

УДК 622, 004.942

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С РОБОТИЗИРОВАННЫМИ АВТОСАМОСВАЛАМИ

**Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Николаев П.И. (Кемерово)**

**Введение.** Открытый способ добычи угля в России составляет 74,4% в общей добыче этого полезного ископаемого. Более того, за последние 20 лет наблюдается положительная динамика добычи угля открытым способом [1]. Наибольшие затраты приходится на вскрышные работы, объем которых превышает объем добычи угля примерно в 7 раз. Так в 2022 году в России открытым способом добыто 340,6 млн т. угля, при этом объем вскрышных работ составил 2309,4 млн куб. м [2]. Основными процессами при ведении вскрышных работ являются погрузка и транспортирование вскрышной породы на внутренний или внешний отвалы, с использованием мощных экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК).

Одной из основных проблем при добыче угля открытым способом являются сложные горно-геологические условия, которые обусловлены запыленностью и загазованностью карьерной атмосферы, экстремальной температурой и другими климатическими особенностями, наличием радиоактивных элементов, значительным диапазоном варьирования значений физико-механических свойств пород массива и полезных ископаемых и другими. Эти обстоятельства существенно осложняют присутствие и участие человека в процессах и снижают эффективность горнодобывающих предприятий. Поэтому современное производственно-технологическое развитие угольной отрасли направлено, в том числе, на освоение технологий добычи угля без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ за счет разработки и внедрения инновационных технологий на основе применения средств автоматизации и роботизации на различных уровнях от дистанционного управления до полной роботизации, при которой горная машина на основе анализа информации самостоятельно принимает решения по выполнению той или иной операции [3-5].

В зависимости от объема человеческого участия в процессе управления горными машинами можно выделить следующие уровни роботизации:

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

*Уровень 1. Дистанционное управление.* Все интеллектуальные технологические операции осуществляются горнорабочими на безопасном расстоянии и визуальный обзор зон ведения работ производится посредством видеокамер.

*Уровень 2. Реализация «технического зрения».* Сканирование трассы, забоя, горной выработки производится средствами «технического зрения» – лазерными сканерами или эхолотами. Горнорабочий дистанционно управляет горными машинами по 3D-модели зоны ведения работ.

*Уровень 3. Интерактивное управление.* Управление горными машинами при выполнении наиболее сложных операций и работ, требующих творческого подхода, осуществляет оператор в режиме дистанционного управления, а рутинные операции осуществляются в автоматическом режиме.

*Уровень 4. Полная роботизация.* Позволяет использовать технику в полностью автономном режиме, выполнять все интеллектуальные технологические операции под управлением программно-аппаратного комплекса, лишенного потребности в

непосредственном участии оператора для выполнения операций технологического цикла. Горнорабочий выполняет роль контролёра нескольких горных машин.

Анализ предложений по роботизации открытых горных работ показал, что все они сводятся к автоматизации процессов управления автосамосвалами и экскаваторами в технологиях, ориентированных на человека. При этом многие операции – зачерпывание породы ковшем экскаватора, разгрузка ковша экскаватора в кузов автосамосвала, выполнение маневровых работ автосамосвалами перед погрузкой/разгрузкой – представляют собой 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 открытых горных работ в ближайшее время будет использоваться человеко-машинное управление, требующее наличия оператора и реализующее дистанционное или интерактивное (полуавтоматическое) управление. Возникают научные задачи по выявлению зависимостей изменения показателей эффективности роботизируемых технологий горных работ от соотношения долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых горных машин и операторов, времени выполнения основных технологических процессов. Решение таких задач осложняется многообразием условий залегания угольных пластов, разнообразием предложений по роботизации операций, многовариантностью способов организации работ, стохастичностью, динамичностью технологических процессов и требует комплексного учета всех этих факторов при оценке и выборе параметров технологий с целью повышения безопасности и эффективности открытых горных работ.

Поскольку последствия ошибок при проектных решениях очень дороги, необходимо предсказательное моделирование на основе математических моделей и их программной реализации для проведения вычислительных экспериментов с целью исследования и выбора рациональных параметров роботизируемых технологий открытых горных работ.

**Материалы и методы решения задачи.** Технологические процессы при функционировании ЭАК являются стохастическими и дискретными с конечным числом событий. К таким процессам относятся: прибытие автосамосвала к месту погрузки и разгрузки, начало и окончание маневровых работ или загрузки кузова автосамосвала горой массой и т.п. Для отображения структурно-функциональной организации систем с такими процессами широко применяют математические модели, основанные на теории массового обслуживания. Вообще, 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) [6,7]. Исходя из этого для отображения функционирования ЭАК с роботизируемыми автосамосвалами выбран математический аппарат систем массового обслуживания (СМО). Для анализа СМО используют вероятностные аналитические и численные методы, которые основываются на марковских и полумарковских процессах, предусматривающих пуассоновский входной поток заявок и экспоненциальный закон распределения времени их обслуживания. Также отмечается, что сети массового обслуживания, содержащие более трех узлов, практически не поддаются аналитическому решению [6]. В этом случае применяют имитационный подход, который и выбран для программной реализации разработанной СМО.

**Результаты.** Разработана дискретно-стохастическая динамическая модель работы ЭАК с роботизированными автосамосвалами в виде разомкнутой системы массового обслуживания (СеМО). Созданная СеМО состоит из четырех узлов:  $U1 \cup U2 \cup U3 \cup U4$  (причем  $U1 \cap U2$  и  $U3 \cap U2$ ), отображающих посредством СМО вида  $G1/G2/1/Nz$  работы по зачерпыванию и погрузке горной массы (узел  $U1$ ), СМО  $G1/G2/m_{mp}/Nz$  – работы по доставке вскрышной породы к пункту разгрузки ( $U2$ ), СМО –  $G1/G2/m_{разгр}/n$  – работы по разгрузке (узел  $U3$ ), СМО –  $G1/G2/m_{оп}/N_{дист}$  – дистанционное управление автосамосвалами (узел  $U4$ ) (рис. 1).

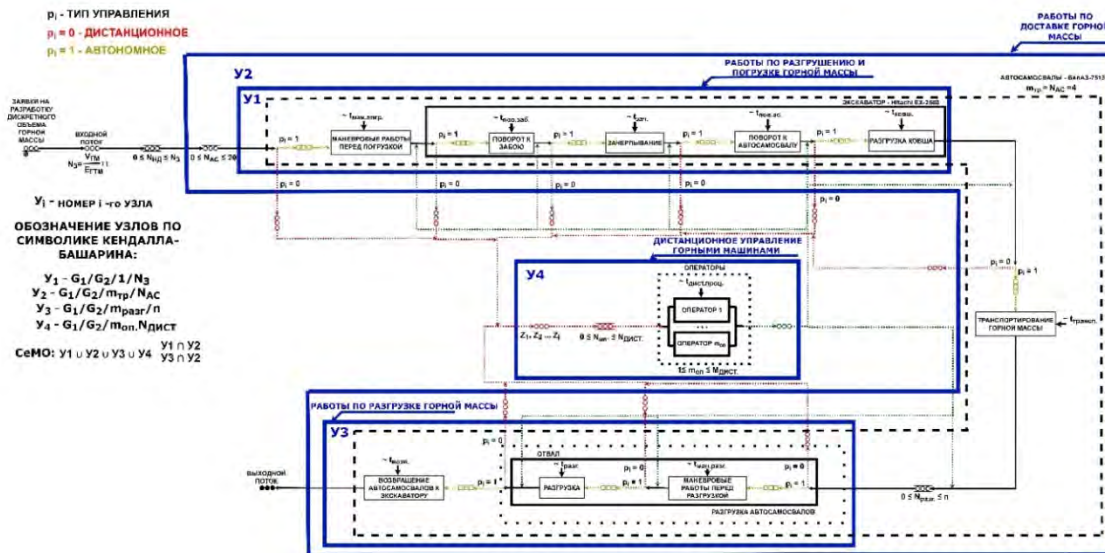


Рис. 1. Модель работы ЭАК в виде СеМО

Указанная СеМО позволяет отображать взаимодействие роботизированных автосамосвалов с человеко-машинным управлением с учетом уровней роботизации, стохастичности и динамичности процессов.

Однородные заявки во входном потоке представляют собой дискретные объемы вскрышной породы, которые необходимо отработать в соответствии с планом. Количество заявок во входном потоке определяется как:

$$N_z = \frac{V_{zm}}{E_{ac}} + 1, \tag{1}$$

где  $V_{zm}$  – объем вскрышной породы в развале подлежащий разработке,  $m^3$ ;  $E_{зм}$  – вместимость кузова автосамосвала,  $m^3$ .

Каждая  $i$ -ая заявка проходит через одноканальные (экскаватор) и многоканальные (автосамосвалы, пункты разгрузки, места для установки под погрузку, операторы дистанционного управления) обслуживающие устройства. Задержка заявок в этих устройствах отображает работы по погрузке вскрышной породы в автосамосвал, ее транспортирование и разгрузку. Время обслуживания  $i$ -ой заявки  $t_i$  на каждой  $j$ -ой операции, является случайным и задается законом распределения с плотностью вероятностей  $f(x)$ , отображая либо автоматическое, либо дистанционное управление посредством оператора. В случае занятости прибора обслуживания, отображающего экскаватор, выполнением определенной операции и/или отсутствия свободного автосамосвала 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.

Продолжительность нахождения  $i$ -ой заявки в модели  $t_{рейс.ас}$  представляет собой полный рейс автосамосвала и определяется как:

$$t_{рейс.ас} = t_{погр} + t_{ман.погр} + t_{ман.разг} + t_{разг} + t_{груж} + t_{пор} + t_{ож.погр} + t_{ож.разг} + t_{ож.опер}, \quad (2)$$

где  $t_{погр}$  – продолжительность погрузки горной массы экскаватором в автосамосвал, сек;  $t_{ман.погр}$  – продолжительность выполнения маневровых работ автосамосвалами перед погрузкой у экскаватора, сек;  $t_{ман.разг}$  – продолжительность выполнения маневровых работ автосамосвалами перед разгрузкой в пункте разгрузки, сек;  $t_{разг}$  – продолжительность разгрузки автосамосвалов, сек;  $t_{груж}$  – продолжительность движения автосамосвалов в груженом состоянии, сек;  $t_{пор}$  – продолжительность движения автосамосвалов в порожнем состоянии, сек;  $t_{ож.погр}$  – продолжительность ожидания погрузки экскаватора автосамосвалом, сек;  $t_{ож.разг}$  – продолжительность ожидания разгрузки автосамосвалом, сек;  $t_{ож.опер}$  – продолжительность ожидания оператора, сек.

В зависимости от исполнителя, продолжительность  $i$ -го процесса:

$$t_i = t_i^{опер} \quad \text{– при дистанционном управлении} \quad (3)$$

$$t_i = t_i^{роб} \quad \text{– при автономном управлении} \quad (4)$$

где  $t_i$  – продолжительность  $i$ -ого процесса, сек;  $t_i^{опер}$  – продолжительность  $i$ -ого процесса при дистанционном управлении автосамосвалом, сек;  $t_i^{роб}$  – продолжительность  $i$ -ого процесса при автономной работе автосамосвала, сек.

Разработанная СеМО позволяет проводить оценку следующих показателей эффективности:

- абсолютная пропускная способность (эксплуатационная производительность ЭАК);
- общее время прохождения всех заявок через систему (продолжительность отработки развала подготовленной вскрышной породы);
- коэффициенты использования обслуживающих устройств (коэффициент использования экскаватора, автосамосвалов, операторов дистанционного управления);
- средние времена ожидания заявок в очередях (средняя продолжительность ожидания автосамосвалами: загрузки горной массы экскаватором, освобождения операторов для дистанционного управления);
- средняя длина очереди (среднее количество автосамосвалов, ожидающих: загрузки горной массы экскаватором, освобождения операторов для дистанционного управления);
- среднее время пребывания заявок в системе (средняя продолжительность рейса автосамосвалов).

Как отмечено выше, разработанная СеМО состоит из четырех узлов, более того, при анализе данных, полученных с диспетчерских отчетов автоколонн разрезов, идентифицировано, что продолжительность процессов при функционировании ЭАК распределена по  $\gamma$ -закону с ограниченной правосторонней областью. Несмотря на современное развитие теории массового обслуживания, аналитических и численных

методов для расчета показателей эффективности такой СеМО в настоящее время не имеется [6,7]. В связи с этим для реализации созданной СеМО применен имитационный подход с использованием среды моделирования GPSS Studio (ООО «Элина-Компьютер», Россия), основанной на языке GPSS World, который успешно используется в горном деле [8,9]. 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 [10].

Программная реализация модели СеМО выполнена в виде восьми типовых элементарных блоков (ТЭБ): «Задание объема отработки», «Работа в забое», «Транспортирование горной массы», «Работа в пунктах разгрузки», «Порожний ход», «Исходные данные», «Остановка процесса моделирования», «Начальные расчеты». Каждый ТЭБ содержит набор GPSS-блоков и команд, позволяющих моделировать основные технологические процессы: маневровые работы перед погрузкой, зачерпывание горной массы ковшом экскаватора, поворот экскаватора к автосамосвалу, разгрузка ковша экскаватора в кузов автосамосвала, поворот экскаватора к развалу, транспортирование вскрышной породы, маневровые работы перед разгрузкой, разгрузка, возвращение автосамосвалов к экскаватору (порожний ход) (рис. 2).

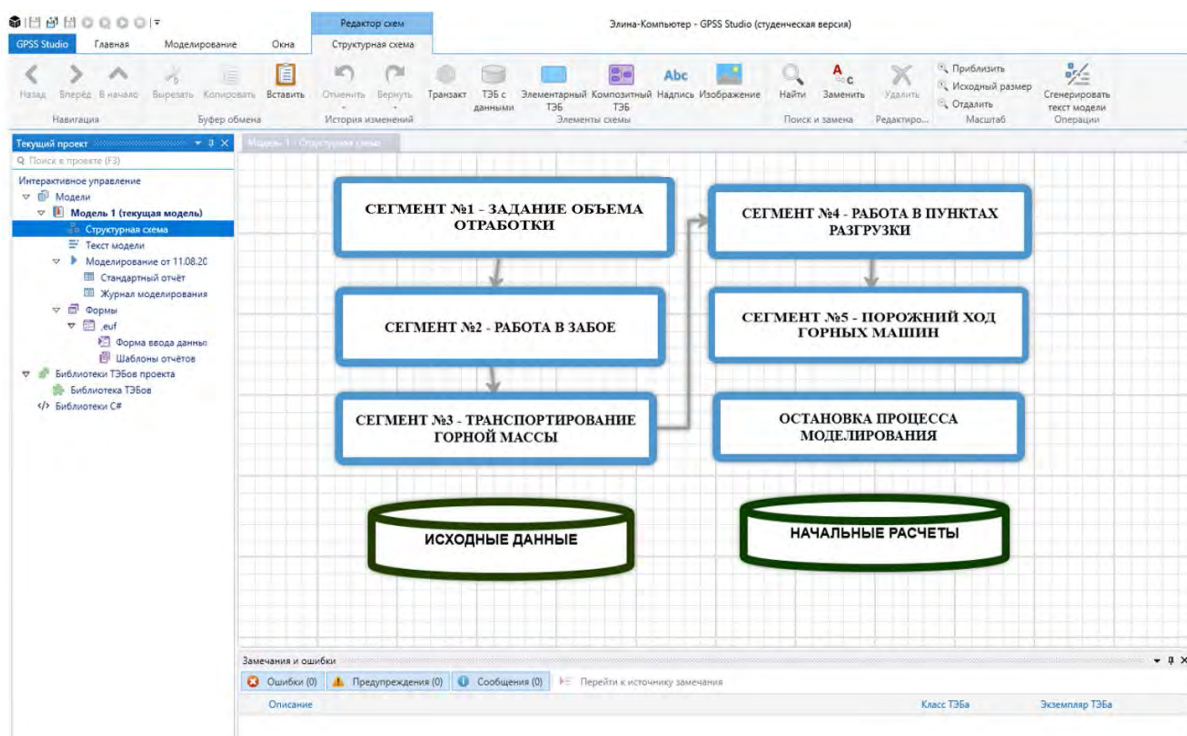


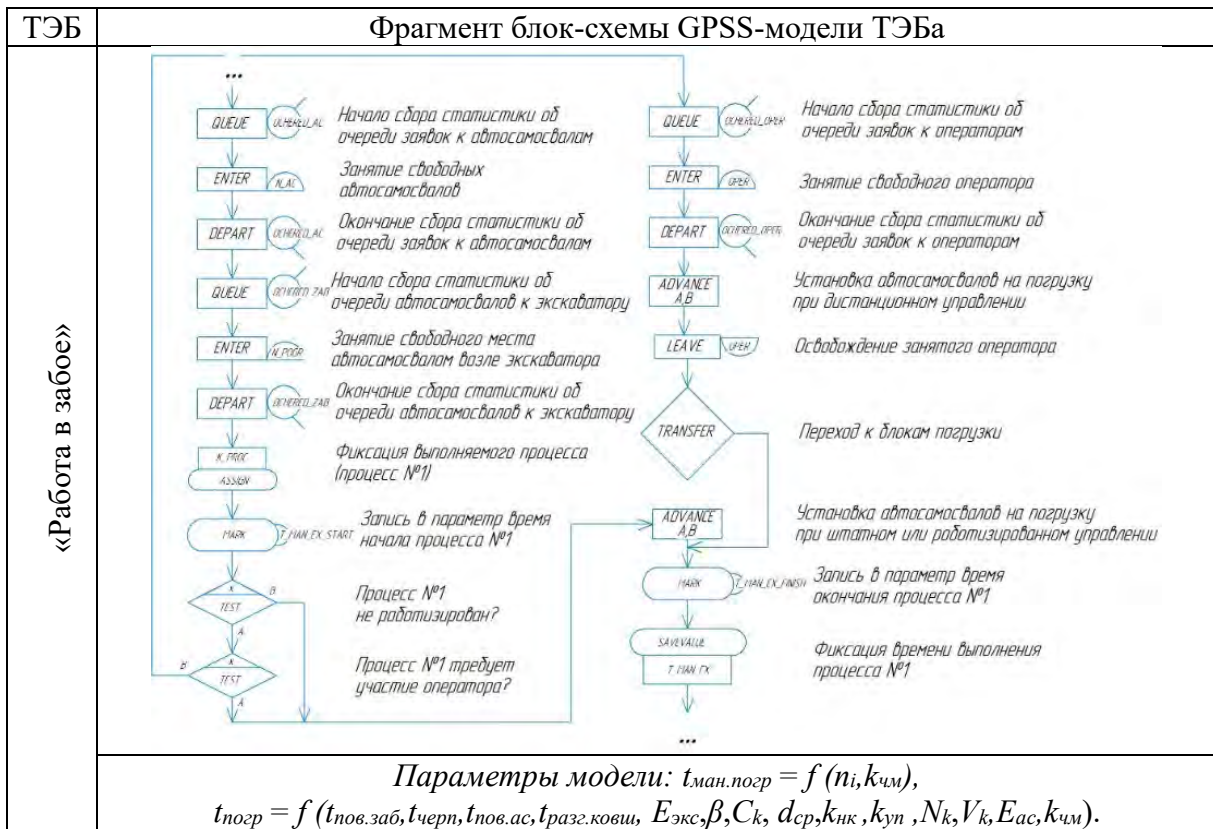
Рис. 2. Модель работы ЭАК, реализованная в GPSS-Studio, в виде ТЭБов

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» определяются количество заявок, которые надо ввести в модель, продолжительность маневровых работ, выполняемых автосамосвалами перед погрузкой, время поворота экскаватора к забою и т.д.

В таблице 2 в качестве примера представлен ТЭБ «Работа в забое» с содержащимся в нем GPSS-моделями, имитирующими технологические процессы при функционировании ЭАК.



Таблица 2. Типовой элементарный блок (ТЭБ) GPSS-модели ЭАК



В таблице 2:  $n_i$  – схема подъезда к экскаватору (тупиковая, сквозная, петлевая);  $k_{\text{чм}}$  – коэффициент человеко-машинного управления;  $t_{\text{нов.зab}}$  – продолжительность поворота экскаватора к забою, сек;  $t_{\text{черп}}$  – продолжительность зачерпывания вскрышной породы ковшем экскаватора, сек;  $t_{\text{нов.ас}}$  – продолжительность поворота экскаватора к автосамосвалу, сек;  $t_{\text{разг.ковш}}$  – продолжительность разгрузки ковша экскаватора в кузов автосамосвала, сек;  $E_{\text{экс}}$  – вместимость ковша экскаватора, м<sup>3</sup>;  $\beta$  – средний угол поворота экскаватора, град.;  $C_k$  – соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куса горной массы;  $d_{\text{ср}}$  – диаметр средневзвешенного по объему куса вскрышной породы, м;  $k_{\text{нк}}$  – коэффициент наполнения ковша;  $k_{\text{уп}}$  – коэффициент уплотнения вскрышной породы в зависимости от категории;  $N_k$  – число разгружаемых ковшей экскаватором в автосамосвал, шт;  $V_k$  – объем вскрышной породы, зачерпываемый ковшем экскаватора за один цикл, м<sup>3</sup>;  $E_{\text{ас}}$  – вместимость кузова автосамосвала, м<sup>3</sup>.

В ТЭБе «Работа в забое» блоки QUEUE и DEPART фиксируют начало и окончание сбора статистики об ожидающих обслуживания заявках (простаивающих автосамосвалах). Блоки ENTER и LEAVE отображают занятие и освобождение автосамосвалов, мест для установки автосамосвалов на погрузку и операторов дистанционного управления. Задержка транзактов на время выполнения маневровых работ в зависимости от принятой схемы и коэффициента человеко-машинного управления  $k_{\text{чм}}$  реализуется посредством блоков ADVANCE. Блоки ASSIGN, MARK, SAVEVALUE использованы для определения последовательности и продолжительности технологических операций. Блоки TEST и TRANSFER перенаправляют транзакты в соответствии с технологией ведения открытых горных работ. Количество автосамосвалов, а также мест для установки на погрузку задается с помощью управляющих операторов STORAGE.

Для учета уровня роботизации автосамосвалов в составе ЭАК предложено понятие коэффициента человеко-машинного управления  $k_{чм}$ , который используется в модели для изменения продолжительность соответствующего процесса. Выявление значений  $k_{чм}$  требует проведения отдельного исследования вследствие влияния на них горно-геологических и горнотехнических условий, параметров горных машин, которые на разных разрезах могут отличаться. На данном этапе значения  $k_{чм}$  определены на основе информации, полученной в результате анализа литературных источников [3-5, 11] (таблица 3).

Таблица 3. Значения  $k_{чм}$  для различных процессов

ТЭБ	Режим*	$k_{чм}$	Причина
Работа в забое (маневровые работы)	ЧМ	1,78	Ограничение обзора
	А	0	Челночное безразворотное движение бескабинных автосамосвалов
Работа в забое (погрузка)	ЧМ	1	Роботизация экскаватора не предусмотрена
	А	1	
Транспортирование ГМ	ЧМ	1,86	Ограничение обзора
	А	0,50- 0,80	Использование систем позиционирования, оптимизация переключения передач
Работа в пункте разгрузки	ЧМ	1,28	Ограничение обзора
	А	0	Челночное безразворотное движение бескабинных автосамосвалов
Порожний ход	ЧМ	2,20	Ограничение обзора
	А	0,50- 0,80	Использование систем позиционирования, оптимизация переключения передач

\*ЧМ – человеко-машинное управление, \*А – автономное управление.

Проверка адекватности созданной имитационной модели осуществлялась путем сравнения данных диспетчерских отчетов автоколонн по прошлому периоду работы реального разреза с результатами моделирования для одних и тех же условий эксплуатации ЭАК. В результате расхождение не превысило принятого критического значения 10,0% [9].

**Обсуждение результатов и принятые допущения.** С использованием разработанной имитационной модели проведены вычислительные эксперименты. Объектом исследования выбран ЭАК, осуществляющий выемочно-погрузочные работы и транспортирование вскрышной породы 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»  $V_{ас} = 71,17 \text{ м}^3$ , грузоподъемностью  $q_{max} = 130$  тонн. Объем развала 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  $\beta = 90 \text{ град.}$ , диаметр

средневзвешенного по объему куска породы  $d_{cp} = 0,075$  м. По окончании выемочно-погрузочных работ автосамосвалы осуществляют транспортирование вскрышной породы в пункт разгрузки, двигаясь со средней скоростью  $V_{cp.zp} = 16,96$  км/ч (4,71 м/с). Дальность транспортирования  $S = 3310$  м. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращаются обратно к экскаватору, двигаясь со средней скоростью  $V_{cp.nop} = 24,33$  км/ч (6,76 м/с).

При проведении экспериментов не учитывались плановые и внеплановые простои горных машин (за исключением ожидания погрузки/разгрузки/обслуживания операторами). Также вместо автосамосвала БелАЗ-75131 в модельных экспериментах использовался роботизированный БелАЗ-7513R, работающий в режиме человеко-машинного управления (емкость кузова с «шапкой»  $71,17$  м<sup>3</sup>, грузоподъемность 130 тонн) [12]. Роботизация процессов, выполняемых экскаватором (поворот к развалу/автосамосвалу, зачерпывание вскрышной породы ковшем, разгрузка ковша в кузов автосамосвала), не предусматривалась. Для учета способа управления автосамосвалами (штатное, дистанционное, интерактивное и автономное) использованы значения коэффициента  $k_{чм}$  (таблица 3), в соответствии с которыми производилась корректировка продолжительности технологических процессов. В экспериментах изменялось количество автосамосвалов  $N_{ac}$  от 1 до 15. Количество операторов  $N_{опер}$  при человеко-машинном управлении варьировалось от 1 до 5. На выходе оценивалась продолжительность отработки развала подготовленной вскрышной породы  $T_{отр.развл.}$ . На рис. 3 представлены результаты вычислительных экспериментов, полученные на модели функционирования ЭАК.

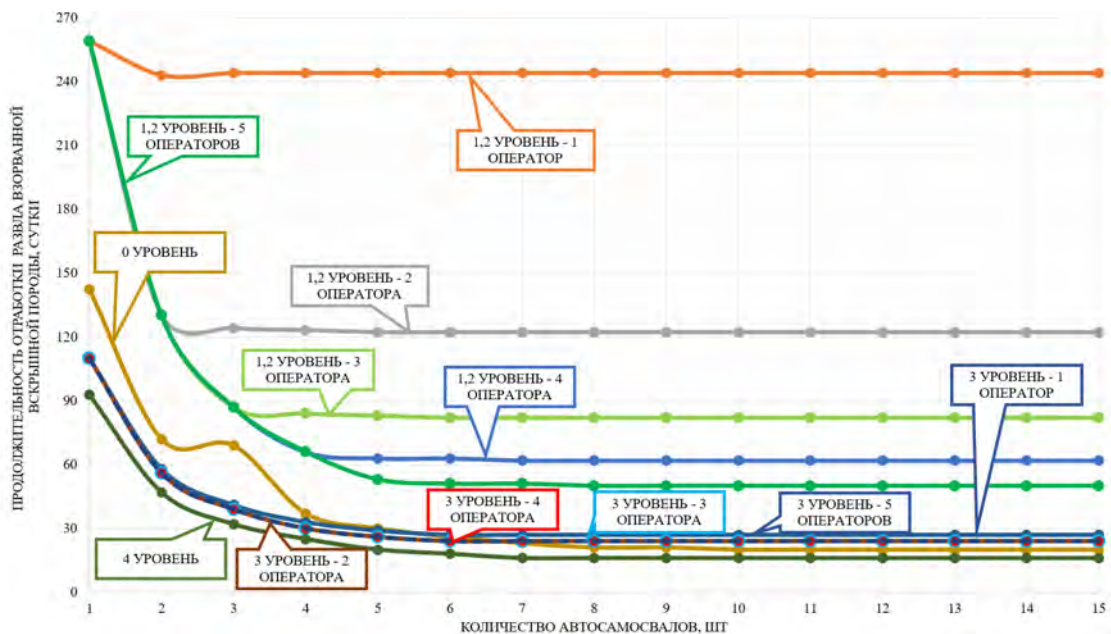


Рис. 3. Зависимость продолжительности отработки развала вскрышной породы, от уровня роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

Выявленные закономерности позволяют оценивать один из показателей эффективности ЭАК (продолжительность отработки развала подготовленной вскрышной породы) в зависимости от соотношения долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых автосамосвалов и операторов, времени выполнения основных технологических процессов.

В таблицу 4 сведены варианты, обеспечивающие минимальную продолжительность отработки развала вскрышной породы.



Таблица 4. Варианты роботизации с минимальной продолжительностью отработки развала вскрышной породы

Уровень роботизации	$T_{отр.развл}$ , сут.	$N_{ас}$ , шт.	$N_{опер}$ , шт.
0	20	10	0
1,2	50	7	5
3	24	7	2
4	16	8	0

Установлено, что переход от нулевого уровня роботизации к первому и второму, приведет к повышению продолжительности отработки развала вскрышной породы на 60% по сравнению с нулевым уровнем, что связано с предельной загруженностью операторов, вследствие их задействования на каждом процессе управления автосамосвалами. Повышение продолжительности отработки развала 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 минимальная продолжительность отработки развала составляет 16 часов и достигается при четвертом уровне роботизации, за счет которого она сокращается на 20% по сравнению с нулевым уровнем. При этом количество автосамосвалов, закрепляемых за экскаватором, можно уменьшить на 20% (с 10 до 8 шт). При четвертом уровне роботизации сокращение продолжительности отработки развала подготовленной вскрышной породы обеспечивается за счет исключения маневровых работ перед погрузкой/разгрузкой, снижением продолжительности выполнения груженого/порожного хода, максимальной загруженностью экскаватора, а также исключением необходимости использования операторов, т.к. они не участвуют в управлении процессами, вследствие их автоматизации.

В то же время максимальный четвертый уровень роботизации потребует максимальных затрат на покупку систем автономного управления, стоимость которых начинается от 100 тыс. долларов за комплект на один автосамосвал [13]. С одной стороны, сокращение продолжительности разработки развала и повышение безопасности горных работ за счет вывода людей из неблагоприятных и опасных зон требует больших затрат на роботизацию технологических процессов, с другой, затраты на роботизацию растут с повышением ее уровня, что негативно влияет на эффективность горных работ. Это обстоятельство требует проведение дополнительных исследований, направленных на разработку многокритериального подхода при выборе рациональных параметров роботизируемых технологий, с одновременной оценкой технологических показателей эффективности, безопасности горных работ, а также стоимости роботизации.

**Заключение.** Таким образом, применение имитационного моделирования для отображения функционирования ЭАК с роботизируемыми автосамосвалами позволяет реализовывать новые задачи, не поддающиеся аналитическим и численным методам решения, по оценке уровней роботизации и объемов ее применения, согласованию возможностей операторов 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. Такой подход является этапом

создания новых методов и программных средств научно-обоснованного выбора рациональных параметров роботизируемых технологий открытых горных работ.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания 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 технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

### Литература

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации: [сайт]. – Режим доступа. URL: <https://minenergo.gov.ru/> (дата обращения: 09.03.2022).
2. **Петренко И.Е.** Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. – 2023. – № 3. – С. 21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33
3. Стенин, Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №6. – С. 3-8.
4. **Журавлев А.Г.** Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин // Проблемы недропользования. – 2014. – №3 (3). – С. 164-175;
5. **Владимиров Д.Я.** Обоснование параметров роботизированных горнотехнических систем в осложненных условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых: дис. канд. тех. наук: 25.00.22, 25.00.21 – Магнитогорск, 2016. – С. 195.
6. **Томашевский, В.Н.** Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. – М.: Бестселлер. – 2003. – 412 с.
7. **Алиев Т.И.** Основы моделирования дискретных систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
8. **Клишин В.И.** Анимационная модель технологии скоростной проходки горных выработок / В.И. Клишин, А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, А.Д. Тургенев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – №8. – С.110-114
9. **Конюх В.Л.** Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев; отв. ред. О.В. Тайлаков; Сиб. отд-ние РАН, КеМНЦ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
10. **Девятков В.В.** Эволюция имитационного моделирования – от "искусства и науки" к массовому применению / В.В. Девятков // Имитационное моделирование. Теория и практика. XIII Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – 2017. – С. 27-36.
11. **Зырянов И.В.** Параметры системы дистанционного управления горнотранспортным оборудованием в условиях Удачинского ГОКа / И.В. Зырянов, Д.Х. Ильбульдин, А.П. Кондратюк // Горная промышленность. – 2016. – №5 (129). – С. 49-51.
12. Официальный сайт компании ОАО «Белаз»: [сайт]. – Режим доступа. – URL: <http://belaz.by> (дата обращения: 24.05.2023)
13. **Никитенко М.С.** Анализ подходов к управлению автономными транспортными средствами / М.С. Никитенко, С.А. Кизилов, Д.Ю. Худоногов // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 12. – С. 278-283.