

УДК 622.682:621.926]:004.94

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией транспортных
систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Кардашин Егор Дмитриевич

младший научный сотрудник,
лаборатория транспортных систем карьеров
и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: kardashin@igduran.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОПОТОКОВ
ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ
ДРОБИЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО
КОМПЛЕКСА КАРЬЕРА****Аннотация:*

Практика применения автомобильно-конвейерного транспорта в карьерах показывает, что его параметры нередко не соответствуют фактическим параметрам и динамике развития горных работ в той части, которая обеспечивает его рациональное и производительное использование с максимальным экономическим эффектом. Проблема наиболее характерна для конвейерного звена этого вида транспорта, основой которого является дробильно-конвейерный комплекс. Причины в том числе заключаются в отсутствии применимых на практике инструментов оптимизации параметров потоков горной массы в ДКК, в том числе обосновании рациональной вместимости бункеров, структурной схемы дробильно-перегрузочной установки, обосновании рациональной производительности оборудования и его количества по видам, необходимости организации распараллеливания рудопотоков в пределах ДКК, а также резервирования оборудования по мощности и/или надежности. В связи с этим в ИГД УрО РАН ведется работа по созданию имитационной модели дробильно-конвейерного комплекса, обеспечивающей решение вышеуказанных задач. В статье представлены обоснованные в ходе исследований структура и алгоритм модели, а также результаты апробации имитационной модели, реализованной на примере однолинейного ДКК с ДПУ на базе одной конусной дробилки. Подтверждена работоспособность модели, возможность ее применения для подбора рациональных параметров ДКК путем перебора вариантов, обеспечивающих стабильность работы ДКК по грузопотоку на выходе штабелеукладчика.

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование, дробильно-конвейерный комплекс (ДКК), дробильно-перегрузочная установка (ДПУ), рациональные параметры, циклично-поточная технология (ЦПТ).

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.006

Zhuravlev Artem G.

Candidate of Technical Science,
Head of Laboratory for quarry transport
systems and geotechnics,
Institute of Mining UB RAS,
620219 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: juravlev@igduran.ru

Kardashin Egor D.

Junior Researcher,
Laboratory for quarry transport systems
and geotechnics,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: kardashin@igduran.ru

**MODELING OF CARGO FLOWS DURING
THE OPERATION OF THE CRUSHING AND
CONVEYOR COMPLEX OF THE QUARRY***Abstract:*

The application praxis of automobile and conveyor transport in open pits shows that their parameters often do not correspond to the actual parameters and dynamics of development of mining operations in the part that provides their rational and productive use with maximum economic effect. The problem is most typical for the conveyor section of this transportation type, the basis of which is the crushing and conveyor complex (CCC). The reasons for are the lack in practical tools for optimizing the parameters of rock mass flows in the CCC, including justification of the rational capacity of hoppers, in structural scheme of the crushing and conveying plant, in justification of the rational productivity of equipment and its number by type, and in the need to organize the paralleling of ore flows within the CCC, as well as the redundancy of equipment by capacity and/or reliability. In this regard, the work on creation of a simulation model of crushing and conveyor complex, providing the solution of the above mentioned problems, is being carried out in the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The article presents the structure and algorithm of the model substantiated in the course of research, as well as the results of approbation of the simulation model realized on the example of a single-line CCC with CRP on the basis of one cone crusher. The performance of the model was confirmed, the possibility of its application for selection of rational parameters of CCC by means of selection of variants ensuring the stability of CCC operation in terms of load flow at the stacker output was confirmed.

Key words: computer simulation modeling, crushing and conveying complex (CCC), crushing and reloading plant (CRP), rational parameters, cyclic-flow technology (CFT).

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. № 123012300005-3.

Введение

Развитие транспортной системы вслед за развитием карьера (его углубкой и расширением) является необходимым элементом устойчивого функционирования горнотехнической системы горнодобывающего предприятия [1]. Применение для каждого этапа освоения месторождения открытым способом рационального вида транспорта обеспечивает экономию затрат на перевозку горной массы, а следовательно, позволяет направить эту экономию на более полное освоение запасов месторождения.

Одним из видов промышленного транспорта, обеспечивающего существенную экономию в сравнении с автомобильным, является конвейерный. Он позволяет сократить эксплуатационные затраты в 3 – 4 раза, однако в современных условиях освоения месторождений по углубочной системе разработки не может выполнять функции сборочного транспорта и применяется на практике в основном в паре с карьерными автосамосвалами. Выбор рациональных параметров комбинированного автомобильно-конвейерного транспорта, применение которого часто именуется циклично-поточной технологией, влияет на его технико-экономические показатели, которые в отдельных случаях могут быть даже хуже, чем автомобильный транспорт. В частности, конвейерный транспорт малоэффективен при незначительном объеме перевозок (менее 5 млн т/год), при нерациональных технических параметрах комплекса, не соответствующих горно-технологическим условиям [2].

Поэтому развитие методик обоснования и расчета рациональных (оптимальных) параметров автомобильно-конвейерного транспорта является актуальной задачей [3, 4]. Основная его часть – ДКК. Следовательно, важным вопросом является развитие методик для определения рациональных его параметров [5 – 10].

Развитие цифровых технологий обеспечивает возможность применения имитационного компьютерного моделирования для решения вышеуказанных задач [11]. В ИГД УрО РАН разрабатывается программное обеспечение (ПО) для моделирования функционирования транспортных систем карьеров [12, 13] и, в частности, ДКК, применяемого в составе внутрикарьерного транспорта.

Среди прочих задач, которые могут решаться с применением компьютерного моделирования, важную роль играет выбор рациональных технологических и связанных с ними технических параметров ДКК с учетом рациональной организации грузопотоков. Его целью является стабилизация грузопотока, компенсация неравномерности подачи сборочного транспорта при передаче горной массы на поточный транспорт, обоснование рациональной производительности оборудования с учетом надежности и резервирования по производительности, а также технологического регламента функционирования комплекса и т.п.

Наиболее подходящим для этого является использование имитационного моделирования функционирования карьерного ДКК, которое позволяет воспроизводить динамику грузопотоков. Разработка соответствующей структуры программного обеспечения и его алгоритмов, а также апробация разработанного ПО и являются целью представленного исследования.

Методы

Для разработки алгоритмов выполнено обобщение методик расчета параметров функционирования дробильно-конвейерного комплекса.

Модель строится как имитационная с детерминированными (не вероятностными) исходными данными. Это позволяет подбирать рациональные параметры элементов ДКК методом вариантов, обеспечивая широкую универсальность самой модели. С этой целью воспроизведение потоков горной массы в ДКК осуществляется по принципу перемещения элементарных ее объемов от одного элемента ДКК к другому.

В рамках исследования имитационная модель принята в понимании, приведенном в [14] как совокупность элементов, имитирующих протекание изучаемого процесса, позволяющих достаточно просто и оперативно реализовать варианты расчеты.

В данном случае суть применения моделирования – в возможности учесть сложно предсказуемые расчетами взаимодействия в системе с многоэлементной структурой. Вероятностные характеристики играют второстепенную роль, поэтому исходные данные в модели задаются как детерминированные величины. При этом те из них, которые на реальном объекте подвержены значительному вероятностному изменению, принимаются как математическое ожидание соответствующего параметра, а установление значений математических ожиданий выполняется заблаговременно при сборе данных с реального объекта или нескольких аналогичных объектов.

Соответственно, модель строится на основе детерминированных расчетных алгоритмов без учета вероятностных характеристик ее элементов.

Для возможности варьировать структуру ДКК в модели он разбит на основные составляющие:

- дробильно-перегрузочная установка (ДПУ);
- ленточные конвейеры;
- оконечный (разгрузочный) агрегат, представленный в двух вариантах: складской штабелеукладчик или стакер, отвалообразователь.

Дробильно-перегрузочная установка детализирована по основному технологическому оборудованию: приемный бункер (предусматривается прямая загрузка конусной дробилки по принципу «работа под завалом», дробилка, разгрузочный (накопительный) бункер, пластинчатый питатель (возможно варьировать схему с одним или двумя пластинчатыми питателями), передаточный конвейер.

Результаты и их анализ

Исходя из поставленной задачи и вышеописанных особенностей разработана структура имитационной модели дробильно-конвейерного комплекса. Она представляет собой совокупность объектов с заданной вместимостью, приемной и пропускной способностью (производительностью), по которым перемещается горная масса. Свойства горной массы (например, насыпная плотность) меняются в каждом элементе ДКК отдельно по заданным алгоритмам с учетом исходных данных по мере ее преобразования (изменение крупности, особенности уплотнения в зависимости от формы насыпи и длительности нахождения в данном агрегате и т.п.).

Передача горной массы между элементами ДКК осуществляется по принципу: если есть свободный объем – передается в соответствии с производительностью одного и приемной способностью другого, если нет – накапливается. При заполнении элемента горной массой до номинальной вместимости прием им горной массы прекращается.

Для точного определения передаваемого объема горной массы между элементами ДКК в целом расчет ведется оригинальным способом: сначала параметры определяются предварительно, а затем повторным расчетом определяются точные значения.

Конусная дробилка детализирована как совокупность двух объемов: приемной части и камеры дробления, приемная и пропускная способность которых задаются в зависимости от типоразмера дробилки.

Такая структура модели позволяет воспроизводить движение горной массы по ДКК с высоким коэффициентом подобия (при верно заданных исходных данных), а также делает возможным изменять структуру ДКК, заменяя один вид агрегата другим (например, менять тип дробилки), а также разветвлять или объединять потоки (например, предусматривать выгрузку из бункера одним или двумя питателями на один и тот же конвейер).

Визуализация моделирования выполнена в трех основных окнах (рис.1):

- окно структуры ДКК, в котором можно выбрать интересующий элемент для детального отображения показателей имитационного моделирования;
- окно визуализации моделирования для выбранного элемента ДКК;
- окно с параметрами (исходными данными) элементов ДКК.

Вкладки с параметрами элементов ДКК

Окно визуализации моделирования для выбранного элемента ДКК

The screenshot displays a software interface for modeling a crushing-conveyor complex (ДКК). The main window, titled 'Form1', shows a 3D cutaway view of the complex. At the top, a yellow truck is labeled 'ДПУ 7200'. Below it, a conveyor system is shown with various components. A sidebar on the right lists elements and their parameters. The bottom panel shows a navigation structure and control buttons.

Параметры элементов ДКК (из вкладки):

- Самосвалов в очереди: 20**
- ВелА3-75310
- ВелА3-75603
- ВелА3-75131
- ВелА3-7521
- ВелА3-7530
- ВелА3-75570
- ВелА3-75310
- ВелА3-75603
- ВелА3-75131
- ВелА3-7521

Параметры элементов (из вкладки):

- №3 ВелА3-7530:** $d_{\text{Вас}} = 0,52 \text{ т} / 0,24 \text{ м}^3$, $V_{\text{чек}} = 0,39 \text{ т} / 0,07 \text{ м}^3$, 0,07 %
- №1 ВелА3-75131:** $d_{\text{Вас}} = 0,34 \text{ т} / 0,15 \text{ м}^3$, $V_{\text{чек}} = 0,33 \text{ т} / 0,00 \text{ м}^3$, 0,00 %
- №2 ВелА3-7521:** $Q = 1,75 \text{ т}$, $V = 0,11 \text{ м}^3$, $ro = 2,20 \text{ т/м}^3$, $d_{\text{Вас}} = 0,49 \text{ т} / 0,22 \text{ м}^3$, $V_{\text{чек}} = 0,54 \text{ т} / 0,05 \text{ м}^3$, 0,05 %
- №4 ВелА3-75570:** $d_{\text{Вас}} = 0,23 \text{ т} / 0,11 \text{ м}^3$, $V_{\text{чек}} = 0,28 \text{ т} / 0,00 \text{ м}^3$, 0,00 %

Параметры элементов (из вкладки):

- Груза в дробилке:** 0,0 т, 0,0 м³, 2,5 т/м³
- Пропускная способность:** 6500,0 т/ч, 2600,0 м³/ч
- Всего:** 0,0 т, 0,0 м³, 0,0 м³, 0,0 м³
- Пит:** 2880,00 м³/ч / 7200,00 т/ч, $V_{\text{пит}} = 0,00 \text{ м}^3 / 0,00 \text{ т}$, $V_{\text{чек}} = 0,00 \text{ м}^3 / 0,00 \text{ т}$, $V_{\text{пит}} = 0,36 \text{ м}^3 / 0,90 \text{ т}$
- Выскамо:** 2,5 т, 1,0 м³

Управление: Старт, Пауза, Время: 5 с.

Общая структура ДКК

Рис. 1. Окно программного обеспечения для моделирования дробильно-конвейерного комплекса (разработано ИГД УрО РАН)

Апробация модели выполнена на примере рудного ДКК с тремя магистральными конвейерами, штабелеукладчиком, ДПУ на базе конусной дробилки с двумя бункерами и двумя пластинчатыми питателями под разгрузочным бункером. Наличие двух питателей обеспечивает их резервирование по надежности, предусматривается, что при выходе из строя одного из питателей второй может быть форсирован на непродолжительное время до 80 % суммарной номинальной производительности двух питателей.

Моделирование вариантов с разной интенсивностью и неравномерностью потока автосамосвалов, производительности дробилки и пластинчатых питателей, вместимостями бункеров ДПУ показали, что

– разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит функционирование ДКК в соответствии с заданной его структурой и параметрами основных элементов;

– принятая структура и алгоритм модели обеспечивают возможность определять рациональные параметры элементов ДКК путем перебора вариантов при моделировании, в том числе по динамически изменяющимся показателям, например: по критерию стабилизации потока руды на конвейерной линии, по приемной способности ДПУ с учетом неравномерности и объемных показателей потока автосамосвалов и др.;

– благодаря выгрузке данных по результатам моделирования не только в виде сводных показателей, но и в виде потока данных (таблиц), имеется возможность передавать их в другое ПО для дополнительных расчетов, не предусмотренных в модели ДКК, что позволяет решать широкий круг задач в зависимости от специфики.

Моделирование показало, что одним из важных внешних факторов, который необходимо учитывать, является неравномерность прибытия автосамосвалов, поскольку она существенно влияет как на требуемую вместимость приемного бункера для компенсации колебаний, так и на резерв по номинальной производительности дробилки.

На рис. 2 и 3 приведен пример полученных при моделировании ДКК данных. Видно, что подобранная рационально вместимость приемного и разгрузочного бункеров обеспечивает стабилизацию потока руды, транспортируемой дробильно-конвейерным комплексом: на входе имеется стохастический неравномерный поток руды, доставляемой автосамосвалами, а на выходе из разгрузочного бункера имеет место постоянный рудопоток. Соответственно, далее по конвейерной линии (рис. 3) поток стабилен и изменяется только в зависимости от существенных перерывов в поставке руды автосамосвалами к ДПУ. Вышеуказанные особенности можно учитывать с применением описанной имитационной модели и подбирать рациональные параметры ДКК, которые будут обеспечивать наибольшую стабильность потока при приемлемом времени передачи горной массы от приемного бункера ДПУ до выхода с окончного конвейера.



Рис. 2. Изменение интенсивности рудопотока и объема заполнения бункеров во времени при работе дробильно-перегрузочной установки

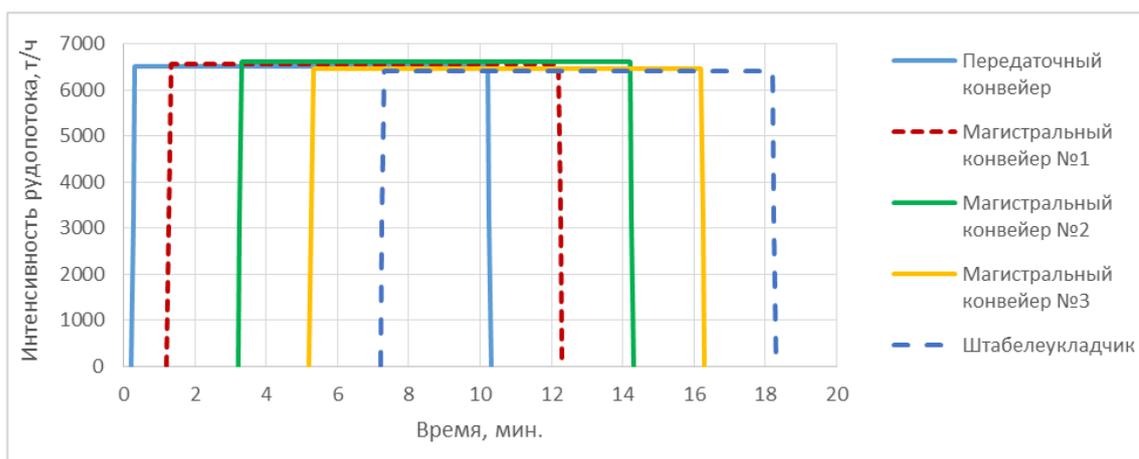


Рис. 3. Изменение во времени интенсивности рудопотока по конвейерам дробильно-конвейерного комплекса при его работе по транспортированию кратковременно поданной руды в объеме 650 т

Как показано ранее [15], возможно применение имитационной модели простой одноуровневой структуры для решения задач по обоснованию рациональных технологических и компоновочных параметров дробильно-перегрузочной установки в увязке с внешними факторами, определяемыми работой сборочного транспорта и дробильно-конвейерного комплекса. Решение подобных задач востребовано, например, при эскизном техническом проектировании и при разработке общих технологических решений при горно-технологическом проектировании. Вышеуказанное относится к основной части модели ДКК – к дробильно-перегрузочной установке. Следовательно, утверждение справедливо и для модели ДКК в целом.

Учет временных закономерностей позволяет учитывать продолжительность передачи руды по протяженной конвейерной линии для организации работы окончного агрегата, например, перехода отвалообразователя на следующий ряд отсыпки или перемещения штабелеукладчика на рудном складе к следующей зоне штабелирования. Учет таких нюансов уже при проектировании ДКК обеспечивает возможность его ритмичной работы при эксплуатации.

Как показывает опыт [16], а также теоретические исследования [17], при оценке рациональной вместимости приемного бункера должен учитываться комплекс параметров: количество мест разгрузки самосвалов, интенсивность прибытия автосамосвалов, определяемая в том числе неравномерностью их потока, производительность дробилки. Применение имитационного моделирования обеспечивает возможность найти оптимум сочетания указанных параметров в отличие от линейного расчета, который дает значение, не учитывающее все аспекты динамики грузопотоков. Расчеты [15, 17] показали, что количество горной массы в приемном бункере имеет специфическую динамику в зависимости от вышеуказанных параметров и факторов. Так, увеличение грузоподъемности самосвалов в общем случае повышает требуемую вместимость бункера, а уменьшение – снижает. В то же время, при высокой неравномерности прибытия автосамосвалов даже малой грузоподъемности и превышении кратковременной интенсивности загрузки ДПУ над производительностью ДПУ (прежде всего дробилки) наблюдается нарастающее заполнение бункера, что говорит о необходимости выбирать более производительную дробилку либо увеличивать вместимость бункера для данных горно-технологических условий.

Эксперименты с разработанной моделью ДПУ показали, что учет реальных потоков материала и связанных с ними неочевидных закономерностей при ее применении позволяет оптимизировать конструктивные параметры ДПУ на существенную величину.

ну, например: вместимость приемного бункера на 10 – 20 %, разгрузочного бункера на 10 – 35 %, производительность дробилки 5 – 7 %.

Таким образом, в ИГД УрО РАН разработано приложение для персонального компьютера, в котором можно, варьируя параметры ДКК, моделировать его функционирование. Разработанная имитационная модель позволяет за счет моделирования во времени движения горной массы по элементам ДПУ определить с одной стороны работоспособные параметры ДПУ и ДКК в целом, учитывающие реальные потоки материала и неочевидные процессы и закономерности, а с другой – оптимизировать эти параметры под конкретные условия, нивелируя необоснованно принимаемые запасы по производительности и вместимости (которые в конечном итоге определяют материалоемкость и стоимость).

Выводы

1. Разработана имитационная модель ДКК, включающая в состав дробильно-перегрузочную установку, передаточный и магистральные конвейеры, а также оконечный агрегат (штабелеукладчик для рудного ДКК или отвалообразователь для породного ДКК), обеспечивающая воспроизведение функционирования ДКК с высоким коэффициентом подобия без необходимости проведения предварительных исследований на реальных объектах или макетных моделях и составления математических моделей взаимосвязи грузопотоков. Это позволяет моделировать работу ДКК широкого спектра параметров, подбирая наиболее рациональный вариант под конкретные горнотехнические условия разработки месторождения.

2. Апробация разработанной имитационной модели ДКК показала, что ее применение обеспечивает возможность выбора рациональных технологических параметров ДКК в целом и его элементов по различным целевым показателям. В частности, путем подбора параметров оборудования дробильно-перегрузочной установки (вместимость приемного и разгрузочного бункеров, производительность дробилки, производительность пластинчатых питателей) обеспечена стабилизация грузопотока: при неравномерности подачи руды автосамосвалами в приемный бункер ДПУ на выходе ДПУ (разгрузочная тетка передаточного конвейера) наблюдается постоянный рудопоток.

3. Перспективой развития разработанного ПО являются:

- детальный учет параметров ДКК, связанных с его размещением в карьере (углы наклона ставов, траектория конвейеров, высота встраивания ДПУ в уступ и т.п.);
- внедрение модуля расчета параметров конвейеров в зависимости от основных технологических требований;
- учет натуральных и стоимостных параметров функционирования оборудования ДКК (потребление электроэнергии, эксплуатационные расходы и т.п.).

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлёв А.Г., Жариков С.Н., Шимкив Е.С., 2024. Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С.35-44.
2. Глебов А.В., Семёнкин А.В., Кармаев Г.Д., Берсенёв В.А., 2017. Новые подходы и решения по применению циклично-поточной технологии на карьерах. *Горный журнал*, № 6, С. 48-52. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.09.
3. Глебов А.В., 2022. Концепция методологии взаимной адаптации автомобильно-конвейерного транспорта и развивающейся горнотехнической системы карьера. *Горная промышленность*, № 1S, С. 78 – 85. DOI:10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.
4. Решетняк С.П., 2015. Современные тенденции в проектировании циклично-поточной технологии на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 56, С.126-132.

5. Журавлев А.Г., Семенкин А.В., Черепанов В.А., Глебов И.А., Чендырев М.А., 2022. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров. *Горная промышленность*, №1S, С. 53-62. DOI: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
6. Yamashita Andre S., Thivierge Alex, Euzébio Thiago A.M., 2021. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, vol. 170. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107036.
7. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi., 2020. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, vol. 376, P. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
8. Юдин А.В., Шестаков В.С., Сайтов В.И., Абдулкаримов М.К., 2020. К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте. *Известия вузов. Горный журнал*, № 4, С. 99-112.
9. Kanishk Bhadani, 2020. *Optimization Capabilities for Crushing Plants. Doctoral thesis*. Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/360235473_Optimization_Capabilities_for_Crushing_Plants. (дата обращения: 20.11.2024)
10. Берсенев В.А., Кармаев Г.Д., Семенкин А.В., Сумина И.Г., 2018. Схемы циклично-поточной технологии при различном залегании месторождений полезных ископаемых. *Проблемы недропользования*, № 4 (19), С. 13-21.
11. Билин А.Л., 2012. Особенности применения алгоритма профессора С.Д. Коробова для определения границ карьеров и обоснования режима горных работ. *Записки горного института*, Т.198, С. 55-60.
12. Журавлёв А.Г., Черных В.В., 2023. Компьютерное моделирование при оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, №12, С. 20-31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.
13. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 2012617844 Российская федерация. Транспортная система карьера (ТСК) / Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев, Л.А. Трофименко (РФ). – 2012615505; заявл. 03.07.12; опубл. 30.08.12.
14. Моисеев Н.Н., 1981. *Математические задачи системного анализа*. Москва: Наука.
15. Журавлёв А.Г., Кардашин Е.Д., 2024. Особенности моделирования работы дробильно-перегрузочной установки при оптимизации её конструктивно-технологических параметров. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*, №24, С. 112-121. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.
16. Исмагилов Р.И., Журавлёв А.Г., Фурин В.О., 2024. Проектирование современных российских дробильно-перегрузочных установок для комплексов ЦПТ. *Горная промышленность*, № 3, С. 48-55. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-48-55.
17. Чендырев М.А., Журавлев А.Г., 2022. Рационализация геометрических параметров приемных бункеров дробилок ККД при автомобильном транспорте. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.

References

1. Yakovlev V.L., Glebov A.V., Zhuravlev A.G., Zharikov S.N., Shimkiv E.S., 2024. Metodologicheskie aspekty perekhodnykh protsessov pri formirovaniï gornotekhnicheskikh sistem glubokikh kar'erov [Methodological aspects of transitional processes in the formation of mining engineering systems of deep quarries]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh isko-paemykh*, № 6, P.35-44.

2. Glebov A.V., Semenkin A.V., Karmaev G.D., Bersenev V.A., 2017. Novye podkhody i resheniya po primeneniyu tsiklichno-potochnoi tekhnologii na kar'erakh [New approaches and solutions for the use of cyclic-flow technology in quarries]. *Gornyi zhurnal*, № 6, P. 48-52. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.09.
3. Glebov A.V., 2022. Kontsepsiya metodologii vzaimnoi adaptatsii avtomobil'no-konveiernogo transporta i razvivayushcheisya gornotekhnicheskoi sistemy kar'era [A concept of methodology of mutual adaptation of automobile conveyor transport and the developing mining and technical quarry system]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1S, P. 78 – 85. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.
4. Reshetnyak S.P., 2015. Sovremennye tendentsii v proektirovanii tsiklichno-potochnoi tekhnologii na kar'erakh [Current trends in the design of cyclic-flow technology in quarries]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 56, P.126-132.
5. Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A., Glebov I.A., Chendyrev M.A., 2022. Zadachi razvitiya perspektivnykh tsiklichno-potochnykh tekhnologii dlya glubokikh kar'erov. *Gornaya promyshlennost'* [The tasks of developing promising cyclic-flow technologies for deep quarries], №1S, P. 53-62. DOI: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
6. Yamashita Andre S., Thivierge Alex, Euzébio Thiago A.M., 2021. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, vol. 170. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107036.
7. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi., 2020. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, vol. 376, P. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
8. Yudin A.V., Shestakov V.S., Saitov V.I., Abdulkarimov M.K., 2020. K opredeleniyu vmestimosti bunkera v sostave peregruzochnoi sistemy pri kombinirovannom transporte [On determining the capacity of the bunker as part of the transshipment system for combined transport]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 99-112.
9. Kanishk Bhadani, 2020. *Optimization Capabilities for Crushing Plants. Doctoral thesis*. Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/360235473_Optimization_Capabilities_for_Crushing_Plants. (data obrashcheniya: 20.11.2024)
10. Bersenev V.A., Karmaev G.D., Semenkin A.V., Sumina I.G., 2018. Skhemy tsiklichno-potochnoi tekhnologii pri razlichnom zaleganii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Schemes of cyclic-flow technology with different occurrence of mineral deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4 (19), P. 13-21.
11. Bilin A.L., 2012. Osobennosti primeneniya algoritma professora S.D. Korobova dlya opredeleniya granits kar'erov i obosnovaniya rezhima gornykh rabot [Features of the application of Professor S. D. Korobov's algorithm for determining the boundaries of quarries and justifying the mining regime]. *Zapiski gornogo instituta*, Vol.198, P. 55-60.
12. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V., 2023. Komp'yuternoe modelirovanie pri otsenke vliyaniya dorozhnykh faktorov na proizvoditel'nost' kar'ernogo avtotransporta. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Computer modeling in assessing the impact of road factors on the productivity of motor vehicles]. *Inzhiniring georesursov*, Vol. 334, №12, P. 20-31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.
13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of a computer program]. 2012617844 Rossiiskaya federatsiya. Transportnaya sistema kar'era (TSK) / Yu.A. Bakhturin, A.G. Zhuravlev, L.A. Trofimenko (RF). – 2012615505; zayavl. 03.07.12; opubl. 30.08.12.
14. Moiseev N.N., 1981. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka.
15. Zhuravlev A.G., Kardashin E.D., 2024. Osobennosti modelirovaniya raboty drobil'no-peregruzochnoi ustanovki pri optimizatsii ee konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov [Features of modeling the operation of a crushing and transshipment plant while

optimizing its structural and technological parameters]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, №24, P. 112-121. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.

16. Ismagilov R.I., Zhuravlev A.G., Furin V.O., 2024. Proektirovanie sovremennykh rossiiskikh drobil'no-peregruzochnykh ustanovok dlya kompleksov TsPT [Design of modern Russian crushing and transshipment facilities for CPT complexes]. *Gornaya promyshlennost'*, № 3, P. 48-55. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-48-55.

17. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G., 2022. Ratsionalizatsiya geometricheskikh parametrov priemnykh bunkerov drobilok KKD pri avtomobil'nom transporte [Rationalization of the geometric parameters of the receiving bunkers of KKD crushers in automobile transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.