые (расчет технико-экономических показателей транспорта в заданных горнотехнических условиях), так и обратные задачи (например, обоснование областей эффективного применения тех или иных видов транспорта).

Учет большого количества факторов позволяет более точно определять стадии и планировать моменты адаптационного изменения ТСК. Ключевым звеном методики является поиск рациональных параметров системы. Для поиска действительно оптимального варианта рассматривается не 2—3 варианта, а десятки за счет автоматиза-

ции расчетов. Этот массив с дискретными значениями ключевых показателей обрабатывается разными методами, в том числе специальными [9], и формируется математическая модель, представляющая собой функцию с одной или несколькими переменными (пример см. на рис. 7, а). Особенность транспортных систем карьеров заключается в том, что большинство задач не являются в явном виде оптимизационными, т. е. решаемыми путем отыскания экстремума функции ключевых показателей (минимума или максимума). Часто функция является монотонно возрастающей или монотонно убывающей, либо изменение параметра после прохождения экстремума функции незначительно и в реальных условиях практически равнозначные по рассматриваемому показателю решения могут быть приняты в широком диапазоне.

На рис. 7 приведен пример методического обеспечения принятия решения о выборе параметров транспортных коммуникаций для транспортирования горной массы из карьера. Рассматривается доставка руды на высоту 100 м карьерными автосамосвалами от забоя до перегрузочного пункта. Карьер имеет значительные пространственные размеры в длину и ширину (характерный пример — крупные железорудные карьеры), поэтому в диапазоне 5—8 % уклон автодорог не будет оказывать определяющего влияния на разнос бортов.

Стоит отметить, что рассматриваемый средневзвешенный уклон не равен напрямую уклонам съездов (руководящему уклону), а всегда меньше (за счет наличия горизонтальных и слабонаклонных участков по трассе движения) и связан с ним зависимостью:

$$i_{\text{ср.в.}} = (1 - k_{\text{гор}}) \cdot i_{\text{рук}} = \frac{i_{\text{рук}}}{k_{\text{тр}}}, \%$$

где $i_{\text{рук}}$ — руководящий уклон съездов, %; $k_{\text{гор}}$ — доля горизонтальных участков в общей протяженности трассы; $k_{\text{тр}}$ — коэффициент развития трассы (отношение фактической протяженности трассы к теоретической ее длине, рассчитанной при постоянном уклоне, равном руководящему).

Очевидным показателем для принятия решения в этом случае является себестоимость транспортирования. Путем имитационного моделирования движения автосамосвала БелАЗ грузоподъемностью 130 т по дорогам с различным уклоном и технико-экономических расчетов установлена зависимость удельных затрат на перевозку 1 т горной массы. Однако она для рассматриваемого карьера имеет широкую область минимума затрат в диапазоне средневзвешенных уклонов 6,5—9,0 %, что не позволяет определить точное значение.

Задача решается введением в область рассмотрения дополнительного параметра — комплексного коэффициента эффективности (рис. 7, в), отражающего эффективность использования энергии топлива для выполнения транспортной работы в единицу времени (измеряется в Вт/МДж):

$$K_{\text{эф}} = A_{\text{тр}} / (E_{\text{т}} \cdot T_{\text{р}}), \text{ Вт/МДж} \quad (3)$$

где $A_{\text{тр}}$ — работа силы тяги на колесах по перемещению горной массы, МДж; $E_{\text{т}}$ — энергия топлива, затраченного за транспортный цикл, МДж; $T_{\text{р}}$ — продолжительность транспортного цикла (рейса), с.

Подробно методика его расчета изложена в статье [16]. По физическому смыслу он отражает среднюю условную мощность по перемещению горной массы, развиваемую транспортным средством на единицу затраченной энергии (топлива или иного источника), а численно примерно равен интеграль-

ному коэффициенту полезного действия энергосилового установок, трансмиссии и двигателя транспортного средства с учетом фактора времени.

В самом общем случае приведенная на рис. 6 динамическая модель ТСК может использоваться для оптимизации на протяжении всего срока существования карьера от момента ввода в эксплуатацию до завершения горных работ. Таким образом, мы переходим к концепции жизненного цикла ТСК. Следовательно, оптимизация ТСК может выполняться в любой момент жизненного цикла, а в части параме-

трической адаптации, при необходимости, и непрерывно с учетом динамики горнотехнических условий, микро- и макроэкономических факторов.

Реализация такой концепции возможно только на базе мощной автоматизированной информационной системы (цифровой платформы). Однако принятие решений по выбору рациональных вариантов развития только методом моделирования всего жизненного цикла карьера «вслепую» (без предпочтительных стратегий развития) и сравнения многих вариантов требует чрезмерно больших вычислительных мощностей.

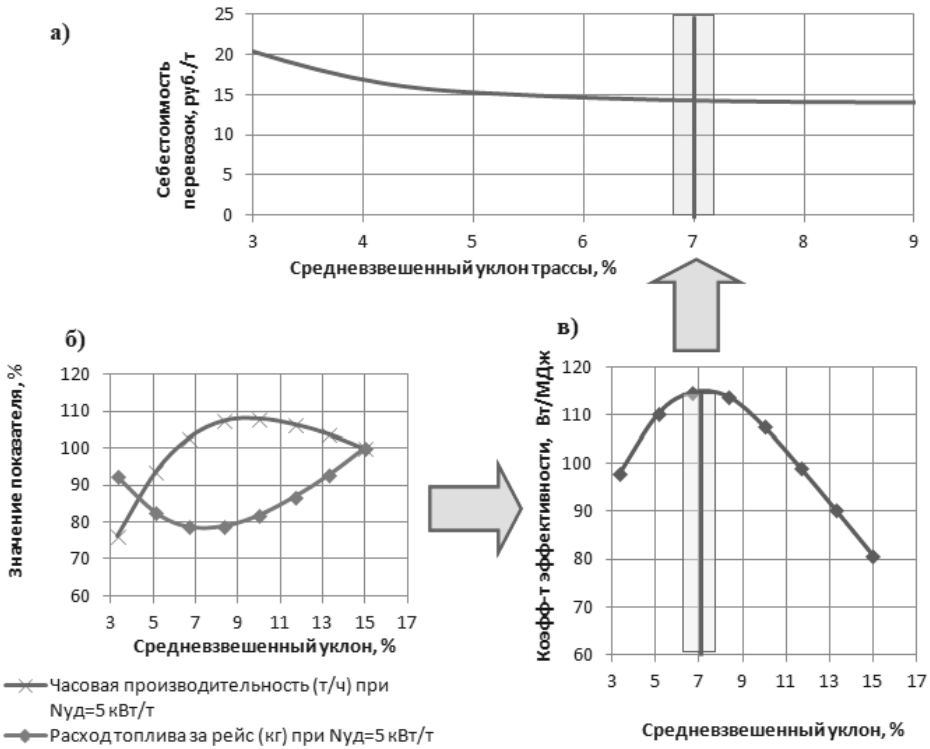


Рис. 7. Определение рационального уклона автодорог для конкретного карьера: а – себестоимость транспортирования; б – зависимость расхода топлива и производительности автосамосвала от средневзвешенного уклона; в – зависимость коэффициента эффективности от средневзвешенного уклона

Fig. 7. Determination of the rational slope of roads for a particular quarry: a – the cost of transportation; b – the dependence of fuel consumption and productivity of the dump truck on the weighted average slope; c – the dependence of the efficiency coefficient on the weighted average slope

Необходима разработка научно обоснованных методов выбора вариантов на промежуточных стадиях моделирования. Использование современных методов машинного обучения, в т. ч. нейронных сетей, безусловно, получит определенное распространение, но также требует значительных ресурсов для хранения и обработки информации. Одно из эффективных решений – разработка эвристических методов.

Для сложных систем разработке эвристических методов в научной литературе посвящено много работ. Находят они применение и в горном деле, поскольку уровень эффективности функционирования горнотехнических систем сегодня должен быть очень высоким. Так, в работе [17] предлагается использовать Парето-оптимизацию при выборе траектории развития горнотехнической системы при проектировании.

В качестве варианта в данной статье предлагается методологический подход к оптимизации систем, характеризуемых отсутствием явных максимумов или минимумов для математических функций эффективности их функционирования. Момент, когда необходимый управляемый переходный процесс (структурная адаптация) определяется по интегральной оценке накопленного эффекта от параметрической адаптации в рамках текущего этапа развития ТСК.

Методическая основа – использование т. н. диаграмм Парето. Они позволяют ранжировать по значимости мероприятия и эффект от их реализации в порядке убывания. Таким образом, на кривой может быть найден момент (точка, диапазон), когда дальнейшее параметрическое совершенствование становится неэффективным. На рис. 8 приведен пример ранжирова-

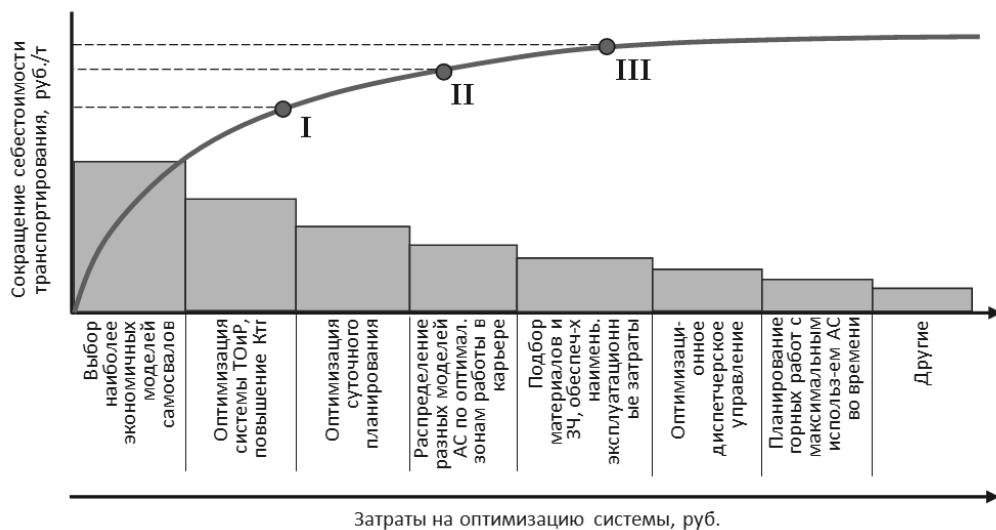


Рис. 8. Концепция использования диаграммы Парето для поиска точки перехода от параметрической к структурной адаптации: I, II, III – возможные точки перехода к структурной адаптации, например, переходу на комбинированный транспорт, ТОиР – техническое обслуживание и ремонт, АС – карьерный автосамосвал

Fig. 8. The Concept of using the Pareto diagram to find the transition point from parametric to structural adaptation: I, II, III-possible transition points to structural adaptation, e.g. transition to combined transport

ния факторов, позволяющий визуально выделить пределы совершенствования системы, когда затрачиваемые ресурсы превышают получаемый эффект. Такой подход позволяет также рационально выстроить стратегию параметрической адаптации ТСК, отдав предпочтение наиболее эффективным метрам. Для выявления влияния каждого из факторов необходимо использовать имитационное и экономико-математическое моделирование, т. е. мы можем знать об объекте ключевые аспекты развития априори.

Перспективой развития исследований является решения вопроса определения оптимального момента перехода от постепенного совершенствования к структурным изменениям ТСК (точки I, II, III на рис. 8), например, переходу от монотранспортной схемы транспорта к комбинированной и синтезу траектории таких переходов на всем жизненном цикле транспортной системы.

Заключение

1. Оптимизация горнотехнических систем, одной из которых являются транспортные системы карьеров, получает новый импульс к развитию методик благодаря все более широкому внедрению автоматизированных систем сбора и обработки информации на горнодобывающих предприятиях.

2. Наибольший эффект даст сквозная оптимизация всех процессов добычи полезных ископаемых, требующая внедрения сквозной цифровизации горного производства, предполагающей обязательную доступность к информации разных уровней (от датчиков на отдельных машинах до технико-экономических показателей).

3. Использование сквозной оптимизации процессов открытых горных работ позволит не только повысить эффективность их функционирования, но и стать инструментом для построения эффективных технологий освоения сложных в горно-геологическом плане месторождений и тех, которые из-за низкой суммарной ценности полезного ископаемого не вовлекаются в разработку, но являются важными для поддержания ресурсной базы действующих горнодобывающих предприятий [18].

4. Требуется разработка методики оптимальных моментов перехода от параметрической к структурной адаптации транспортных систем карьеров, а также оптимизации траектории таких переходов на всем жизненном цикле ТСК, основанные на эвристических методах. Это позволит снизить вычислительную нагрузку при решении задач оптимизации сложных горнотехнических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С. Индустрия 4.0: «цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы // Научные технологии в машиностроении. — 2019. — № 2 (92). — С. 42–48.

2. Журавлев А.Г. Выбор рациональной грузоподъемности карьерных автосамосвалов для конкретных условий транспортирования // Транспорт Урала. — 2014. — №4. — С. 96–101.

3. Воронов А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Воронов; ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва». — Кемерово, 2015. — 197 с.

4. Upadhyay S.P., Askari-Nasab H. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, no 28, P.153–166.

5. *Bajany D.M., Zhang L., Xia X.* An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels, IFAC Papers On Line, 2019, no 52 – 14, P.207–212

6. *González H., Morales N.* Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open-Pit Production Plan. In: Widzyk-Capehart E., Hekmat A., Singhal R. (eds) Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018. Springer, Cham Parhizkar, A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). Arab J Geosci, 2018, no 11, p.796. DOI:10.1007/s12517 – 018 – 4165 – 3

7. *Kumykova T.M., Kumykov V.K.* Method of Shaping Loading-and-Transportation System in Deep Open Pit Complex Ore Mines. J Min Sci, 2018, no 53, P.708–717. DOI: 10.1134/S1062739117042702

8. *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, no 28, P.205–214.

9. *Антонов В.А.* Выявление и интерпретация экспериментальных горно-технологических закономерностей // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4. – С. 162 – 170. (DOI:10.18454/2313 – 1586.20.04.162.)

10. *Журавлев А.Г.* Компьютерное моделирование режимов движения карьерных автосамосвалов с КЭУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №0B11 – С. 371 – 382.

11. *Лукичёв С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э., Белгородцев О.В.* Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME // Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 53 – 58.

12. *Яковлев В.Л.* Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 5 – 14. (DOI: 10.18454/2313 – 1586.2017.01.112.)

13. *Яковлев В.Л.* Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. – 240 с.

14. *Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Исаков М.В.* Вопросы создания и перспективы применения карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой // Горная промышленность. – 2008. – №3. – С.68–74.

15. *Бахтурин Ю.А.* Параметрическая адаптация транспортных систем карьеров на основе универсальной интерактивной имитационной модели // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 71 – 80. (DOI: 10.25635/2313 – 1586.2018.04.071.)

16. *Журавлев А.Г.* Обоснование рациональных технических параметров горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – Специальный выпуск №21. – С. 75 – 87.

17. *Валуев А.М.* Задача Парето-оптимизации траектории на сети как метамодель многокритериального выбора проектных решений для горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №11 – С. 215 – 223.

18. *Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф., Зырянов И.В.* Технологические аспекты разработки беднотоварных месторождений алмазов. – Новосибирск: Наука, 2018. – 368 с.

ИИАБ

REFERENCES

1. Frolov E.B., Parshina I.S., Zaitsev A.S., Klimov A.S. Industry 4.0: “digital double” as a means of increasing the efficiency of the production system. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2019, no 2 (92), pp. 42 – 48. [In Russ]

2. Zhuravlev A.G. *Selection of rational load capacity of dump trucks for specific transportation conditions. Transport Urala*, 2014, no 4, pp. 96–101. [In Russ]

3. Voronov A. Yu. *Optimizatsiya pokazatelei ekspluatatsionnoi proizvoditel'nosti ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov razrezov* [Optimization of indicators of operational productivity of excavator-automobile complexes of sections] : Doctor's thesis, Kemerovo, FGBOU VPO «Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva», 2015, 197 p. [In Russ]

4. Upadhyay S.P., Askari-Nasab H. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, no 28, P.153–166.

5. Bajany D.M., Zhang L., Xia X. An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels, *IFAC Papers On Line*, 2019, no 52–14, pp. 207–212

6. González H., Morales N. Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open-Pit Production Plan. In: Widzyk-Capehart E., Hekmat A., Singhal R. (eds) *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018*. Springer, Cham Parhizkar, A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). *Arab J Geosci*, 2018, no 11, p.796. DOI:10.1007/s12517–018–4165–3

7. Kумыkova, T.M., Kумыkov, V.K. Method of Shaping Loading-and-Transportation System in Deep Open Pit Complex Ore Mines. *J Min Sci*, 2018, no 53, P.708–717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.

8. 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, no 28, pp. 205–214.

9. Antonov V.A. Identification and interpretation of the experimental mining and technology laws. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2016, no 4, pp. 162 – 170. DOI:10.18454/2313–1586.20.04.162. [In Russ]

10. Zhuravlev A.G. *Computer modeling of modes of movement of career dump trucks with KEU. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no OV11, pp. 371 – 382. [In Russ]

11. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Semenova I.E., Belogorodtsev O.V. Approaches to solving problems of design and planning of mining operations in the MINEFRAME system. *Gornyi zhurnal*, 2015, no 8, pp. 53 – 58. [In Russ]

12. Yakovlev V.L. Study of transition processes – a new methodological approach to the development and development of innovative technologies for mining and ore preparation of mineral raw materials in the development of deep-lying complex deposits. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2017, no 2, pp. 5 – 14. (DOI: 10.18454/2313–1586.2017.01.112.) [In Russ]

13. Yakovlev V.L. *Teoriya i praktika vybora transporta glubokih kar'erov* [Theory and practice of choice of transport for the deep open pits]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otdelenie, 1989, 240 p.

14. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Isakov M.V. Questions of creation and prospects of application of career dump trucks with the combined power plant. *Gornaya promyshlennost'*, 2008, no 3, pp. 68 – 74. [In Russ]

15. Bakhturin Yu. A. Parametric adaptation of the open-cut transport systems on the basis of universal interactive simulation model. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2018, no 4, pp. 71 – 80. (DOI: 10.25635/2313–1586.2018.04.071.) [In Russ]

16. Zhuravlev A.G. Obosnovanie ratsional'nykh tekhnicheskikh parametrov gorno-transportnykh mashin. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 21, pp. 75 – 87. [In Russ]

17. Valuev A.M. The problem of Pareto-optimization of the trajectory on the network as a metamodel of multi-criteria choice of design solutions for mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 11, pp. 215 – 223. [In Russ]

18. Akishev A.N., Bondarenko I.F., Zyryanov I.V. *Tekhnologicheskie aspekty razrabotki bednotovarnykh mestorozhdenij almazov* [Technological aspects of the development of poor diamond deposits]. Novosibirsk: Nauka, 2018. 368 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Журавлев Артем Геннадиевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), 620075 г. Екатеринбург, ГСП-219, Мамина-Сибиряка 58, juravlev@igduran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhuravlev A.G., chief of laboratory, Cand. Sci. (Eng.), The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia, juravlev@igduran.ru.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 11.03.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 21.11.2019; received after the review 11.03.2020; accepted for printing 20.03.2020.

