

Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ

В.В. Зиновьев^{1,2}✉, И.С. Кузнецов^{1,2}, П.И. Николаев^{1,2}, А.Н. Стародубов^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация
✉zv150671@gmail.com

Резюме: Одной из основных проблем при отработке угольных месторождений являются сложные горно-геологические условия, обусловленные значительной глубиной ведения горных работ, запыленностью и загазованностью атмосферы, экстремальной температурой, наличием радиоактивных элементов и другими факторами, что несет угрозу здоровью и жизни людей, участвующих в технологических процессах, и снижает эффективность горнодобывающих предприятий. Поэтому современное производственно-технологическое развитие угольной отрасли направлено на освоение технологий добычи угля без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ за счет разработки и внедрения инновационных технологий на основе применения роботизированных горных машин. Развитие роботизации непосредственно связано с решением научных проблем, относящихся к выбору рациональных параметров технологий горных работ с применением шахтной робототехники. Это, в свою очередь, требует решения задач по оценке уровней роботизации и объемов ее применения, согласованию возможностей операторов с характеристиками роботов при человеко-машинном управлении (где часть операций выполняется автономно горной машиной, а часть при помощи оператора дистанционного управления), системному анализу сочетания роботизированных и традиционных процессов в технологии. Решение этих задач осложняется многообразием условий залегания угольных пластов, многовариантностью способов организации работ, стохастичностью и динамичностью процессов и требует комплексного учета всех этих факторов при выборе рациональных параметров технологий. Предложено использовать имитационный подход для отображения роботизируемых технологий горных работ, который позволяет решать новые обозначенные задачи, не поддающиеся аналитическим и численным методам. Приводится модель в виде сети систем массового обслуживания с программной реализацией на языке GPSS World, отображающая взаимодействие роботизированных горных машин при ведении горных работ открытым и подземным способами, а также некоторые результаты вычислительных экспериментов. Результаты проведенных исследований позволяют осуществлять научно обоснованный выбор рациональных параметров роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ.

Ключевые слова: добыча угля, открытые и подземные горные работы, имитационное моделирование, дистанционное управление, роботизированные технологии, системы массового обслуживания

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки техническо-го состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. №АААА-А21-121012290021-1).

Для цитирования: Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Николаев П.И., Стародубов А.Н. Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ. *Горная промышленность*. 2023;(S2):65–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76>

Simulation modelling of robotic open and underground coalmining systems

V.V. Sinoviev^{1,2}✉, I.S. Kuznetsov^{1,2}, P.I. Nikolaev^{1,2}, A.N. Starodubov^{1,2}

¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

² T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
✉zv150671@gmail.com

Abstract: One of the main challenges in coal production is complicated mining and geological conditions, caused by increasing depth of mining, dust and gas content in the mine air, extreme temperatures, radiation etc., that poses a threat to miners' health and life and decreases the efficiency of mining companies. Therefore, modern production and technological development of the coal industry is based on development of mining systems without permanent miners' presence in the mining area through development and implementation of robotized mining machines. Robotization progress is directly related to the solution of scientific problem of choosing rational parameters of mining systems with robotization elements. In its turn, it requires to assess the levels and scope of robotization, matching of operators' possibilities with robots' characteristics in man-machine interface (a part of the operations is

performed by the mining machine autonomously, the other part is done by the operator remotely), system analysis of combination of traditional and robotized processes in the mining system. Solution of this problems is complicated by the variety of coal seams occurrences, variations in work organization, stochasticity and dynamism of processes, and requires complex consideration of all these factors for choosing the rational parameters for the mining system. Simulation approach to modeling mining robotization allows to resolve the identified problems, that cannot be managed using the analytical and numerical analysis. A queuing network, realized as software using the GPSS World programming language, correctly displays interaction of mining machines in open and underground coalmining. The paper also presents some simulation experiments. Queuing network helps to make a scientifically based choice of the rational parameters for robotic systems in open and underground mining.

Keywords: open coalmining, underground coalmining, simulation modelling, remote control, robotized technologies, queuing systems, queuing network

Acknowledgments: The studies were performed with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0002 'Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating without permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction' (Reg. No.AAA-A-A21-121012290021-1)

For citation: Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation modelling of robotic open and underground coalmining systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):65–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76>

Введение

Дальнейшее развитие угольной отрасли связано с разработкой технологий, ориентированных на минимизацию присутствия людей в зонах ведения горных работ и переходу к безлюдным технологиям. Существуют решения по созданию технологий разработки угольных месторождений с использованием газификации, растворения, гидрогенизации, поверхностно-активных веществ, ядерных, электронно-лучевых, тепловых, тонкоструйных или плазменных средств разрушения горного массива. Такие технологии, изначально ориентированные на полное отсутствие человека в зонах ведения горных работ, носят единичный и локальный характер по причине отсутствия должного научного обоснования и технологической нереализуемости в условиях подходов текущего технологического уклада. Подавляющее большинство решений основано на вводе шахтной робототехники в традиционные технологии горных работ с механизированной отработкой угольных пластов. Роботизация процессов при добыче твердых полезных ископаемых позволяет передать машинам функционал, выполняемый горнорабочими и уменьшить вероятность травм и влияние неблагоприятных условий на

человека. Шахтная и карьерная робототехника развивается на стыке машиностроительной робототехники и горного дела. Принципиальные отличия шахтной и карьерной робототехники от машиностроительной, связанные с перемещением рабочей зоны и особенностями горных работ, позволяют считать ее самостоятельным научным направлением [1–4].

Помимо проблем, связанных с разработкой технических средств, необходимо решать научные задачи, относящиеся к выбору рациональных параметров технологий горных работ с применением шахтной и карьерной робототехники: оценка уровней роботизации и объемов ее применения; согласование возможностей оператора с характеристиками роботов при человеко-машинном управлении; системный анализ сочетания роботизированных и традиционных процессов в технологии [4].

Задачи при роботизации горных работ

Проведенный анализ известных предложений по роботизации открытых и подземных горных работ позволил выделить следующие уровни роботизации в зависимости от объема человеческого участия (рис. 1).



Рис. 1
Уровни роботизации процессов при отработке твердых полезных ископаемых

Fig. 1
Levels of process robotization in solid minerals mining

Уровень 0. Отсутствие роботизации. Все технологические операции выполняются горнорабочими.

Уровень 1. Дистанционное управление (дублирующее управление на безопасном для оператора удалении). Все интеллектуальные технологические операции осуществляются горнорабочими, но визуальный обзор трассы, забоя и выработки производится посредством видеокамер.

Уровень 2. Реализация «технического зрения». Сканирование трассы, забоя, горной выработки производится средствами «технического зрения» – лазерными сканерами или эхолотами. Горнорабочий дистанционно управляет горной машиной по 3D-модели выработки. Преимущество данного способа состоит в том, что «техническое зрение» дает более точное изображение по сравнению с видеокамерой, это позволяет рабочему точнее выполнять технологические операции.

Уровень 3. Интерактивное управление. Управление горной машиной при выполнении наиболее сложных операций и работ, требующих творческого подхода, осуществляет оператор в режиме дистанционного управления, а рутинные операции осуществляются в автоматическом режиме. При таком управлении посредством «технического зрения» производится автоматическое сканирование трассы или горной выработки. Распознавание полученной 3D-модели выработки и объектов, находящихся в ней, а также управление перемещением горных машин осуществляется при помощи нейронных сетей.

Уровень 4. Полная роботизация. Позволяет использовать технику в полностью автономном режиме под управлением программно-аппаратного комплекса, лишённого потребности в непосредственном участии оператора для выполнения операций технологического цикла. Горные машины автоматически выполняют все интеллектуальные технологические операции: с помощью «технического зрения» сканируют горные выработки, с помощью нейросетей распознают объекты, автономно выполняют перемещение по выработкам и манипуляции рабочими органами. Горнорабочий выполняет роль контролера нескольких горных машин.

С одной стороны, более высокий уровень роботизации приводит к повышению безопасности за счет вывода людей из зон ведения горных работ, с другой стороны, требует больших затрат на роботизацию технологических операций. Также высокий уровень роботизации не всегда приводит к повышению производительности из-за несогласованности во времени и пространстве работы горных машин, роботизированных на разных уровнях.

Для уменьшения инвестиционных рисков при роботизации технологических процессов необходима оценка влияния уровней роботизации на показатели эффективности технологии. *Возникают задачи многовариантного анализа и выбора стратегии роботизации на разных уровнях, а также определения рационального объема роботизации.*

Системы управления роботами по способу управления можно разделить на два класса [1]: человеко-машинные, имеющие оператора в контуре управления, и автоматические, в которых оператор исключается из контура управления и взаимодействует с роботом только на этапе обучения.

Человеко-машинные системы реализуют дистанционное или интерактивное (полуавтоматическое, комбинированное) управление, где часть операций выполняется автономно горной машиной, а часть при помощи оператора дистанционного управления. Такие системы уже давно

применяются на практике для управления несколькими автосамосвалами при ведении открытых горных работ, управления погрузочно-транспортными машинами, комбайнами или бурильными установками из безопасных мест при ведении подземных горных работ [2–7].

Автоматическое управление шахтным роботом в изменяющейся среде требует применения систем технического зрения, нейронных сетей, нечеткой логики, экспертных систем и относительно горнодобывающей промышленности находится в стадии разработки. Наиболее успешные результаты в развитии таких систем получены специалистами по автоматизации горных машин в Австралии, Канаде, США, Швеции [1; 4; 5; 8–11].

Анализ предложений по роботизации открытых и подземных горных работ показал, что все они сводятся к автоматизации процессов управления оборудованием (автосамосвалами, экскаваторами, погрузчиками, проходческими и очистными комбайнами, бурильными установками, погрузочно-доставочными машинами, анкероустановщиками, зарядчиками), контролю и мониторингу операций в технологиях, приспособленных для человека. При этом многие операции: оборка забоя, наращивание коммуникаций, разметка шпуров для крепления анкерной крепью, соединение детонаторов, оценка состояния забоя, сборка элементов крепи, зачерпывание горной массы ковшом экскаватора, селективная выемка, работа в нестандартных ситуациях, ремонтные работы и т.п. представляют операции распознавания объектов в неориентированной среде и сложно поддаются роботизации. Такие операции требуют более высокого уровня роботизации и значительных финансовых вложений, что в случае добычи менее дорогостоящего, чем руда, угля может не оправдать вложенных затрат. Эти обстоятельства не позволяют в настоящее время создать безлюдную технологию и полностью вывести людей из опасных и неблагоприятных для человека зон.

Таким образом, при роботизации технологий подземных и открытых горных работ в ближайшее время будет использоваться человеко-машинное управление, требующее наличия оператора. Даже при самом высоком уровне роботизации – автоматическом управлении, необходимо участие оператора для обучения автоматическим повторениям циклов до очередного изменения среды. Соответственно, при оценке и выборе рациональных параметров технологий горных работ *возникают задачи по выявлению зависимостей изменения показателей эффективности роботизируемых технологий подземных и открытых горных работ от соотношения долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых горных машин и операторов, времени выполнения основных технологических операций.*

С позиции системного подхода проблемой является разность между существующим и желаемым состояниями системы. Необходимо рассматривать проблему в динамике с оценкой альтернатив ее решения другими средствами. В технологиях открытых и подземных горных работ функционирование роботизированной горной машины может не повлиять на эффективность общей технологической цепи из-за несогласованной работы роботизированного и нероботизированного оборудования во времени и пространстве. *Возникает ряд задач:*

- *проведение сравнительной оценки альтернативных технико-организационных вариантов и выбор наиболее эффективного решения;*

- *нахождение путей повышения степени использова-*

ния оборудования путем согласования технологических операций во времени и пространстве;

– выявление «узких мест» и выработка предложений по их устранению;

– выбор состава и характеристик роботизированного оборудования.

Решение обозначенных задач осложняется многообразием условий залегания угольных пластов, разнообразием предложений по роботизации операций, многовариантностью способов организации работ, стохастичностью и динамичностью технологических процессов и требует комплексного учета всех этих факторов при оценке и выборе параметров технологий с целью повышения безопасности и эффективности открытых и подземных горных работ.

Имитационная модель горных работ

Технологические процессы в горном деле можно разделить на непрерывные и дискретные. К непрерывным относятся движение воздушных потоков по выработкам, транспортирование по конвейерам, распределение горного давления. Но большинство процессов относится к дискретным с конечным числом событий: передвижка крепи, бурение шпура, прибытие транспортных единиц к местам погрузки и разгрузки. Многие непрерывные процессы стараются представить в виде дискретных, легче поддающихся имитации, например, непрерывный поток угля на конвейере представляют в виде движения некоторого числа дискретных объемов в единицу времени. Опыт моделирования разных типов дискретно-стохастических систем, в том числе в горном деле, свидетельствует о том, что приблизительно 80% моделей основаны на теории систем массового обслуживания (ТМО) [1; 11; 12]. Исходя из этого для отображения роботизируемых технологий горных работ выбран математический аппарат систем массового обслуживания (СМО).

Разработана универсальная дискретно-стохастическая динамическая модель в виде сети многофазных многоканальных систем массового обслуживания (СМО): $U1 \cup U2 \cup U3 \cup U4 \cup U5$, причем $U1 \cap U2$ и $U3 \cap U2$, состоящая из пяти узлов (У1–У5), отображающих посредством СМО вида $G1/G2/1/Nz$ работы по разрушению и погрузке горной массы (узел У1), СМО $G1/G2/m_{тр}/Nz$ – работы по доставке горной массы (У2), СМО – $G1/G2/m_{разгр}/n$ – работы по разгрузке горной массы (У3), СМО – $G1/G2/m_{креп}$ – работы по креплению выработки (У4), СМО – $G1/G2/m_{оп}/N_{дист}$ – дистанционное управление горными машинами (У5) (рис. 2).

В соответствии с символикой Кендалла–Башарина [13; 14]: $G1$ – закон распределения поступления заявок в узлы; $G2$ – закон распределения обслуживания заявок в узлах; Nz – количество заявок, ожидающих обслуживания в узлах; $m_{тр}$ – количество горнотранспортных машин, шт; $m_{разгр}$ – число мест для одновременной разгрузки горнотранспортных машин, шт; n – количество заявок, ожидающих обслуживания в узле 3, шт; $m_{креп}$ – количество используемых крепеустановщиков, шт; $m_{оп}$ – количество операторов дистанционного управления, шт; $N_{дист}$ – количество заявок, ожидающих обслуживания в узле 5, шт.

Указанная СМО позволяет моделировать взаимодействие роботизированных горных машин с человеко-машинным управлением в технологиях открытых и подземных горных работ с учетом уровней роботизации, стохастичности и динамичности процессов.

Обслуживающими приборами в СМО являются операторы дистанционного управления, машина для разрушения горного массива и погрузки отбитой горной массы, горнотранспортные машины, машины для крепления вы-

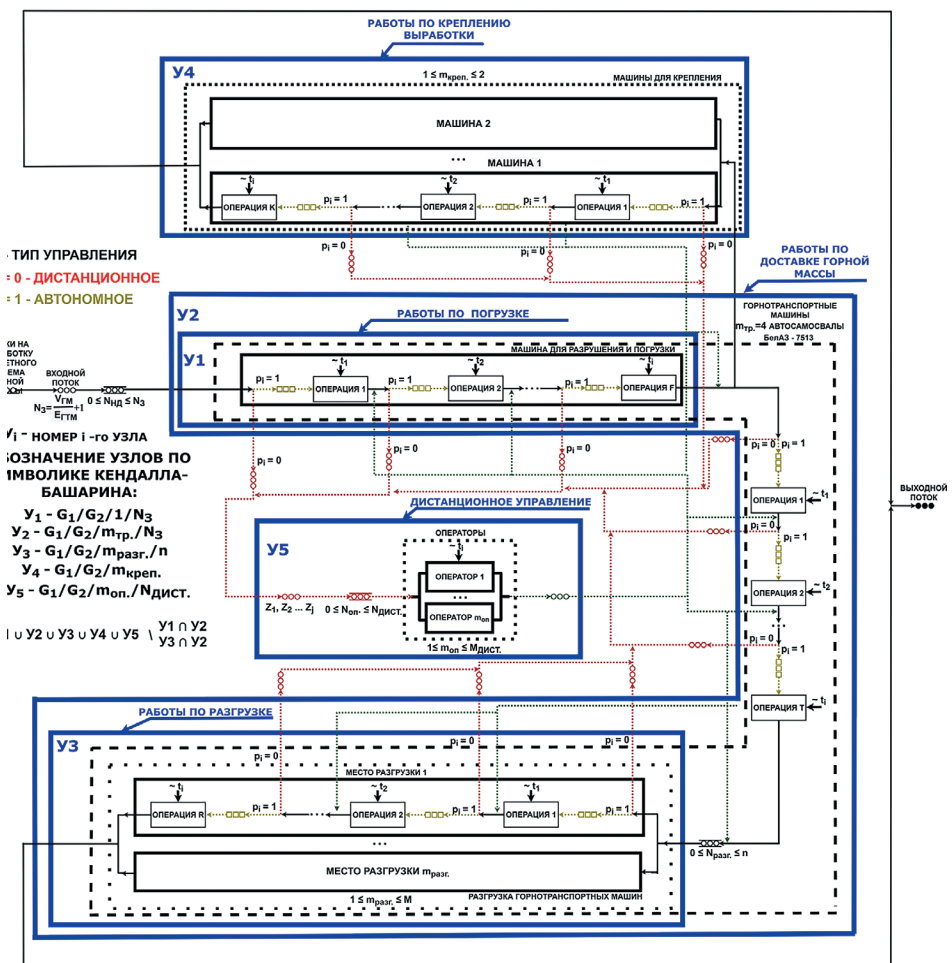


Рис. 2
 Универсальная дискретно-стохастическая динамическая модель горных работ в виде СМО

Fig. 2
 Universal discrete-stochastic dynamic model of mining as queuing network

работки (при ведении подземных горных работ), места для разгрузки горнотранспортных машин.

При ведении открытых горных работ машиной для разрушения и погрузки является экскаватор, а при ведении подземных горных работ – комбайн или бурильная установка. Роль горнотранспортных машин при открытых горных работах выполняют автосамосвалы, а в подземных шахтах – погрузочные машины непрерывного или периодического действия, самоходные вагоны.

Входной поток заявок представляет собой дискретные объемы горной массы, которые необходимо отработать в соответствии с планом. Количество таких заявок определяется как:

$$N_3 = V_{ГМ} / E_{ГТМ} + 1, \tag{1}$$

где $V_{ГМ}$ – объем отбитой горной массы, м³; $E_{ГТМ}$ – вместимость горнотранспортной машины, м³.

Каждая заявка проходит через приборы, отображая работы по разрушению и погрузке горной массы, доставочные и разгрузочные работы. Время обслуживания заявки на каждой операции t_i задается случайным, отображая либо автоматическое, либо дистанционное управление посредством оператора. В случае занятости машины для разрушения и погрузки выполнением определенной операции и/или отсутствия свободной горнотранспортной машины заявки выстраиваются в очередь. Подобная очередь может образовываться и перед местами для разгрузки. Дисциплина обслуживания заявок осуществляется по правилу FIFO (первым пришел – первым обслужен).

Каждая операция в зависимости от уровня роботизации горных машин может выполняться в автоматическом режиме $p_i = 1$ или при помощи оператора дистанционного управления $p_i = 0$. Заявки z_1, z_2, \dots, z_j на дистанционное управление машинами становятся в очередь, пока оператор занят и управляет одной из горных машин, выполняя определенную операцию. Выбор заявки на дистанционное управление из очереди осуществляется также по правилу FIFO.

Выходной поток заявок представляет собой отработанные дискретные объемы горной массы.

Для аналитических расчетов сетей массового обслуживания, как правило, используют теорию вероятностных сетей, которая основывается на марковских и полумарковских процессах. Но большинство расчетов получено только для экспоненциальных законов распределения, однородных заявок и простейшей дисциплины обслуживания. Кроме того, при количестве узлов в сети больше трех СМО практически не поддается аналитическому решению [12; 13]. Разработанная СеМО состоит из пяти узлов и имеет неэкспоненциальные законы распределения про-

должительности технологических операций. В связи с этим для реализации созданной СеМО применен имитационный подход с использованием программного продукта GPSSWorld (ООО «Элина-Компьютер», Россия), который наиболее успешно используют для отображения дискретных систем. В GPSS World-моделях возможно учитывать множество случайных факторов, динамику взаимодействия горных машин во времени и пространстве и отказаться от многих ограничений и допущений, применяемых при аналитических и численных методах исследования СМО [15; 16].

Программная реализация представленной на рис. 2 универсальной модели СеМО выполнена в виде восьми типовых элементарных блоков (ТЭБ) GPSS World: «Задание объема отработки», «Работа в забое», «Транспортирование горной массы», «Работа в пунктах разгрузки», «Порожний ход», «Крепление выработки», «Исходные данные».

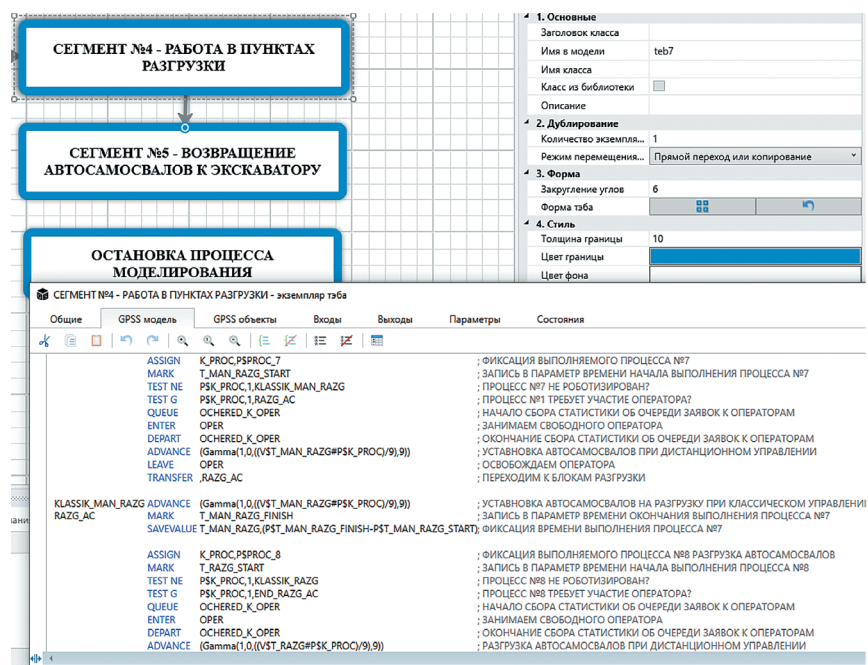


Рис. 3
Фрагмент ТЭБа
«Работа в пунктах разгрузки»

Fig. 3
Fragment of the 'Operation at dump points' typical elementary block

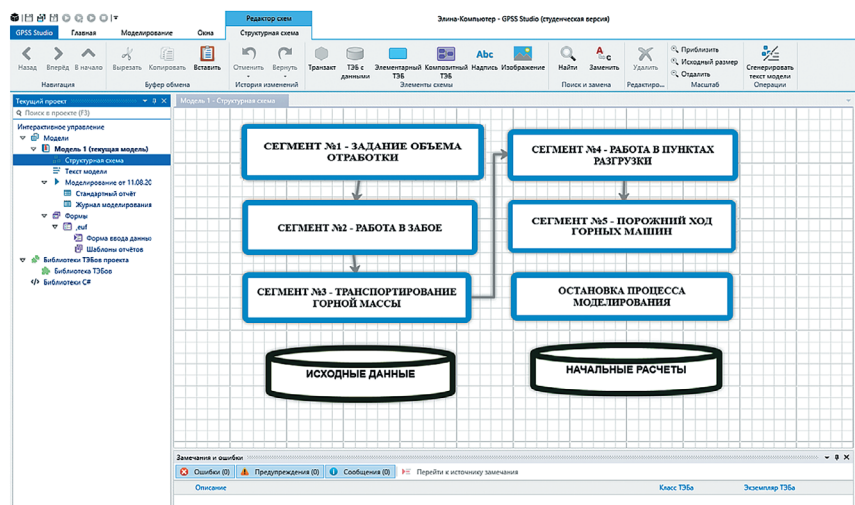


Рис. 4
GPSS-модель горных работ
в виде соединенных ТЭБов

Fig. 4
A GPSS Model of mining operations
as connected typical elementary blocks

«Начальные расчеты». Каждый ТЭБ содержит набор GPSS-блоков и команд, позволяющих моделировать основные технологические процессы: отбойку горной массы, погрузку, транспортирование, разгрузку, крепление выработанного пространства. На рис. 3 представлено содержание одного из ТЭБов – «Работа в пунктах разгрузки».

На рис. 4 представлена часть универсальной GPSS-модели в виде соединенных ТЭБов.

Перед началом моделирования в ТЭБ «Исходные данные» вводят значения параметров горнотехнических условий эксплуатации, физико-механических свойств горной массы, а также параметры используемых горных машин. На основании этого в ТЭБе «Начальные расчеты» определяется количество заявок, вводимых в модель, продолжи-

тельность маневровых работ, выполняемых автосамосвалами перед погрузкой, поворотов экскаватора к забою и т.д. в случае моделирования открытых горных работ, или продолжительность отбойки горной массы комбайном и ее погрузки в самоходный вагон при моделировании подземных горных работ. В табл. 1 для примера представлены переменные для ТЭБов «Задание объема отработки» и «Работа в забое».

Затем в соответствии с табл. 2 продолжительность выполнения технологических процессов умножается на коэффициент человеко-машинного управления – $k_{чм}$. Значения $k_{чм}$ получены на основе данных из материалов [4; 17–19].

Таблица 1
Переменные, вводимые в ТЭБ

Table 1
Variables that are set in typical elementary blocks

ТЭБ	Переменная	
	Открытые горные работы	Подземные горные работы
Задание объема отработки	$N_z = f(V_{гм}, V_{ас.ф}, E_{экс}, k_{нк}, k_{уп}, N_k, V_k, V_{ас}),$ <p>где N_z – количество вводимых заявок в модель, шт; $V_{гм}$ – разрабатываемый объем горной массы, м³; $V_{ас.ф}$ – фактический объем горной массы, погружаемый экскаватором в автосамосвал, м³; $E_{экс}$ – вместимость ковша экскаватора, м³; $k_{нк}$ – коэффициент наполнения ковша; $k_{уп}$ – коэффициент уплотнения горной массы; N_k – число разгружаемых ковшей экскаватором в автосамосвал, шт; V_k – объем горной массы, зачерпываемый ковшом экскаватора за один цикл, м³; $V_{ас}$ – паспортная вместимость кузова автосамосвала «с шапкой», м³</p>	$N_z = f(N_{зак}, H, S, L, \sigma_y, \sigma_{вп}, Q_y, Q_{вп}, k_{пр}, V_{св.ф}, k_{ру}, k_{рвп}),$ <p>где N_z – количество заявок, вводимых в модель, шт; $N_{зак}$ – число отрабатываемых заходок, шт; H – высота выработки, м; S – ширина заходки, м; L – длина заходки, м; σ_y – предел прочности угля на одноосное сжатие, кг/см²; $\sigma_{вп}$ – предел прочности вмещающих пород на одноосное сжатие, кг/см²; Q_y – плотность угля, кг/м³; $Q_{вп}$ – плотность вмещающих пород, кг/м³; $k_{пр}$ – коэффициент присечки, $V_{св.ф}$ – фактический объем горной массы, погруженной в самоходный вагон, м³; $k_{ру}$ – коэффициент разрыхления угля; $k_{рвп}$ – коэффициент разрыхления вмещающих пород</p>
Работа в забое	$t_{ман.погр} = f(n_i, k_{роб}),$ $t_{погр} = f(t_{пов.заб}, t_{черп}, t_{пов.ас}, t_{разг.ковш}, E_{экс}, \beta, C_k, d_{ср}, k_{нк}, k_{уп}, N_k, V_k, V_{ас}, k_{роб}),$ <p>где $t_{ман.экс}$ – продолжительность маневровых работ, выполняемых автосамосвалом перед погрузкой, с; $t_{пов.заб}$ – продолжительность поворота экскаватора к забою, с; $t_{черп}$ – продолжительность зачерпывания горной массы ковшом экскаватора, с; $t_{пов.ас}$ – продолжительность поворота экскаватора к автосамосвалу, с; $t_{разг.ковш}$ – продолжительность разгрузки ковша экскаватора в кузов автосамосвала, с; n_i – схема подъезда к экскаватору (тупиковая, сквозная, петлевая); β – средний угол поворота экскаватора, град; C_k – соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куска горной массы; $d_{ср}$ – диаметр средневзвешенного по объему куска горной массы, м</p>	$t_{отб} = f(Q_y, Q_{вп}, \sigma_y, \sigma_{вп}, Q_y, Q_{вп}, k_{пр}, V_{св.ф}, k_{ру}, k_{рвп}),$ $t_{погр} = f(Q_{п}, V_{св.ф}),$ <p>где $t_{отб}$ – продолжительность отбойки горной массы, с; $t_{погр}$ – продолжительность погрузки горной массы в самоходный вагон, с; Q_y – производительность комбайна непрерывного действия по углю, т/мин; $\sigma_{вп}$ – производительность комбайна непрерывного действия по вмещающим породам, т/мин; $Q_{п}$ – производительность перегружателя, т/мин</p>

Таблица 2
Значения $k_{чм}$ для различных операций

Table 2
Values of $k_{чм}$ for various operations

ТЭБ	Режим	$k_{чм}$	Причина	$k_{чм}$	Причина
			Открытые горные работы		Подземные горные работы
Работа в забое (маневровые работы)	ЧМ	1,78	Ограничение обзора	1,28	Ограничение обзора
	А	0	Челночное безразворотное движение бескабинных самосвалов	0,75	Автоматическое позиционирование
Работа в забое (загрузка)	ЧМ	1	Роботизация экскаватора не предусмотрена	1,20	Ограничение обзора
	А	1	Роботизация экскаватора не предусмотрена	0,80–0,85	Повышение точности позиционирования стрелы комбайна, оптимизация процесса резания
Транспортирование горной массы	ЧМ	1,86	Ограничение обзора	1,5	Ограничение обзора
	А	0,50–0,80	Использование систем позиционирования, оптимизация переключения передач	0,70–0,75	Автоматическая навигация движения при помощи лазерного сканера, гироскопа, датчика одометрии
Работа в пункте разгрузки	ЧМ	1,28	Ограничение обзора	1,30	Ограничение обзора
	А	0	Челночное безразворотное движение бескабинных самосвалов	0,80	Автоматическая навигация движения при помощи лазерного сканера, гироскопа, датчика одометрии
Порожний ход	ЧМ	2,20	Ограничение обзора	1,5	Ограничение обзора
	А	0,50–0,80	Использование систем позиционирования, оптимизация переключения передач	0,66	Автоматическая навигация движения при помощи лазерного сканера, гироскопа, датчика одометрии
Крепление выработки	ЧМ	–	–	1,30	Ограничение обзора
	А	–	–	0,50	Анализ контура выработки с расчетом позиций для установки анкеров Совмещение операций по бурению скважины, смешивания, закачки раствора, подачи троса. Оптимизация частоты вращения бурильной системы, предотвращение изгиба и заклинивания бурильной штанги

Примечание: ЧМ – человеко-машинное управление, А – автономное управление.
Note: ЧМ – remote control, А - autonomous control

Результаты экспериментов

Применительно к открытым горным работам исследовано влияние уровней роботизации технологических процессов, количества автосамосвалов и операторов дистанционного управления на суточную эксплуатационную производительность ЭАК, коэффициенты использования экскаватора и операторов, а также средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки у экскаватора, и заявок, ожидающих обслуживания у операторов.

Объектом исследования выбран ЭАК, осуществляющий выемочно-погрузочные работы и транспортирование горной массы (вскрышная порода) на внутренний отвал. ЭАК состоит из экскаватора типа обратная гидравлическая лопата НІТАСНІ ЕХ-2500 вместимостью ковша $E_{экс} = 15 \text{ м}^3$ с закрепленными за ним четырьмя автосамосвалами БелАЗ-75131 вместимостью кузова с «шапкой» $V_{ac} = 71,17 \text{ м}^3$, грузоподъемностью $q_{max} = 130 \text{ т}$. Объем развала подготовленной вскрышной породы $V_p = 480000 \text{ м}^3$. Средний коэффициент разрыхления $k_p = 1,33$, коэффициент уплотнения вскрыши $k_y = 0,87$, плотность $\rho = 2,55 \text{ т/м}^3$. При выполнении маневровых работ перед погрузкой

организована тупиковая схема подъезда к экскаватору. Схема подъезда автосамосвалов под погрузку к экскаватору и под разгрузку на внутреннем отвале – одиночная. Коэффициент наполнения ковша экскаватора $k_{нк} = 0,74$. Средний угол поворота экскаватора $\beta = 90$ град. Диаметр средневзвешенного по объему куска породы $d_{cp} = 0,075 \text{ м}$. По окончании выемочно-погрузочных работ автосамосвалы осуществляют транспортирование вскрышной породы в пункт разгрузки, двигаясь со средней скоростью $V_{ср.гр} = 16,96 \text{ км/ч}$. Дальность транспортирования горной массы $S = 3310 \text{ м}$. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращаются обратно к экскаватору, двигаясь со средней скоростью $V_{ср.пор} = 24,33 \text{ км/ч}$. Плановые и внеплановые простои оборудования (за исключением ожидания погрузки/разгрузки/обслуживания операторами) ЭАК не учитываются. При дистанционном и автоматизированном управлении вместо БелАЗ-75131 в модельных экспериментах использовался БелАЗ-7513R (вместимость кузова с «шапкой» $71,17 \text{ м}^3$, грузоподъемность 130 т)¹. Роботизация операций, выполняемых экскаватором, не предусмотрена.

1 Официальный сайт компании ОАО «Белаз». Режим доступа: <http://belaz.by>

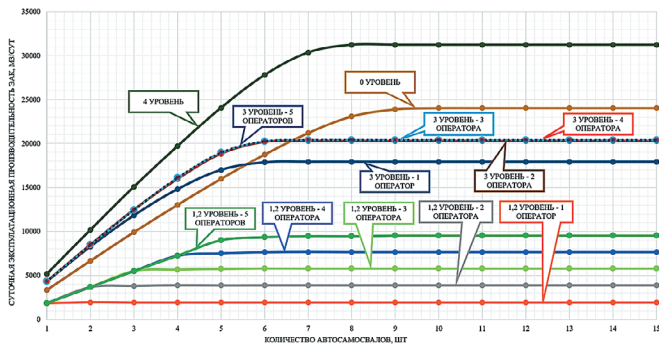


Рис. 5
Зависимость суточной эксплуатационной производительности ЭАК от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Fig. 5
Dependence of the daily operating capacity of open-pit excavator-and-truck complex on the process robotization level and the number of dump trucks and operators

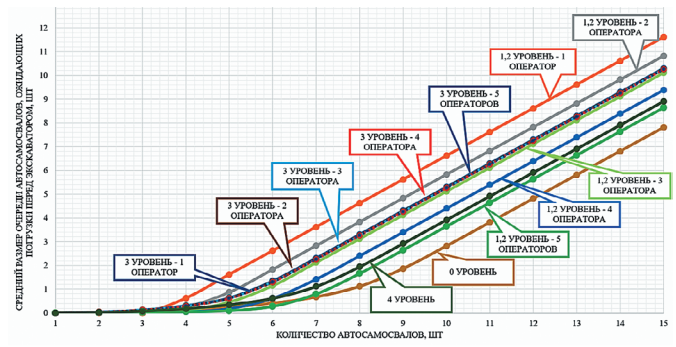


Рис. 7
Зависимость среднего размера очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки перед экскаватором, от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Fig. 7
Dependence of the average queue length of dump trucks, waiting for loading near the excavator on the process robotization level and the number of dump trucks and operators

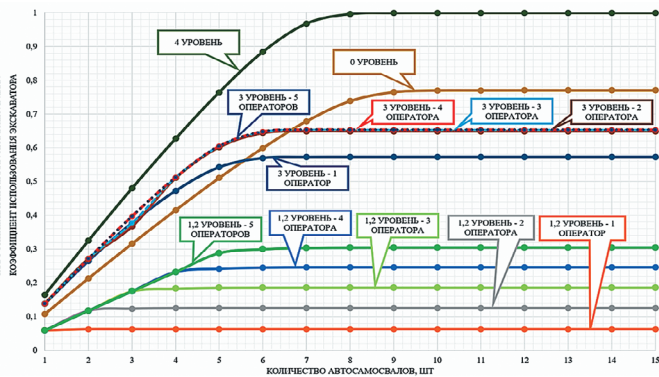


Рис. 6
Зависимость коэффициента использования экскаватора от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Fig. 6
Dependence of the excavator utilization rate on the process robotization level and the number of dump trucks and operators

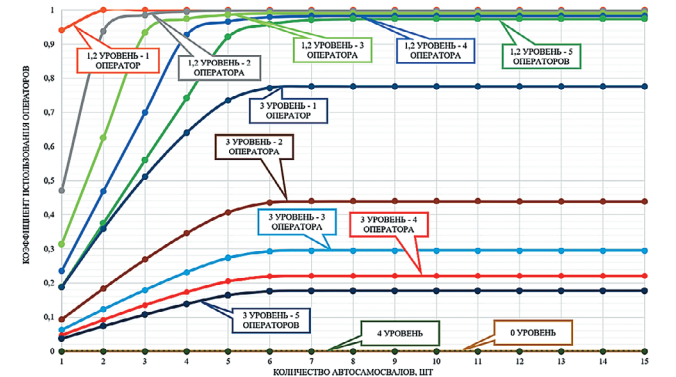


Рис. 8
Зависимость коэффициента использования операторов от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Fig. 8
Dependence of the operators' utilization rate on the process robotization level and the number of dump trucks and operators

Для адаптации универсальной модели рассчитаны переменные, представленные в табл. 1, в соответствии с заданными горно-геологическими и горнотехническими параметрами, которые введены в соответствующие ТЭБы GPSS-модели. Для учета человеко-машинного и автономного управления автосамосвалами использованы значения коэффициента $k_{чм}$, представленные в табл. 2, в соответствии с которыми производилась корректировка продолжительности процессов.

В экспериментах изменялось количество автосамосвалов от 1 до 15. Количество операторов при дистанционном и интерактивном управлении процессами варьировалось от 1 до 5. На выходе оценивались показатели эффективности: суточная эксплуатационная производительность, средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки у экскаватора, средний размер очереди из заявок, ожидающих операторов, коэффициенты использования экскаватора и операторов. На рис. 5–9 представлены результаты вычислительных экспериментов, полученные на модели функционирования ЭАК.

Выявленные закономерности позволяют оценивать по-

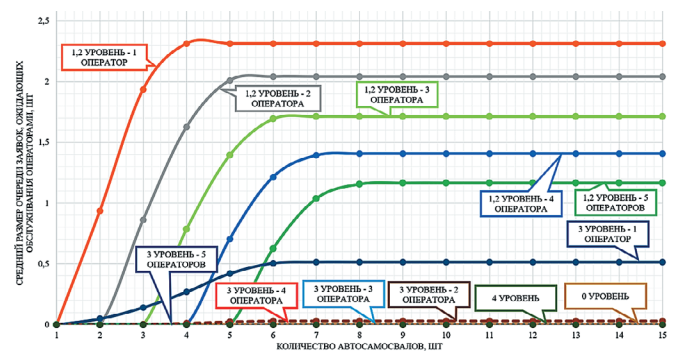


Рис. 9
Зависимость среднего размера очереди заявок, ожидающих обслуживания операторами, от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Fig. 9
Dependence of the average queue length of requests for remote control on the process robotization level and the number of dump trucks and operators

Таблица 3
Варианты роботизации
с максимальной суточной
производительностью ЭАК

Table 3
Robotization variants
with maximum daily operating capacity
of open-pit excavator-and-truck complex

Уровень роботизации	Максимальная суточная эксплуатационная производительность, м ³ /сут	Кол-во используемых автосамосвалов, шт.	Кол-во операторов дистанционного управления, чел.	Коэффициент использования экскаватора	Коэффициент использования оператора	Средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки перед экскаватором, шт.	Средний размер очереди заявок, ожидающих обслуживания операторами, шт.
0	24042,26	10	0	0,77	0	2,83	0
1,2	9484,17	7	5	0,35	0,97	0,79	1,04
3	20293,27	7	2	0,65	0,44	2,26	0,03
4	31225,56	8	0	99,90	0	1,94	0

казатели эффективности ЭАК в зависимости от соотношения долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых автосамосвалов и операторов, времени выполнения основных технологических операций. Для примера в табл. 3 сведены варианты, обеспечивающие максимальную производительность ЭАК.

Установлено, что переход от нулевого уровня роботизации к первому и второму приведет к снижению эксплуатационной производительности ЭАК на 60,55% по сравнению с нулевым уровнем, что связано с предельной загруженностью операторов вследствие их задействования на каждом процессе управления автосамосвалами. Падение производительности ЭАК при третьем уровне роботизации по сравнению с нулевым уровнем связано с возникновением очередей автосамосвалов перед погрузкой по причине сокращения продолжительности груженого/порожного хода автосамосвалов за счет роботизации данных операций и высокой продолжительности выполнения маневровых работ перед погрузкой, выполняемых дистанционно операторами.

Также установлено, что максимальная эксплуатационная суточная производительность ЭАК составляет 31225,56 м³/сут и достигается при четвертом уровне роботизации, за счет которого она увеличивается на 23% по сравнению с нулевым уровнем. При этом количество автосамосвалов, закрепляемых за экскаватором, можно уменьшить на 20%, с 10 до 8 шт. (см. рис. 5). Коэффициент использования экскаватора в таком варианте также будет максимальным – 0,99 (см. рис. 6), а средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки перед экскаватором, не превысит 1,94 шт. Дальнейшее увеличение количества автосамосвалов на данном уровне не приведет к изменениям производительности, а лишь будет увеличивать средний размер очереди (см. рис. 9). При четвертом уровне роботизации повышение производительности обеспечивается за счет исключения маневровых работ перед погрузкой/разгрузкой, снижения продолжительности выполнения груженого/порожного хода, максимальной загруженности экскаватора, а также исключения

необходимости использования операторов, т.к. они не участвуют в управлении автоматизированными процессами. Но в то же время такой высокий уровень роботизации потребует максимальных затрат на системы автономного управления, стоимость которых начинается от 100 тыс. долл. за комплект на один автосамосвал [20]. С одной стороны, повышение производительности и безопасности горных работ требует больших затрат на роботизацию технологических процессов, с другой, затраты на роботизацию растут с повышением ее уровня, что негативно влияет на эффективность горных работ. Требуется проведение дополнительных дальнейших исследований, направленных на разработку многокритериального подхода при выборе рациональных параметров роботизируемых технологий с одновременной оценкой производительности и безопасности горных работ, а также стоимости роботизации.

Применительно к подземным горным работам объектом исследования выбрана комбайновая технология проведения горных выработок по угольному пласту средней мощностью 3 м при пятиштрековой камерно-столбовой системе отработки. Ширина и длина обрабатываемых целиков – 25 м, длина одной заходки – 10 м, ширина – 6 м. Вмещающие породы – алевролит и песчаник с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протоdjаконова более 10. Общая длина проводимых выработок – 450 м. В экспериментах рассматривались модели горных машин с уже опробованным человеко-машинным и автономным перемещением: самоходные вагоны типа DBT, JOY и их аналоги, анкероустановщики Fletcher, Sandvik, CAT, комбайны непрерывного действия CAT, Komatsu и их аналоги. После адаптации универсальной имитационной модели путем определения и ввода значений переменных (см. табл. 1) в соответствующие ТЭБы GPSS-модели в вычислительных экспериментах рассматривались возможные варианты роботизации с человеко-машинным и автономным управлением перемещением горных машин (табл. 4) с целью определения наиболее эффективных вариантов по скорости проходки и выявления «узких мест».

Таблица 4
Варианты роботизации с человеко-машинным и автономным управлением перемещением горных машин

Table 4
Variants of robotization with remote and autonomous control of mining machines movement

Вариант	Комбайн	Самоходные вагоны	Анкероустановщик
0	Р	Р	Р
1	ЧМ	ЧМ	ЧМ
2	ЧМ	А	ЧМ
3	А	ЧМ	ЧМ
4	ЧМ	ЧМ	А
5	А	А	ЧМ
6	ЧМ	А	А
7	А	ЧМ	А
8	А	А	А

Примечание: Р – ручное управление, ЧМ – человеко-машинное управление, А – автономное управление.
Note: P – manual control, ЧМ – remote control, А – autonomous control

Исследовано влияние числа операторов дистанционного управления горными машинами на скорость проходки выработок при различных вариантах человеко-машинного и автономного управления перемещением горных машин (рис. 10). Учет человеко-машинного и автономного управления автосамосвалами производился путем корректировки продолжительности процессов в соответствии со значениями коэффициента $k_{чм}$ (табл. 2).

Относительно скорости проходки можно выделить две группы вариантов. К первой группе (варианты 1–5) относятся варианты роботизации, обеспечивающие скорость проходки ниже варианта без роботизации (вариант – 0, скорость проходки 61,6 м/сут). Ко второй (варианты 6–8) – варианты роботизации со скоростью проходки выше варианта без роботизации.

В вариантах роботизации первой группы скорость проходки уменьшается до 58–60 м/сут из-за понижения скорости перемещения анкероустановщика вследствие ограничения обзорности рабочей зоны при дистанционном управлении по сравнению с вариантом без роботизации, где управление осуществляется человеком, находящимся непосредственно в машине. В эту группу также входит вариант 4, в котором автономно управляемый анкероустановщик простаивает в ожидании подготовки выработок к креплению.

Вторая группа (варианты 6–8) при достаточном количестве операторов позволяет проходить до 66,46 м/сут, так как автоматически управляемый анкероустановщик практически не отстает от темпов работы комбайна непрерывного действия и самоходных вагонов.

Список литературы

1. Конюх В.Л. *Шахтная робототехника*. Кемерово: Кузбассвуиздат; 2000. 335 с.
2. Шевченко А.Н., Храмовских В.А. О перспективах применения автоматизированных способов добычи полезных ископаемых. *Науки о Земле и недпользование*. 2019;42(1):104–111. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111>
3. Konyukh V., Sinoviev V., Sturgul D. Selection of driving technologies for robotization. In: *Proceedings of the 7th International*

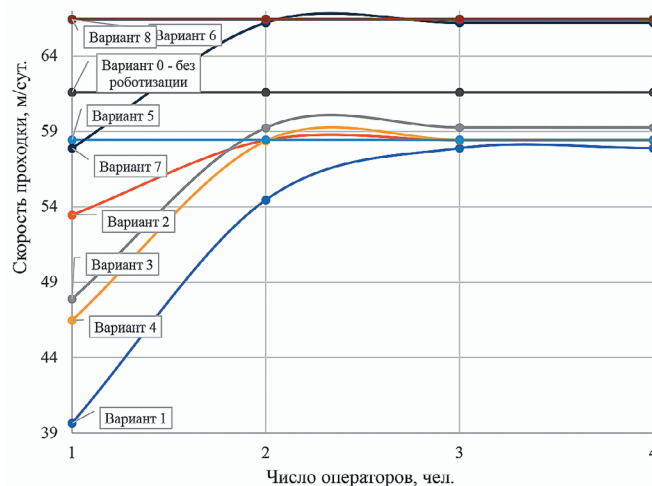


Рис. 10
Зависимость скорости проходки от числа операторов дистанционного управления горными машинами

Fig. 10
Dependence of the drifting rate on the number of remote control operators

При этом вариант с полной роботизацией при автономном управлении всеми горными машинами (вариант 8) увеличивает скорость проходки всего лишь на 0,05%, так как производительность системы продолжает зависеть от производительности анкероустановщика, который является «узким местом» в технологии.

Наиболее эффективными являются варианты роботизации с человеко-машинным управлением комбайном, автономным управлением самоходными вагонами и крепеустановщиком (вариант 6), а также вариант с человеко-машинным управлением самоходными вагонами, автономным управлением комбайном и анкероустановщиком (вариант 7).

Заключение

Применение имитационного моделирования для отображения роботизируемых технологий горных работ показывает, что имитация позволяет решать новые задачи, не поддающиеся аналитическим и численным методам решения, по оценке уровней роботизации и объемов ее применения, согласованию возможностей оператора с характеристиками роботов при человеко-машинном управлении, системному анализу сочетания роботизированных и традиционных процессов в технологии, учитывать динамику функционирования горных машин, а также вероятностные аспекты горного производства. Все это позволяет осуществлять научно обоснованный выбор рациональных параметров роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ.

Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 6–9 October 1998. Netherland, CRC Press; 1998, pp. 697–699.

4. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин. *Проблемы недропользования.* 2014;(3):164–175. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/71>
5. Клебанов Д.А., Макеев М.А., Сиземов Д.Н. Применение автономной и дистанционно управляемой техники на открытых горных работах. *Горная промышленность.* 2020;(6):14–18. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-14-18>
6. Чехлар М., Жиронкин С.А., Жиронкина О.В. Цифровые технологии индустрии 4.0 в майнинге 4.0 – перспективы развития геотехнологии в XXI веке. *Вестник Кузбасского государственного технического университета.* 2020;(3):80–90. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-80-90>
7. Коных В.Л. Робототехнические системы для подземных работ. *Автоматизация в промышленности.* 2008;(5):59–62.
8. Владимиров Д.Я. *Обоснование параметров роботизированных горнотехнических систем в осложненных условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых: дис. ... канд. техн. наук.* Магнитогорск; 2016. 195 с.
9. Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Черепанов В.А., Разбицкий В.В. Варианты реализации безлюдных технологий для промышленного транспорта. *Известия вузов. Горный журнал.* 2013;(1):104–111.
10. Шевкун Е.Б., Казаков Е.А. Роботизированные системы автомобильного транспорта на открытых горных работах. *Ученые заметки ТОГУ.* 2017;8(4):460–472. Режим доступа: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_331.pdf
11. Гучек Е.М., Клебанов Д.А. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 тонн. *Золото и технологии.* 2017;(4):78–81. Режим доступа: <https://zolteh.ru/tekhnika/preimushchestva-i-vozmozhnosti-robotizirovannogo-karernogo-samosvala-belaz-gruzopodemnostyu-130-t/>
12. Томашевский В.Н., Жданов Е.Г. *Имитационное моделирование в среде GPSS.* М.: Бестселлер; 2003. 412 с.
13. Алиев Т.И. *Основы моделирования дискретных систем.* СПб.: СПбГУ ИТМО; 2009. 363 с.
14. Клейнрок Л. *Теория массового обслуживания.* М.: Машиностроение; 1979. 432 с.
15. Девятков В.В. Эволюция имитационного моделирования – от «искусства и науки» к массовому применению. В кн.: *Имитационное моделирование. Теория и практика: 8-я Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 18–20 октября 2017 г.* СПб.: НП «НОИМ»; 2017. С. 27–36.
16. Девятков В.В. Опыт системного анализа транспортных систем с использованием метода имитационного моделирования. *Вестник НЦБЖД.* 2017;(1):18–28.
17. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых. *Горное оборудование и электромеханика.* 2019;(6):3–8. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8>
18. Зырянов И.В., Ильбульдин Д.Х., Кондратьев А.П. Параметры системы дистанционного управления горнотранспортным оборудованием в условиях Удачинского ГОКа. *Горная промышленность.* 2016;(5):49–51.
19. Larsson J. *Unmanned operations of load-haul-dump vehicles in mining environments.* Orebro University; 2011. 68 p.
20. Никитенко М.С., Кизилов С.А., Худоногов Д.Ю. *Анализ подходов к управлению автономными транспортными средствами. Современные наукоемкие технологии.* 2022;(12-2):278–283. Режим доступа: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39472>

References

1. Konyukh V.L. *Mine robotics.* Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2000. 335 p. (In Russ.)
2. Shevchenko A.N., Khramovskiykh V.A. On application prospects of automated mining methods. *Earth Sciences and Subsoil Use.* 2019;42(1):104–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111>
3. Konyukh V., Sinoviev V., Sturgul D. Selection of driving technologies for robotization. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 6–9 October 1998.* Netherland, CRC Press; 1998, pp. 697–699.
4. Zhuravlev A.G. Tendencies of open pit transport systems progress employing robotic machines. *Problems of Subsoil Use.* 2014;(3):164–175. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/71>
5. Klebanov D.A., Makeyev M.A., Sizemov D.N. Use of autonomous and remotely operated equipment in surface mining. *Russian Mining Industry.* 2020;(6):14–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-14-18>
6. Cehlar M., Zhironkin S.A., Zhironkina O.V. Digital technologies of industry 4.0 in mining 4.0 – prospects for the development of geotechnology in the XXI Century. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2020;(3):80–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-80-90>
7. Konyukh V.L. Robotic systems for underground work. *Automation in Industry.* 2008;(5):59–62. (In Russ.)
8. Vladimirov D.Ya. *Substantiation of parameters of robotic mining systems in complicated conditions of open pit mining* [Abstract of a Ph.D. (Engineering) thesis]. Magnitogorsk; 2016. 195 p. (In Russ.)
9. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Razbitsky V.V. Options of application of deserted mining technologies for mining transport. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 2013;(1):104–111. (In Russ.)
10. Shevkun E.B., Kazakov E.A. Robotic systems road transport in open-pit mining. *Uchenye zametki TOGU.* 2017;8(4):460–472. (In Russ.) Available at: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_331.pdf
11. Guchek E.M., Klebanov D.A. Advantages and opportunities of BELAZ robotized dump truck of 130 tons payload capacity. *Zoloto i Tekhnologii.* 2017;(4):78–81. (In Russ.) Available at: <https://zolteh.ru/tekhnika/preimushchestva-i-vozmozhnosti-robotizirovannogo-karernogo-samosvala-belaz-gruzopodemnostyu-130-t/>
12. Tomashevsky V.N., Zhdanov E.G. *Simulation modeling in the GPSS environment.* Moscow: Bestseller; 2003. 412 p. (In Russ.)
13. Aliev T.I. *Fundamentals of modeling discrete systems.* St. Petersburg, SPbGU ITMO; 2009. 363 p. (In Russ.)
14. Kleinrok L. *Theory of queuing.* Moscow: Mashinostroenie; 1979. 432 p. (In Russ.)

15. Deviatkov V.V. Evolution of simulation – from “arts and sciences” to mass application. In: Simulation modeling. Theory and practice: 8th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry, St. Petersburg, 18–20 October, 2017. St. Petersburg: National Simulation Society; 2017, pp. 27–36. (In Russ.)
16. Devyatkov V.V. Experience in system analysis of transport system using simulation modeling techniques. *Vestnik NTsBZhD*. 2017;(1):18–28. (In Russ.)
17. Stenin D.V. Prospects for the development of the production of autonomous heavy platforms for un-manned mining. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;(6):3–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8>
18. Zyryanov I.V., Ilbuldin D.Kh., Kondratyuk A.P. Parameters of a mine fleet remote control system in conditions of the Udachny mining & processing division. *Russian Mining Industry*. 2016;(5):49–51. (In Russ.)
19. Larsson J. *Unmanned operations of load-haul-dump vehicles in mining environments*. Orebro University; 2011. 68 p.
20. Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Khudonogov D.Yu. Analysis of approaches to autonomous vehicle control. *Modern High Technologies*. 2022;(12-2):278–283. (In Russ.) Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39472>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interests. All the authors have read and approved the final version of this paper.

Информация об авторах

Зиновьев Василий Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук; доцент, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: zv150671@gmail.com

Кузнецов Игорь Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: is150794@mail.ru

Николаев Петр Игоревич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: mrnikolaev@mail.ru

Стародубов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук; доцент, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Information about the authors

Vasily V. Zinoviev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: zv150671@gmail.com

Igor S. Kuznetsov – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: is150794@mail.ru

Petr I. Nikolaev – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: mrnikolaev@mail.ru

Aleksey N. Starodubov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Article info

Received: 02.08.2023

Revised: 31.08.2023

Accepted: 02.09.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.08.2023

Поступила после рецензирования: 31.08.2023

Принята к публикации: 02.09.2023