



УДК 622.015:004.94

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИИ И АНИМАЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ «УЗКИХ МЕСТ» ПРИ РАБОТЕ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Зиновьев В.В.^{1,2}, Кузнецов И.С.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

21 апреля 2026 г.

Рецензирование:

14 июня 2026 г.

Принята к печати:

03 июля 2026 г.

Ключевые слова:

открытые горные работы,
экскаваторно-автомобильный
комплекс, «узкие места»,
имитационное моделирование,
компьютерная анимация,
вычислительные
эксперименты, Proof
Animation, GPSS, теория
массового обслуживания,
системы массового
обслуживания

Аннотация.

При ведении открытых горных работ выемка, погрузка и транспортирование горной массы, как правило, осуществляются экскаваторно-автомобильными комплексами, на эффективность работы которых в значительной мере оказывают влияние простои автосамосвалов в ожидании погрузки либо простои экскаватора в ожидании автосамосвалов, образуя так называемые «узкие места», сдерживающие производительность. В рамках данного исследования ставится задача повышения эффективности работы участка разреза с пятью экскаваторно-автомобильными комплексами за счет выявления и устранения «узких мест» путем рационального распределения автосамосвалов между экскаваторами. Так как задача осложнена динамическо-стохастическими аспектами погрузочно-транспортных процессов и трудноформализуема, для ее решения применены методы компьютерной имитации и анимации. Разработана дискретно-событийная модель с использованием теории массового обслуживания для отображения взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве, осуществлена ее программная реализация на языке имитационного моделирования GPSS World Core. Создана анимационная модель с использованием программного продукта Proof Animation для отображения процесса имитационного моделирования на мнемосхеме работы оборудования. Определено количество запусков имитационной модели для обеспечения точности и достоверности результатов моделирования. Проведены вычислительные эксперименты по оценке эффективности работы экскаваторно-автомобильных комплексов по показателям эксплуатационной производительности, среднему количеству автосамосвалов, ожидающих погрузки, и коэффициенту использования экскаваторов. Выявлены «узкие места» и даны предложения по их устранению, которые проверены на разработанных моделях.

Для цитирования: Зиновьев В.В., Кузнецов И.С. Применение методов компьютерной имитации и анимации для выявления и устранения «узких мест» при работе экскаваторно-автомобильных комплексов // Техника и технология горного дела. – 2026. – №3(34). – С. 26-48. – DOI:10.26730/2618-7434-2026-3-26-48, EDN: FXKXFB

Введение

Угольная промышленность продолжает играть важную роль в экономике Российской Федерации, обеспечивая около 17% выработки электроэнергии [1]. По данным ЦДУ ТЭК, за



последние семь лет объемы добычи угля в России почти не сокращаются и составляют около 440 млн т. При этом преобладает открытый способ добычи угля вследствие более высокой производительности труда по сравнению с подземным способом, более низкой себестоимостью продукции и меньшими сроками строительства горнодобывающего предприятия. Объем угля, добытого открытым способом, составляет около 75% от общего объема добычи. Открытая разработка угольного месторождения включает вскрышные и добычные работы, где преимущественно используют экскаваторно-автомобильные комплексы (ЭАК), доля использования которых за последние десятилетия приближается к 90% [2, 3].

При функционировании ЭАК могут возникать так называемые «узкие места». Этот термин происходит от английского *bottleneck* («бутылочное горлышко») и в общем смысле означает такие процессы, участки или элементы системы, которые сдерживают и ограничивают работу всей системы. Применительно к функционированию ЭАК «узкие места» появляются в результате нерационального распределения автосамосвалов, вследствие чего образуется их скопление в ожидании погрузки, либо наблюдается простой экскаватора вследствие их отсутствия. Все это приводит к потере производительности ЭАК, участка разреза и, как следствие, всего горнодобывающего предприятия в целом. Поэтому задача по выявлению «узких мест» и их устранению путем рационального распределения автосамосвалов между экскаваторами является актуальной. Решение этой задачи осложняется высокой динамичностью и стохастичностью процессов погрузки, разгрузки и транспортирования горной массы. Применение аналитических методов требует значительных допущений и упрощений разрабатываемых моделей, в результате чего вероятностное взаимодействие экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве учитывается не в полной мере, что не позволяет избежать ошибок в планировании организации работ и приводит к появлению «узких мест».

Методы исследования

Множество параметров, динамика взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов, вероятностная природа погрузочно-транспортных процессов позволяет отнести технологии открытых горных работ к сложным дискретным системам со стохастическим характером функционирования. Исследование таких систем предполагает построение абстрактных математических моделей, представленных на языке математических отношений в терминах определенной математической теории, позволяющей получить функциональные зависимости характеристик исследуемой системы от параметров. Изучение процессов, протекающих в дискретных системах со стохастическим характером функционирования, проводится в рамках теории массового обслуживания и теории случайных процессов. При этом 80% моделей реальных дискретных систем строятся на основе моделей массового обслуживания, которые делятся на базовые модели в виде систем массового обслуживания (СМО) и сетевые модели в виде сетей массового обслуживания (СеМО), представляющие собой математические объекты, описываемые в терминах соответствующего математического аппарата [4–8].

Исходя из этого, для отображения открытых горных работ выбран математический аппарат систем массового обслуживания, успешно применяемый в горном деле для отображения взаимодействия горных машин с учетом случайных факторов [9–20].

Наиболее эффективным и универсальным методом исследования дискретно-стохастических сетей массового обслуживания любой сложности и степени детализации без привязки к марковским процессам является имитационное моделирование. Анализ систем имитационного моделирования показал, что программными продуктами, позволяющими проводить дискретно-событийное имитационное моделирование различных технологических систем, представленных в виде СМО, (в том числе и в горном деле) являются: AnyLogic (Россия), AutoMod (США), Awesim (США), DELMIA (Франция), FLEXSIM (США), GPSS Studio (Россия), MineTwin Simulation (Россия), ProModel (США), Simul8 (США), Simulink (США), Рудопоток (Россия) [21–28].

Подавляющее большинство используемых в мире инструментов имитационного моделирования являются зарубежными, что делает не совсем удобным их применение для исследования технологий горных работ. Поэтому целесообразно использовать современные



отечественные системы моделирования, не уступающие по функционалу зарубежным аналогам, имеющие собственный графический редактор, мощный симулятор и как можно более полный комплекс инструментов для проведения имитационного исследования. В России одной из наиболее известных и мощных систем имитационного моделирования, которая нашла применение в горном деле, является GPSS Studio, разработанная российской компанией «Элина Компьютер» и включенная в Реестр Минкомсвязи отечественных программных продуктов. Моделирующим ядром системы является язык имитационного моделирования GPSS World Core [29], принцип которого основан на теории массового обслуживания и позволяет моделировать вероятностные процессы, распределенные по различным непрерывным и дискретным законам, а также отображать динамику взаимодействия горных машин во времени и пространстве. Все это позволяет считать GPSS Studio наиболее подходящим инструментом для программной реализации СеМО и разработки имитационных моделей взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК.

Для разработки имитационной модели необходимо владеть языком GPSS World Core и уметь переводить на него технологические параметры объекта моделирования, выявлять и исправлять ошибки в имитационной модели, интерпретировать результаты вычислительных экспериментов в терминах технологии открытых горных работ. Все это в некоторой степени ограничивает применение имитационного моделирования. Специалист в области горного дела, столкнувшийся с задачей выбора технологических решений, вынужден разяснять ее специалисту по имитационному моделированию, не знающему всех нюансов технологии открытых горных работ. Возникает проблема доступности имитационных экспериментов для горных инженеров-технологов. Для ее решения создаются языки компьютерной анимации, позволяющие отображать процесс имитации как работу знакомого оборудования на мнемосхеме технологического процесса. Применение компьютерной анимации позволяет воспроизводить динамику горных работ на экране компьютера, проверять правильность имитационной модели по визуальному отображению, легко выявлять и исправлять ошибки при отладке модели, перемещаться во времени и пространстве с целью анализа и прогноза ситуаций, менять масштаб и позиционирование любых участков изображения. Одним из эффективных программных продуктов для создания компьютерной анимации горных работ является Proof Animation [9–12], который выбран для отображения функционирования ЭАК. Для связи анимации с имитационной моделью используются простой текстовый файл стандарта ASCII с расширением .atf, который содержит автоматически записываемые имитационной моделью команды, содержащие динамические выходные параметры результатов моделирования. Далее созданная анимационная модель считывает и обрабатывает данные из этого текстового файла и двигает объекты в среде Proof Animation, выводит параметры и строит графики изменения требуемых параметров в динамике.

Обработка результатов имитационных экспериментов не может дать абсолютно точных значений, т. к. погрузочно-транспортные процессы отображаются с учетом случайных аспектов. Существует некая степень точности результатов – приближение к какому-то истинному значению. Эта степень точности в значительной мере определяется размером выборки, т. е. количеством запусков модели с одинаковыми входными параметрами, но различными значениями генераторов случайных чисел. Следовательно, для обеспечения точности и достоверности выводов на основе результатов моделирования необходимо провести несколько запусков имитационной модели, изменяя последовательность случайных чисел, а затем обработать получившуюся выборку стандартными статистическими процедурами, например, найти оценку математического ожидания выбранных показателей эффективности. Возникает задача определения такого размера выборки $N_{\text{зап}}$ (запусков модели с различными значениями генераторов случайных чисел), который позволяет обеспечить желаемый уровень точности и достоверности, но в то же время минимальные затраты на проведение вычислительных экспериментов. Так, если необходимо оценить случайную величину некоторого показателя эффективности функционирования ЭАК, например, значение суточной эксплуатационной производительности – Q по результатам прогонов модели $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, то за оценку можно взять величину $Q_{\text{ср}}$ [31]:



$$Q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{зап}}} Q_i}{N_{\text{зап}}}, \quad (1)$$

где i – номер запуска модели; Q_i – значение эксплуатационной производительности при i -ом запуске модели.

Количество запусков модели для нахождения среднего значения какой-либо случайной величины, имеющей математическое ожидание μ и дисперсию σ^2 , определяют по формуле [5]:

$$N_{\text{зап}} = \frac{t_a^2 \sigma^2}{\varepsilon^2} + 1 \quad (2)$$

где t_a – квантиль нормального распределения вероятностей, который находится из специальных таблиц распределения Стьюдента (t -распределение) на основе заданного уровня достоверности и определенных степеней свободы ν по формуле:

$$\nu = k - m - 1 \quad (3)$$

где k – число значений случайной величины; m – число определяемых параметров.

Оценку дисперсии s^2 можно определить по формуле

$$s^2 = \frac{1}{N_{\text{зап}} - 1} \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{зап}}} Q_i^2 - \frac{1}{N_{\text{зап}}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{зап}}} Q_i \right)^2 \right] \quad (4)$$

с проведением серии предварительных запусков (50-100) модели с изменением в каждом прогоне последовательности случайных чисел в генераторах, встроенных в программное обеспечение.

Если необходимо оценить несколько показателей эффективности технологии с заданной точностью и достоверностью, то для каждого показателя следует определить необходимое количество запусков модели и затем выбрать максимальное значение:

$$N_{\text{зап}} = \max (N_{\text{зап1}}, N_{\text{зап2}}, N_{\text{запн}}), \quad (5)$$

где $N_{\text{зап}i}$ – число запусков модели для i -го показателя эффективности.

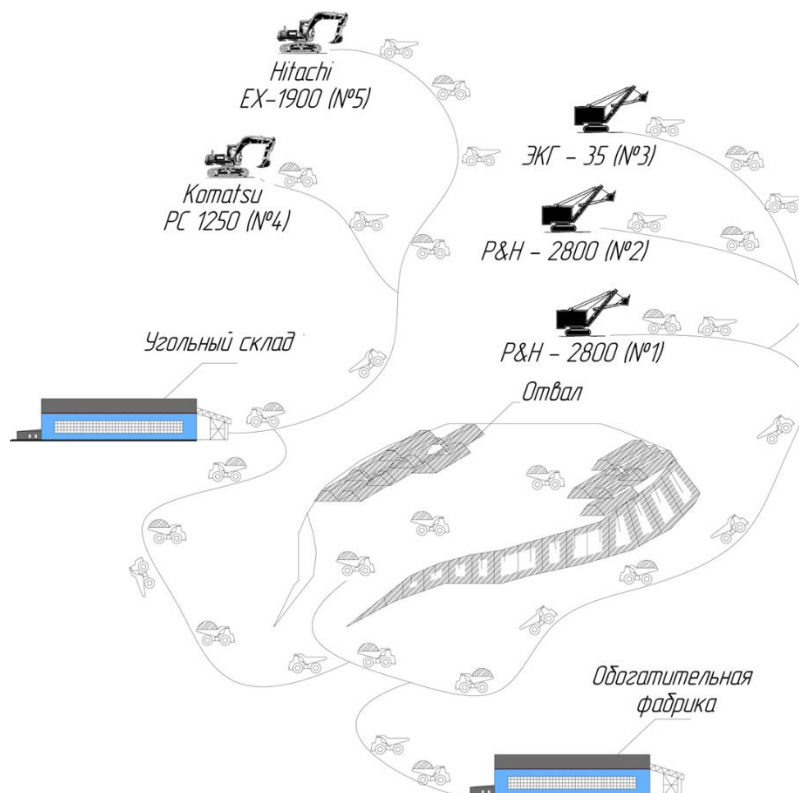


Рис. 1. Схема участка разреза

Fig. 1. Diagram of the open-pit mining area

Результаты.

Объектом исследования является участок одного из разрезов Кузбасса, на котором одновременно работает пять экскаваторов различных моделей: Р&Н-2800 (№ 1 и № 2), ЭКГ-35 (№ 3), Komatsu PC 1250 (№ 4) и Hitachi EX-1900 (№ 5) (Рис. 1).

Экскаваторы №№ 1-3 выполняют выемку и погрузку взорванных скальных горных пород IV категории по блочности, а экскаваторы № 4 и № 5 – выемку и погрузку угля. За экскаваторами №№ 1-3 закреплено соответственно 3, 10 и 11 автосамосвалов модели БелАЗ-75306, которые транспортируют вскрышную породу на отвал. Автосамосвалы БелАЗ-75131 закреплены за экскаваторами № 4 и № 5 в количестве соответственно 3 и 9, они транспортируют уголь на обогатительную фабрику или угольный склад.

Технологические схемы работы экскаваторов отображены на Рис. 2 и 3. Параметры эксплуатации и средняя продолжительность выполнения основных технологических процессов согласно хронометражным данным представлены в Таблицах 1 и 2 соответственно.

Работа участка разреза представлена в виде сети массового обслуживания (СеМО) с ожиданием, которая состоит из пяти СМО, отображающих функционирование каждого ЭАК. Поскольку в СеМО заявки-автосамосвалы не покидают систему, она является замкнутой (Рис. 4).

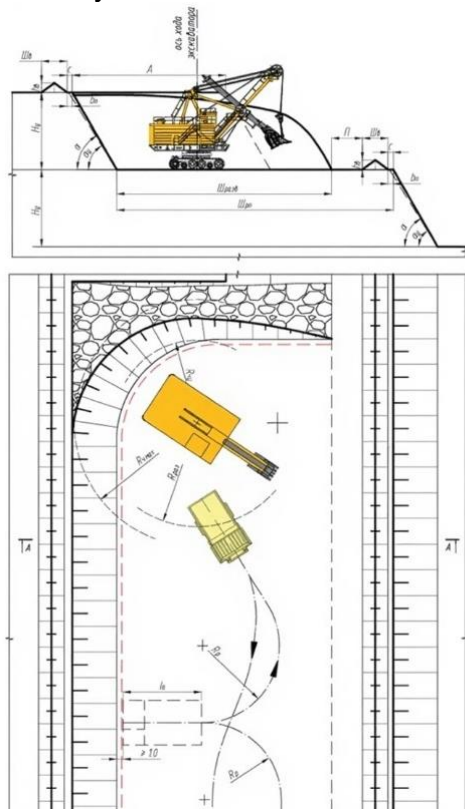


Рис. 2. Технологическая схема отработки одним уступом взорванных горных пород экскаватором типа «прямая механическая лопата» Р&Н-2800 и ЭКГ-35 с погрузкой на автомобильный транспорт в тупиковых забоях № 1, № 2 и № 3

Fig. 2. Technological scheme for working out blasted rocks with a single bench using a P&H-2800 and an EKG-35 excavator with loading into dump trucks in dead-end faces № 1, № 2 and № 3

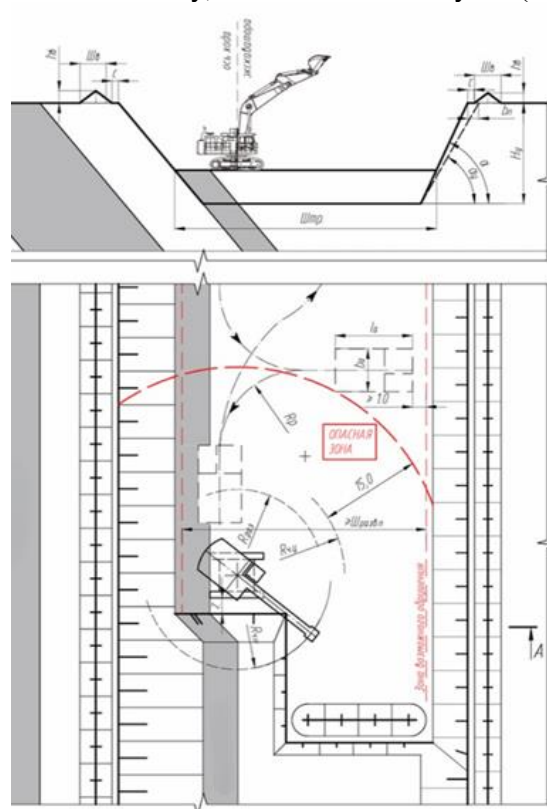


Рис. 3. Технологическая схема отработки добычного уступа гидравлическими экскаваторами типа обратная лопата Komatsu PC 1250 (№ 4) и Hitachi EX-1900 (№ 5) на автомобильный транспорт с погрузкой на уровне стояния в забоях № 4 и № 5

Fig. 3. Technological scheme of excavation the coal bench by Komatsu PC 1250 (№ 4) and Hitachi EX-1900 (№ 5) backhoes into dump trucks with loading at the standing level in faces № 4 and № 5



Таблица 1. Параметры эксплуатации производства вскрышных и добычных работ с использованием экскаваторов и автосамосвалов

Table 1. Parameters of stripping and winning operations using excavators and dump trucks

Группа параметров	Параметры, ед. изм	Значение						
		P&H-2800		ЭКГ-35	Komatsu PC1250		Hitachi EX-1900	
Рабочие и технологические параметры экскаваторов	Максимальный радиус черпания на уровне стояния, м	16,4		17,9	16		14,8	
	Максимальный радиус черпания, м	24,2		25,5	16,3		10,9	
	Максимальная высота черпания, м	16,6		19,3	13,4		14,2	
	Максимальная высота разгрузки, м	9,1		12,3	9,3		11,8	
	Вместимость ковша, м³	33		35	6,7		11	
Конструкторно-технологические параметры автосамосвалов	Марка	БелАЗ-75306			БелАЗ-75131			
	Максимальная грузоподъемность, тонн	220			130			
	Вместимость кузова с «шапкой», м³	130			71,2			
	Длина автосамосвала, м	13,4			11,5			
	Ширина автосамосвала, м	7,8			6,4			
Горнотехнические условия эксплуатации	Состав комплекса	РН-2800 + БелАЗ-75306 (№1)	РН-2800 + БелАЗ-75306 (№2)	ЭКГ-35 + БелАЗ-75306 (№3)	Komatsu PC 1250 + 75131 (№4)		Hitachi EX-1900 + 75131 (№5)	
	Дальность транспортирования, км	6,26	4,33	4,06	До ОФ	До склада	До ОФ	До склада
					0,73	1,01	7,16	7,34
	Высота уступа, м	15	15	15	15		15	
	Высота подступа, м	-	-	-	5		5	
	Ширина развала, м	42	42	42	-		-	
	Ширина рабочей площадки, м	53,5	53,5	54	-		-	
	Ширина траншеи, м	-	-	-	35		35	
	Устойчивый угол откоса уступа, град	58			60		60	
	Рабочий угол откоса уступа, град	60			65		65	
	Число загружаемых ковшей, шт	6	5	7	11		8	
	Фактическая загруженность автосамосвала, тонн	207	217	208	125		130,3	
Доля распределения автосамосвалов по пунктам разгрузки, %	100			95	5	85	15	



Таблица 2. Средняя продолжительность основных технологических процессов при производстве вскрышных и добычных работ, минут

Table 2. Average duration of the main technological processes in stripping and winning operations, min

Технологический процесс	Средняя продолжительность, мин				
	РН-2800 + БелАЗ-75306 (№1)	РН-2800 + БелАЗ-75306 (№2)	ЭКГ-35 + БелАЗ-75306 (№3)	Komatsu PC 1250 + 75131 (№4)	Hitachi EX-1900 + 75131 (№5)
Маневры при погрузке	0,420	0,500	0,530	0,200	1
Погрузка автосамосвала	2,448	2,745	3,500	9,086	4,986
Движение автосамосвала в груженом направлении до отвала	21,360	13,78	14,03	-	-
Движение автосамосвала в груженом направлении до обогатительной фабрики	-	-	-	2,800	22,480
Движение автосамосвала в груженом направлении до угольного склада	-	-	-	3,980	24,030
Маневры при разгрузке	0,700			0,900	
Разгрузка	1,300		1,000	1,960	2,070
Движение автосамосвала в порожнем направлении от отвала	17,090	11,020	11,22	-	-
Движение автосамосвала в порожнем направлении до обогатительной фабрики	-	-	-	2,240	17,980
Движение автосамосвала в порожнем направлении до угольного склада	-	-	-	3,180	19,240

В СеМО заявки представляют собой автосамосвалы моделей БелАЗ-75131 (круглая форма) и БелАЗ-7530 (квадратная форма). Количество генерируемых заявок соответствует числу закрепляемых за i -м экскаватором автосамосвалов и находится в интервале [30]:

$$1 \leq N_{\text{экс}i} \leq 20, \quad (6)$$

где $N_{\text{экс}i}$ – количество автосамосвалов, закрепляемых за i -м экскаватором, ед.

Приборами, обслуживающими эти заявки-автосамосвалы, являются экскаваторы, обогатительная фабрика, угольный склад и отвал. Стрелками обозначено направление движения заявок в модели. Проходя через приборы обслуживания, каждая заявка задерживается на время, равное времени выполнения основных технологических процессов ЭАК (маневры при погрузке, погрузка, груженный ход, маневры при разгрузке, разгрузка и порожний ход). Продолжительность обслуживания заявки является случайной величиной и задается γ -законом с функцией плотности распределения [31]:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x \in (0; \mu + 3\sigma), \alpha > 0, \beta > 0, \quad (7)$$

где μ – выборочное математическое ожидание; σ – выборочное среднеквадратическое отклонение; χ – значение элемента выборки; α – параметры формы; β – параметр масштаба; Γ – гамма-функция Эйлера.

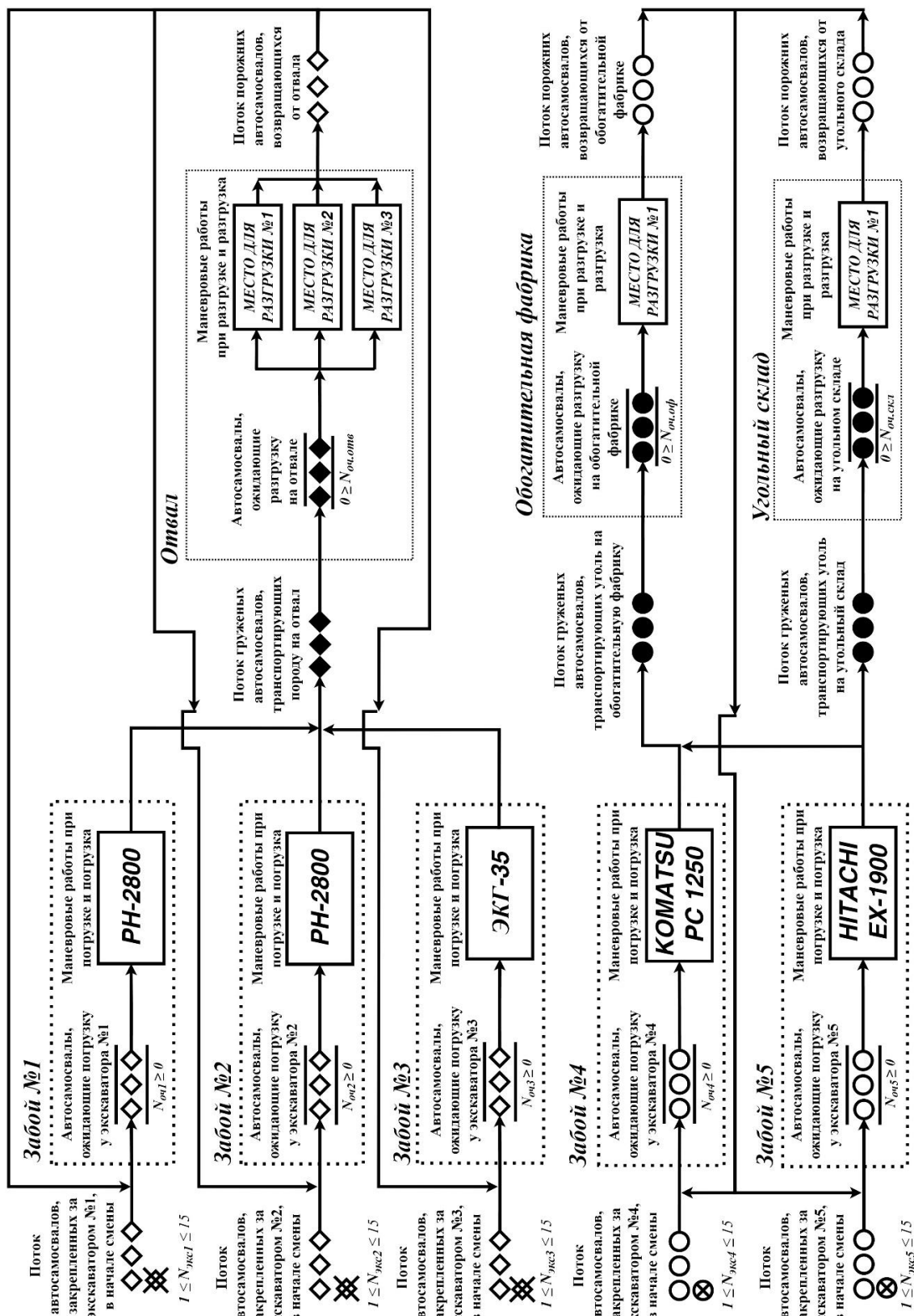


Рис. 4. Модель участка разреза с использованием ЭМК в виде замкнутой СМО с ожиданием
Fig. 4. A model of a section of an open pit using EAC in the form of a closed queuing network with waiting



В случае занятости прибора обслуживания, отображающего экскаватор, пришедшие заявки-автосамосвалы выстраиваются в очередь. Подобная очередь может образовываться и перед приборами, отображающими угольный склад и отвал. Дисциплина обслуживания заявок осуществляется по правилу FIFO (первым пришел – первым ушел). При рациональном закреплении автосамосвалов за экскаваторами и согласованной работе ЭАК очередей на пунктах погрузки и разгрузки не возникает, т. е.

$$N_{оч.i} \geq 0, \quad (8)$$

$$N_{оч.p} \geq 0, \quad (9)$$

где $N_{оч.i}$ – размер очереди из заявок-автосамосвалов перед погрузкой у i -го экскаватора, а $N_{оч.p}$ – размер очереди на p -ом пункте разгрузки (отвале, угольном складе, обогатительной фабрике).

Продолжительность обслуживания заявок-автосамосвалов в каждом приборе зависит от горнотехнических условий эксплуатации, физико-механических свойств горных пород, рабочих и технологических параметров экскаваторов, а также от конструктивно-технологических параметров автосамосвалов. Продолжительность одного цикла движения j -ой заявки-автосамосвала от i -го экскаватора до p -го пункта разгрузки и обратно к экскаватору в модели представляет собой полный рейс автосамосвала $t_{рейс.ac}$ и определяется как [30, 32]:

$$t_{рейс.ac} = t_{ожд.пogr} + t_{ман.пogr} + t_{пogr} + t_{груж} + t_{ман.разг} + t_{разг} + t_{порож}, \quad (10)$$

где $t_{оч.экс}$ – продолжительность ожидания погрузки, с; $t_{ман.пogr}$ – продолжительность выполнения маневровых работ при погрузке, с; $t_{пogr}$ – продолжительность погрузки автосамосвала экскаватором, с; $t_{груж}$ – продолжительность движения автосамосвала в груженом направлении (транспортирование), с; $t_{ман.разг}$ – продолжительность выполнения маневровых работ при разгрузке, с; $t_{разг}$ – продолжительность разгрузки автосамосвала, с; $t_{порож}$ – продолжительность движения автосамосвала в порожнем направлении, с.

Разработанная СеМО имеет несколько источников разнородных заявок, включает более трех узлов, при этом интервалы поступления заявок и продолжительности их обслуживания подчинены не экспоненциальному, а γ -закону [4–8].

Рассчитать показатели эффективности такой СеМО, несмотря на развитие теории массового обслуживания, аналитическими методами практически не представляется возможным. Поэтому для реализации разработанной СеМО использован метод имитационного моделирования с применением специализированного языка GPSS World-Core [29, 33], с использованием которого построено множество моделей открытых и подземных горных работ [9, 13, 31, 34–36].

Разработана имитационная модель участка разреза, на котором действуют пять ЭАК. Модель состоит из шести модулей, написанных на языке GPSS World-Core: «Ввод автосамосвалов в модель», «Движение автосамосвалов от промплощадки до закрепленного экскаватора», «Работа экскаваторов», «Груженный ход», «Работа автосамосвалов в пунктах разгрузки», «Порожный ход». Схема имитационной блочно-модульной модели участка разреза в среде GPSS Studio представлена на Рис. 5.

В качестве примера на Рис. 6 показана блок-схема модуля GPSS-модели «Работа экскаваторов».

Блоки QUEUE и DEPART фиксируют начало и окончание сбора статистики об ожидающих обслуживания транзактах, т. е. простаивающих автосамосвалах в ожидании погрузки. Блоки ENTER и LEAVE фиксируют занятие и освобождение мест возле экскаватора, предназначенных для выполнения маневровых работ при погрузке. Блоки SEIZE и RELEASE отображают начало и окончание работы экскаватора, осуществляющего погрузку породы в кузов автосамосвала. Блоки ADVANCE задерживают транзакты-автосамосвалы на время, равное времени выполнения маневровых работ при погрузке в забое, самой погрузки и выполнения порожнего хода автосамосвала от промплощадки до закрепленного экскаватора. Блоки TEST и TRANSFER перенаправляют транзакты в соответствии с установленными требованиями работы экскаватора и автосамосвалов. Количество мест для одновременной установки под погрузку задается с помощью управляющих операторов STORAGE. Блоки MARK и SAVEVALUE использованы для



определения последовательности, фиксации и продолжительности технологических операций. Блоки WRITE используются для записи динамических выходных параметров имитационной модели в текстовый документ. Количество разгружаемых ковшей в кузов автосамосвала экскаватором, а также продолжительность процессов цикла экскаватора задаются с помощью управляющих операторов VARIABLE. Количество таких блоков соответствует числу экскаваторов.

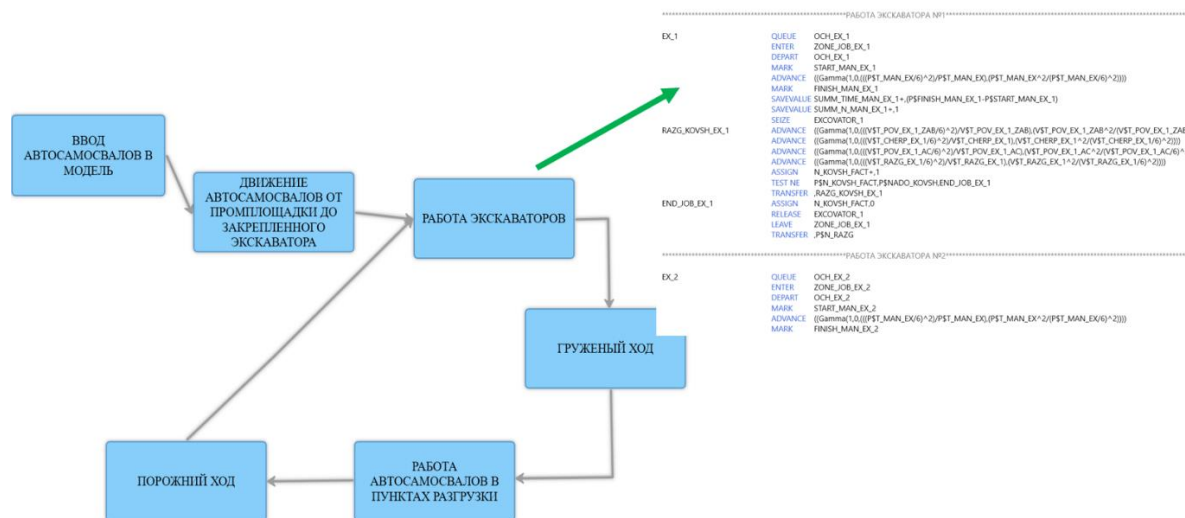


Рис. 5. Схема имитационной блочно-модульной модели участка разреза в среде GPSS Studio

Fig. 5. Scheme of a block-modular simulation model of an open pit mining area in the GPSS Studio environment



Рис. 6. Модуль «Работа экскаваторов» GPSS-модели участка разреза
Fig. 6. Module "Excavator Operation" of the open pit mining site GPSS model



Проверка адекватности созданной имитационной модели осуществлялась путем сравнения ретроспективных данных по работе участка реального разреза с результатами моделирования для одних и тех же входных параметров. В результате максимальное расхождение не превысило 9% при доверительной вероятности 95%, что позволяет проводить на модели вычислительные эксперименты, на основании которых можно делать выводы по реальной системе [34, 37].

Для обеспечения точности и достоверности результатов моделирования и оценки каждого показателя эффективности: эксплуатационной производительности, среднего количества простаивающих автосамосвалов и коэффициента использования экскаватора с использованием формулы 2 определено необходимое количество запусков имитационной модели (Таблица 3).

Таблица 3. Количество запусков имитационной модели для обеспечения точности и достоверности результатов вычислительных экспериментов при доверительной вероятности 95%

Table 3. Number of runs of the simulation model to ensure the accuracy and reliability of the results of computational experiments with a confidence probability of 95%

Показатели эффективности роботизированных технологий горных работ	Точность, ε	Оценка дисперсии (по предварительным запускам модели), s^2	Число степеней свободы, ν	Квантиль нормального распределения вероятностей (по таблице t -распределения), t_a	Число запусков модели
Эксплуатационная производительность ЭАК, $Q_{\text{ЭАК}}$, т/см	200	131858	98	1,66	100
Среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, $N_{\text{ср}}$, шт.	1	2,26	98	1,66	7
Коэффициент использования экскаватора, $k_{\text{экс}}$	0,1	0,09	98	1,66	25

Таким образом, для обеспечения заданной точности и принятой достоверности 0,05 результатов моделирования при исследовании функционирования ЭАК на участке разреза необходимо проводить не менее 100 запусков модели. Для этого в созданной имитационной модели производилось изменение последовательности случайных чисел в генераторах при помощи управляющего оператора RMULT [5] и по формуле (1) находилось среднее значение определяемого показателя.

Разработана анимационная модель участка разреза в среде Proof Animation, в которой статическими объектами представлены траектории трасс, развалы взорванной горной массы, промплощадка, пункты разгрузки (отвал, угольный склад, обогатительная фабрика), а динамическими объектами отображены экскаваторы и автосамосвалы. На экран в соответствии с работой имитационной модели также выводятся значения показателей эффективности работы каждого ЭАК (эксплуатационная производительность, среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, коэффициент использования экскаватора) и всего участка (объемы привезенной горной массы в каждый пункт разгрузки и количество совершенных рейсов автосамосвалов) (Рис. 7).

В имитационную модель введены команды файла управления анимацией (файл *.atf), в соответствии с которыми динамические объекты перемещаются и изменяются на статическом фоне. После ввода входных параметров в имитационную модель и запуска моделирования происходит расчет показателей с генерацией файла *.atf, при запуске которого пользователь получает управляемую анимацию участка разреза. При изменении входных данных в имитационной модели происходит перерасчет параметров и перестройка анимации.

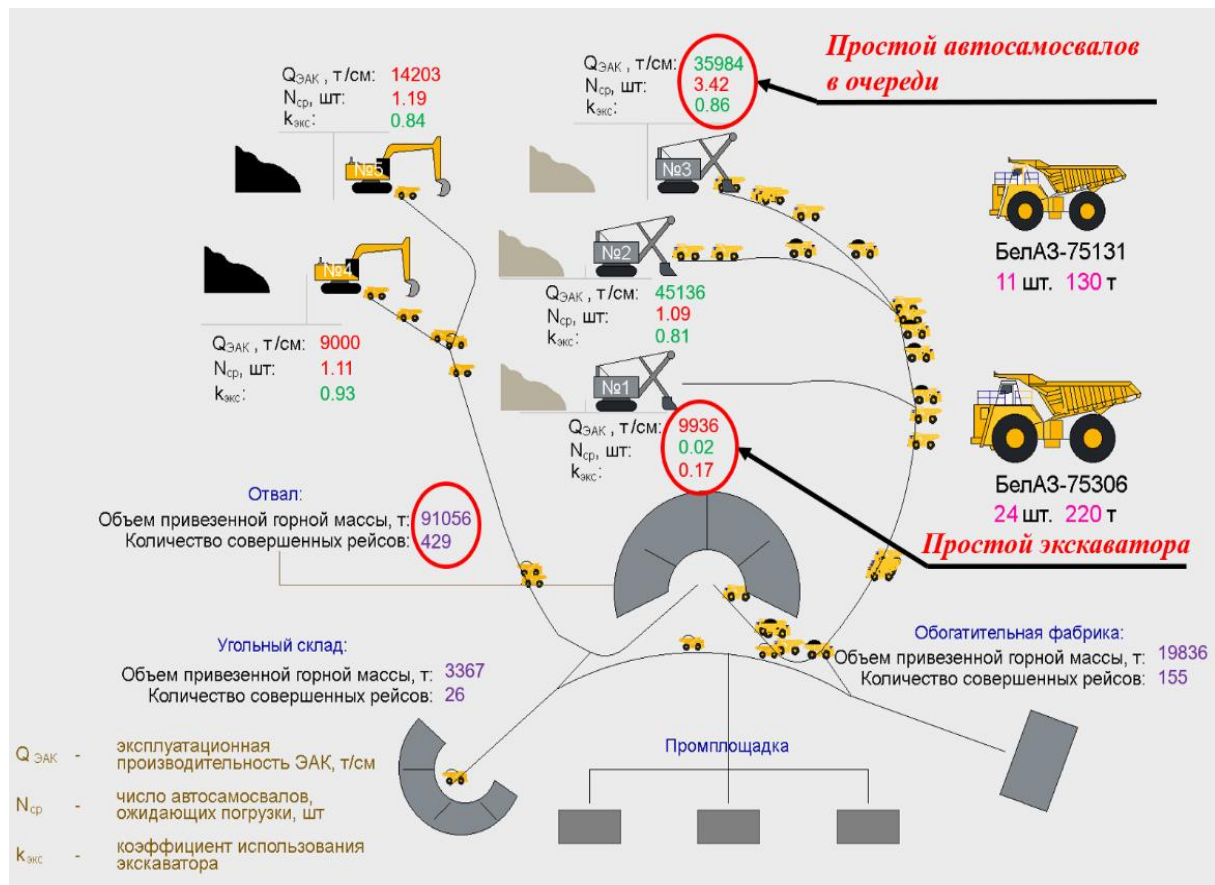


Рис. 7. Фрагмент анимации работы участка разреза
Fig. 7. Fragment of the animation of the open pit mining site working process

С использованием разработанных имитационной и анимационной моделей проведены вычислительные эксперименты по выявлению «узких мест». Период моделирования соответствовал одной смене (12 часов). При этом приняты следующие ограничения и допущения:

- учитывались простои, связанные только с ожиданием погрузки, и не учитывались аварийные и организационные внеплановые простои;
- не учитывалось влияние работы дополнительного оборудования (бульдозеры, грейдеры, фронтальные погрузчики);
- принято, что все автосамосвалы работают по закрытому циклу, вследствие отсутствия данных о перегонах автосамосвалов между экскаваторами и пунктами разгрузки.

На фрагменте анимации, представленном на Рис. 6, видно, что у экскаватора № 3 образуется очередь из автосамосвалов, ожидающих погрузки, среднее их количество составляет 3,25. При этом коэффициент загрузки этого экскаватора достаточно высок и равен 0,85, что свидетельствует о его перегруженности. Напротив, экскаватор № 1 простаивает, о чем свидетельствует низкий коэффициент его использования, равный 0,17, и отсутствие автосамосвалов, что характеризуется практически нулевым значением среднего количества автосамосвалов, ожидающих погрузки. Следовательно, у экскаваторов № 1 и № 3 образуются «узкие места», сдерживающие производительность.

С целью устранения этих «узких мест» предложено перенаправить два автосамосвала БелАЗ-75306 от экскаватора № 3 к экскаватору № 1. Фрагмент анимации с результатами вычислительных экспериментов после перенаправления автосамосвалов представлен на Рис. 8.

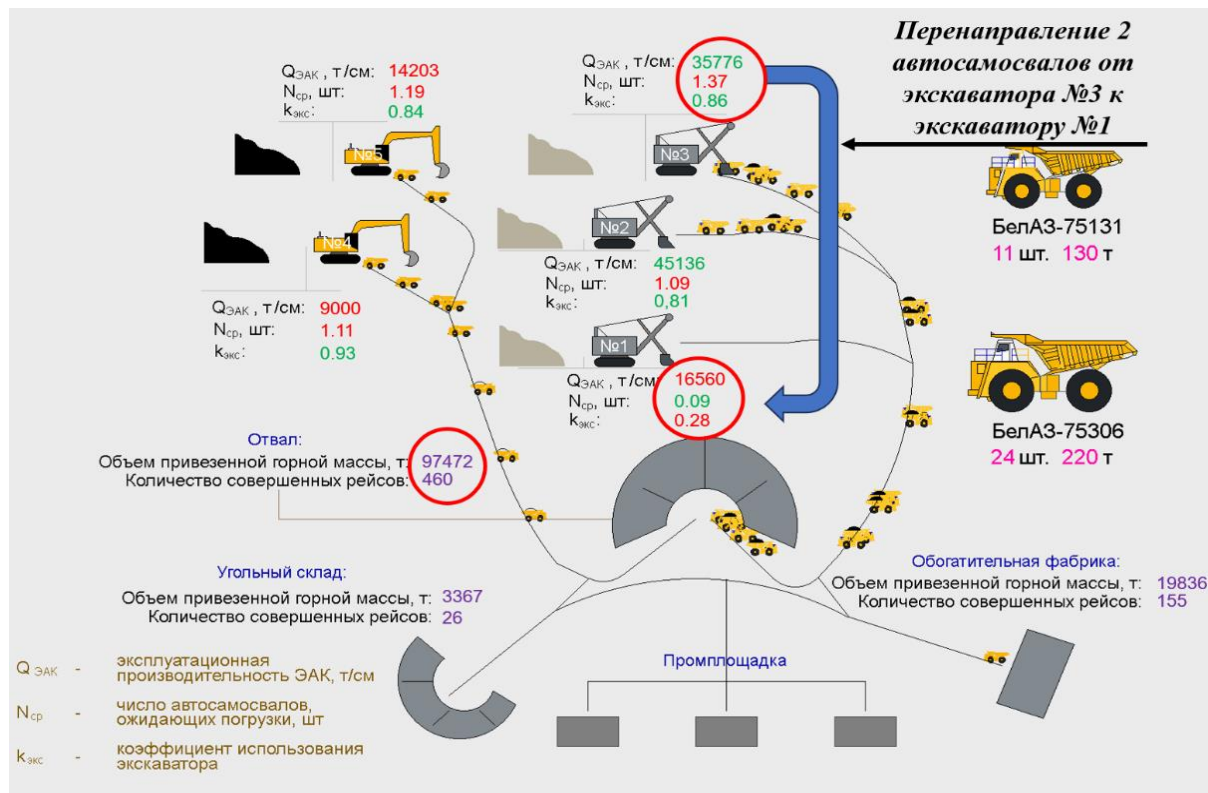


Рис. 8. Фрагмент анимации работы участка разреза после перенаправления двух автосамосвалов от экскаватора № 3 к экскаватору № 1

Fig. 8. Fragment of the animation of the working process of the open pit mining site after redirecting two dump trucks from excavator № 3 to excavator № 1

По фрагменту анимации видно, что перераспределение двух автосамосвалов от экскаватора № 3 к экскаватору № 1 позволило уменьшить среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, с 3,42 до 1,37, увеличить количество рейсов, совершенных на отвал, с 429 до 460 и тем самым увеличить объем привезенной горной массы на отвал за смену с 91056 до 97472 тонн.

На Рис. 9-12 представлены графики изменения показателей эффективности участка разреза вследствие перераспределения автосамосвалов, полученные по результатам вычислительных экспериментов.

Установлено, что предложение по перераспределению автосамосвалов позволит:

- увеличить объем привезенной горной массы на отвал за каждый час в среднем на 6,58% (с 7573,65 до 8126,45 тонн) (Рис. 9);
- увеличить эксплуатационную производительность первого ЭАК на 40% (с 9936 до 16650 т/см), при этом оставить неизменной производительность третьего ЭАК, но при закреплении за экскаватором № 3 меньшего количества автосамосвалов (вместо 11 – 9 шт.). Значения эксплуатационной производительности остальных ЭАК не претерпят изменений;
- уменьшить среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки у экскаватора № 3, практически на 60% (с 3,42 на 1,28);
- повысить коэффициент использования экскаватора № 1 на 38,92% (с 0,17 до 0,28), при этом оставить неизменными коэффициенты использования экскаватора № 3 и других экскаваторов.

На Рис. 13–15 представлены результаты вычислительных экспериментов, позволяющие определить количество закрепляемых за экскаваторами автосамосвалов с обеспечением максимальных значений эксплуатационной производительности ЭАК и коэффициентов использования экскаваторов с минимизацией среднего количества автосамосвалов, ожидающих погрузки.

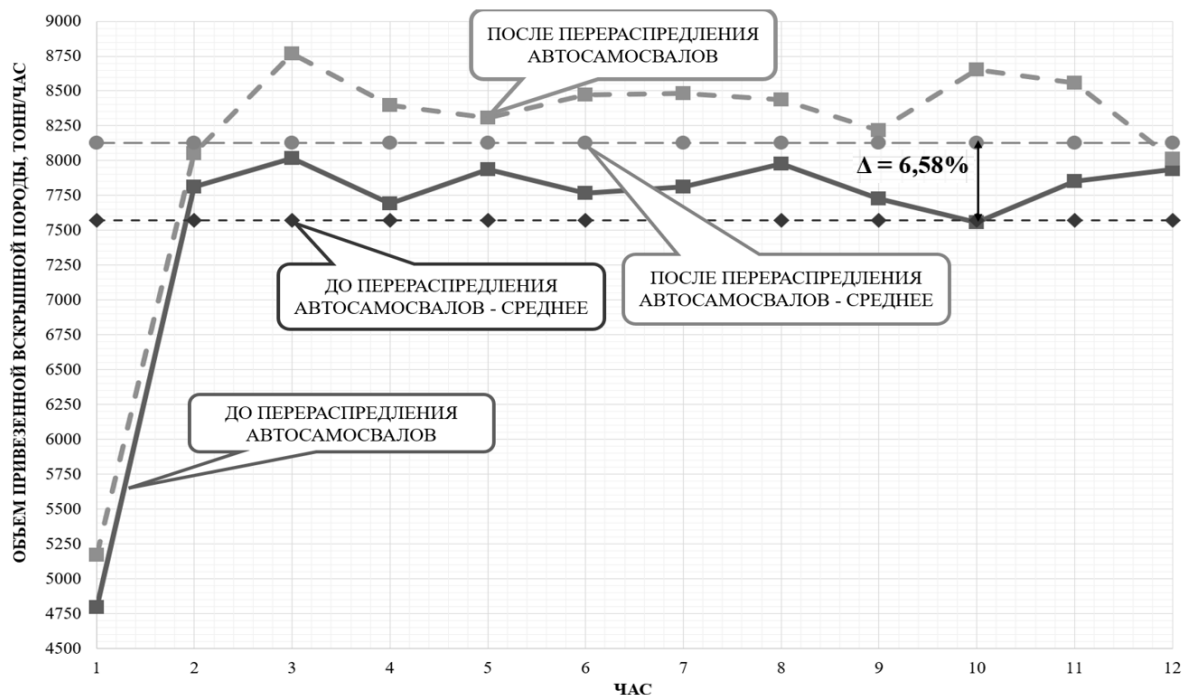


Рис. 9. Динамика изменения объема привезенной вскрышной породы на отвал за каждый час до и после перераспределения автосамосвалов

Fig. 9. Dynamics of changes in the volume of overburden brought to the dump for each hour before and after redistribution of dump trucks

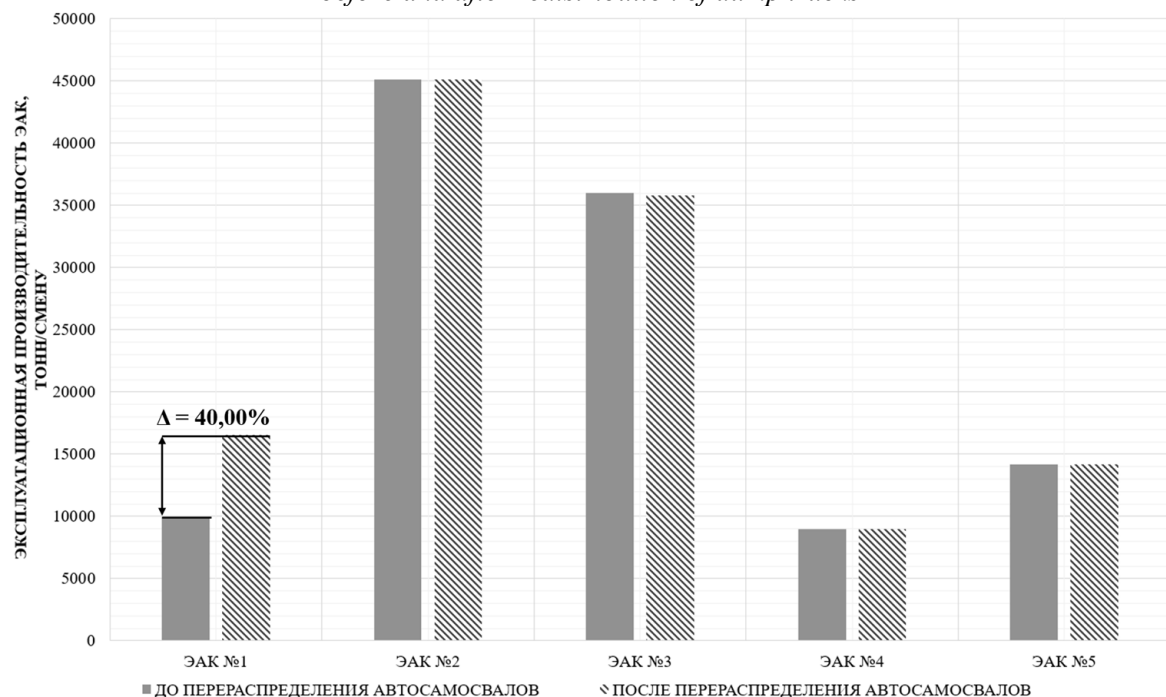


Рис. 10. Изменение эксплуатационной производительности функционирующих ЭАК до и после перераспределения автосамосвалов

Fig. 10. Change in operating performance of functioning EAC before and after redistribution of dump trucks

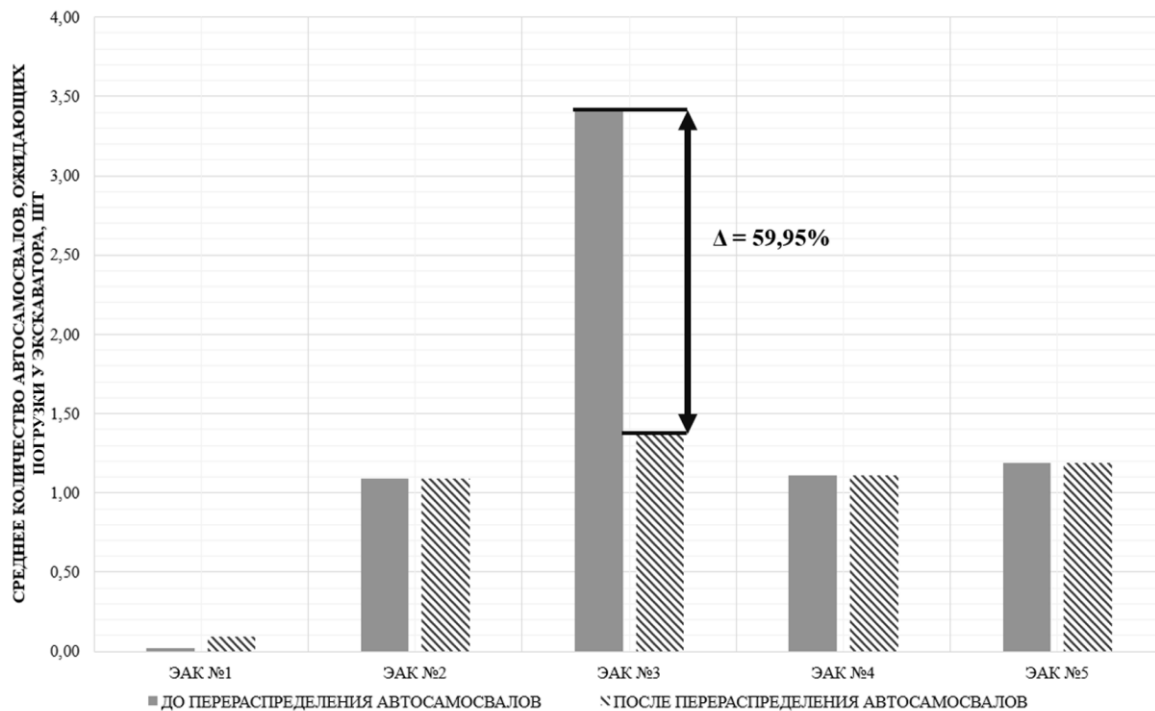


Рис. 11. Изменение среднего количества автосамосвалов, ожидающих погрузки, до и после их перераспределения

Fig. 11. Change in the average number of dump trucks waiting to be loaded before and after redistribution

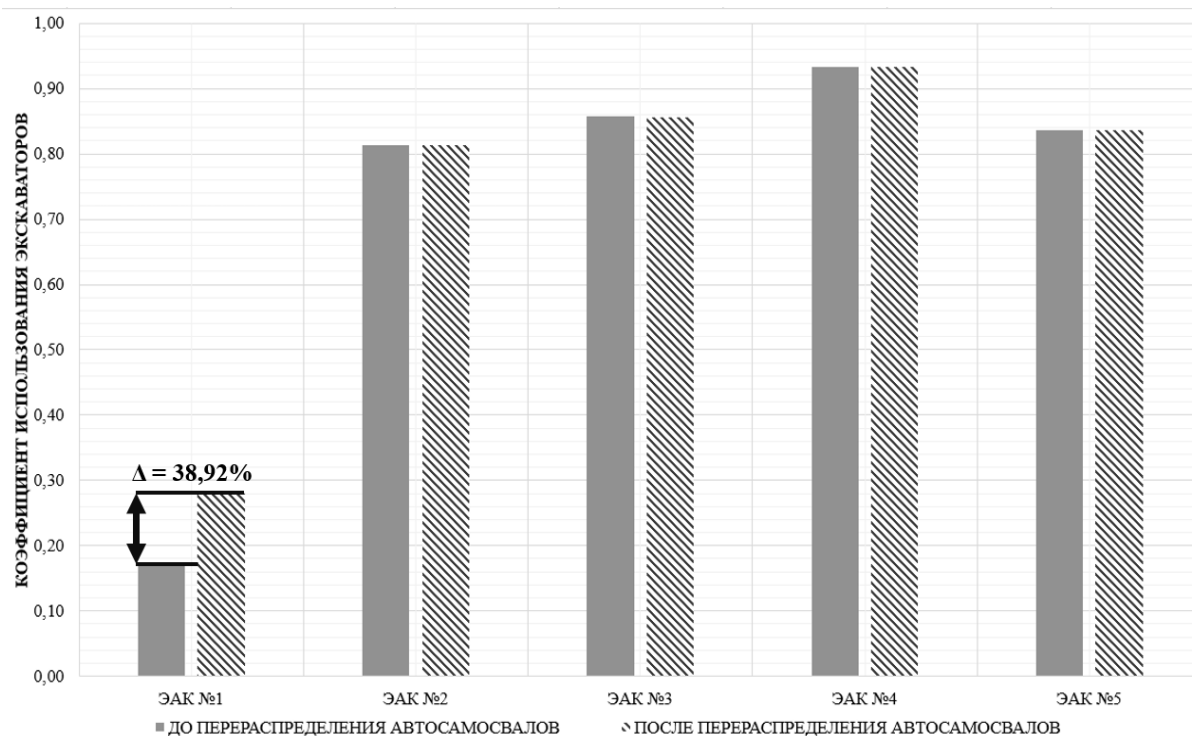


Рис. 12. Изменение коэффициента использования экскаваторов до и после перераспределения автосамосвалов

Fig. 12. Change in the utilization rate of excavators before and after redistribution of dump trucks



Установлено, что максимальное значение эксплуатационной производительности ЭАК № 3 (35776 тонн/смену) достигается при закреплении за экскаватором № 3 девяти автосамосвалов.

При этом среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, составляет 1,37, а коэффициент использования экскаватора 0,86. При увеличении количества автосамосвалов роста производительности и коэффициента использования экскаватора № 3 не наблюдается, а среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, начинает увеличиваться.

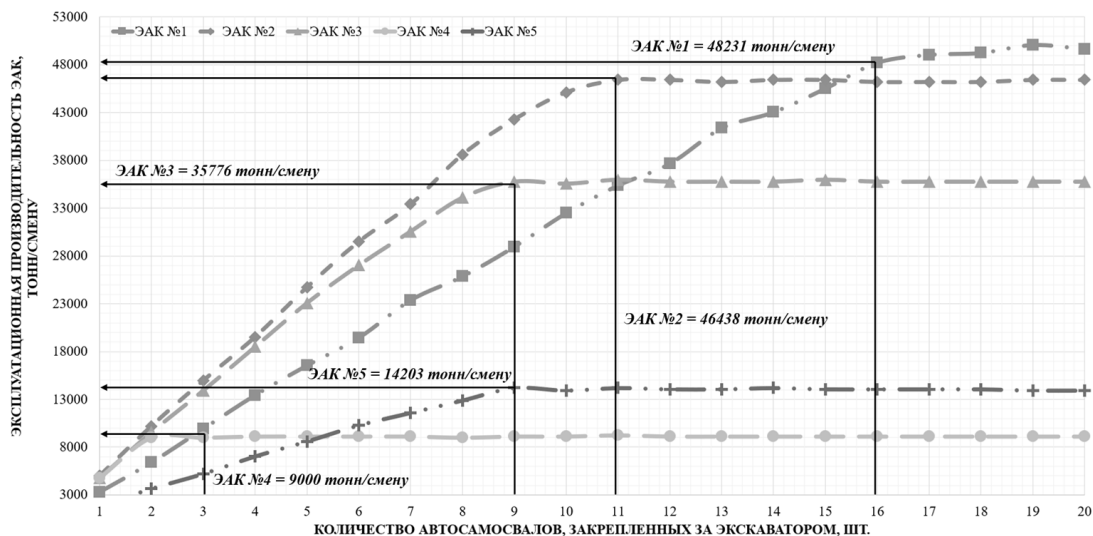


Рис. 13. Зависимость эксплуатационной производительности ЭАК от количества закрепленных за экскаватором автосамосвалов

Fig. 13. Dependence of the EAC operational performance on the number of dump trucks attached to the excavator

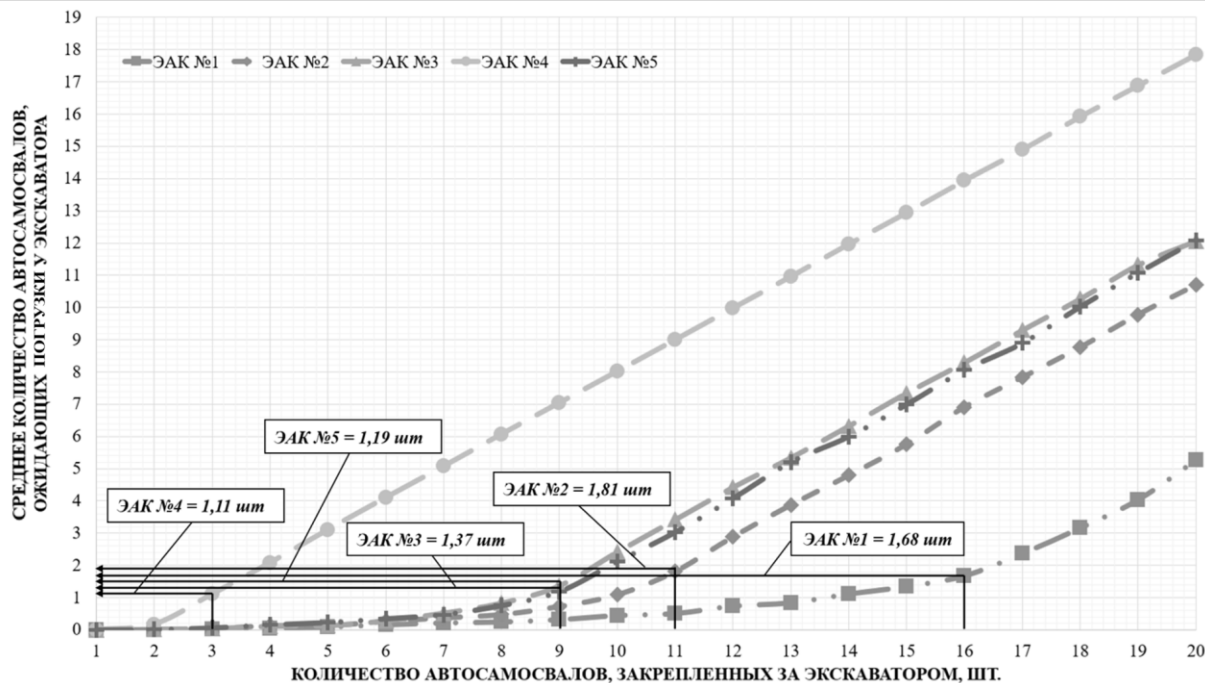


Рис. 14. Зависимость среднего количества автосамосвалов, ожидающих погрузки, от числа закрепленных за экскаватором автосамосвалов

Fig. 14. Dependence of the average number of dump trucks waiting for loading on the number of dump trucks assigned to the excavator

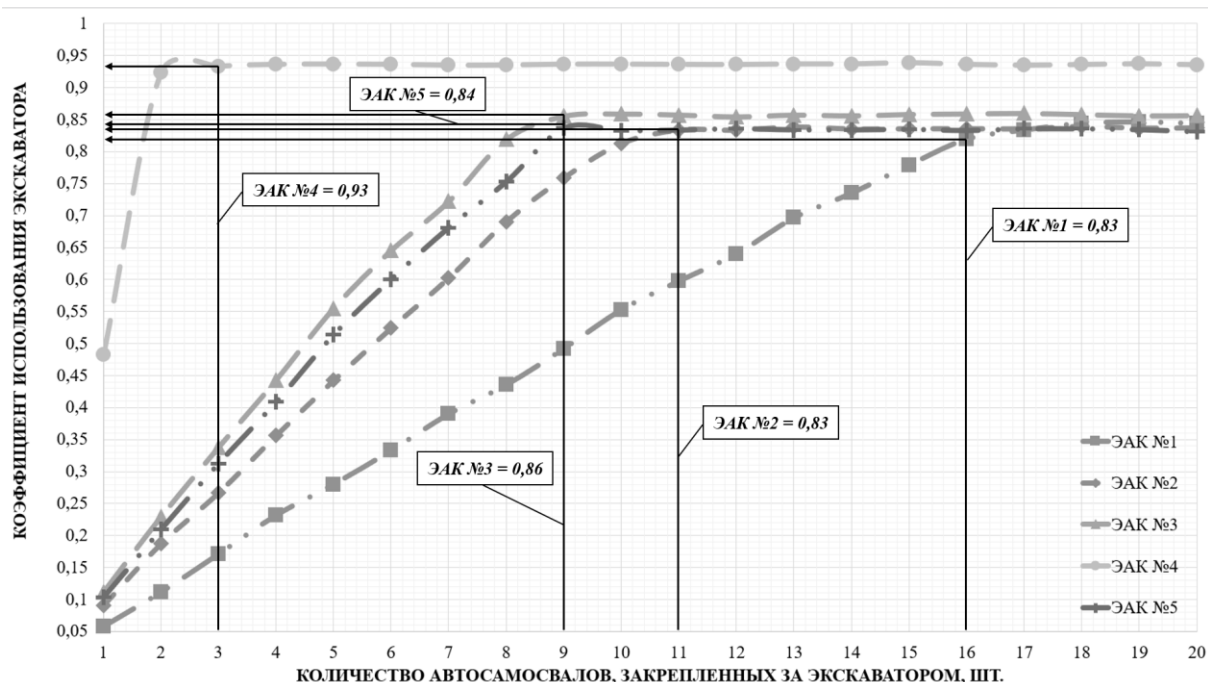


Рис. 15. Зависимость коэффициента использования экскаватора от числа закрепленных за ним автосамосвалов

Fig. 15. Dependence of the excavator utilization factor on the number of dump trucks assigned to it

Подобным образом выявлены варианты закрепления автосамосвалов за экскаваторами, обеспечивающие максимальную эффективность остальных ЭАК, что определяет максимальную эффективность участка разреза в целом (Таблица 4).

Таблица 4. Варианты закрепления автосамосвалов за экскаваторами, обеспечивающие максимальную эффективность участка разреза

Table 4. Options for attaching dump trucks to excavators that ensure maximum efficiency of the mining site

Показатель эффективности, ед. изм	ЭАК №1	ЭАК №2	ЭАК №3	ЭАК №4	ЭАК №5
Количество закрепленных за экскаватором автосамосвалов, шт.	16	11	9	3	9
Эксплуатационная производительность ЭАК, т/смену	48321	46438	35776	9000	14203
Среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, ед.	1,68	1,81	1,37	1,11	1,19
Коэффициент использования экскаватора	0,82	0,83	0,86	0,93	0,84

Выводы

1. При добыче угля открытым способом, как правило, используют экскаваторно-автомобильные комплексы, на эффективность работы которых оказывают влияние простои горных машин, образуя «узкие места», сдерживающие производительность участков разреза. Задача по выявлению и устранению таких «узких мест» путем рационального распределения автосамосвалов между экскаваторами является трудноформализуемой вследствие многообразия



рабочих и технологических параметров экскаваторов, конструкторно-технологических параметров автосамосвалов, физико-механических свойств горных пород, горнотехнических условий эксплуатации, высокой динамики горных работ и стохастического характера погрузочно-транспортных процессов. Все это ограничивает применение аналитических методов для решения обозначенной задачи. Применение математического аппарата систем массового обслуживания (СМО) с последующей программной реализацией, построенной СМО методами компьютерной имитации и анимации, позволяет моделировать погрузочно-транспортные процессы без получения аналитических закономерностей и отображать их на мнемосхеме горных работ в соответствии с работой имитационной модели, что значительно упрощает выявление и устранение «узких мест».

2. Работа участка разреза может быть отображена движением заявок со случайными задержками в замкнутой сети массового обслуживания (СеМО) с ожиданием, в которой количество функционирующих ЭАК задается числом источников заявок, количество автосамосвалов определяется числом поступающих на вход системы неординарных заявок, вид которых соответствует определенной модели автосамосвала, приборами обслуживания являются участки разгрузки. Продолжительность погрузочно-транспортных процессов отображается вводом случайных временных задержек в приборы СеМО.

3. Связи между приборами и заявками в СеМО адекватно описываются специализированным языком имитационного моделирования GPSS World-Core, не требующим формализованного описания взаимодействия ЭАК. Погрузочно-транспортные процессы в модели отображаются перемещением динамических объектов (транзактов) от блока к блоку. Блок представляет собой воздействие на транзакт, а транзакт – заявку-автосамосвал. Анализ времени нахождения транзакта в модели и времени занятости приборов обслуживания при функционировании модели позволяет получить важные в практическом смысле характеристики работы участка разреза: объем привезенной в пункты разгрузки горной массы, эксплуатационную производительность каждого ЭАК, среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки, и коэффициенты использования экскаваторов, что позволяет выявлять «узкие места».

4. Отображение работы участка разреза с функционирующими ЭАК в виде анимации, созданной при помощи программного продукта Proof Animation, позволяет: отображать динамику взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК на экране компьютера в соответствии с работой имитационной модели; сократить время проверки адекватности модели за счет быстрого и наглядного выявления ошибок; сделать процесс выявления и устранения узких мест доступным для пользователя, не являющегося специалистом в области программирования, моделирования и оптимизации; перемещаться во времени и пространстве с целью анализа и прогноза ситуаций; сократить время анализа результатов за счет вывода на экран статистических показателей технологических звеньев.

5. С практической точки зрения методы компьютерной имитации и анимации позволяют отображать функционирование ЭАК, выявлять «узкие места», анализировать предложения по их устранению и оценивать их эффективность, определять рациональный состав парка ЭАК с последующей визуализацией результатов моделирования, понятных специалистам горного профиля.

6. Дальнейшее развитие работы направлено на разработку многокритериальной оптимизационной модели и программных средств для автоматизации исследований, в том числе по выявлению и устранению «узких мест» в технологиях открытых горных работ и рациональному закреплению автосамосвалов за экскаваторами.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», проект FWEZ-2026-0001 «Разработка комплексных геотехнологий добычи запасов угля в сложных горно-геологических условиях без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, а также методов повышения эффективности эксплуатации и



контроля технического состояния роботизированного оборудования» (рег. № 1023032000051-1-1.5.1;2.7.5).

Список литературы

1. Братарчук, Т.В. Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России / Т.В. Братарчук, А.Г. Гладышев, К.Е. Лукичев и др. // Уголь. 2024. – №11. – С. 108-116. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-108-116.
2. Технология опережающей выемки наклонных и крутых угольных пластов обратными гидравлическими лопатами / А. В. Кацубин, А. А. Хорешок, М. А. Тюленев, С. О. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 11. – С. 27-36. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-11-0-27-36. – EDN ILJQPF.
3. Шаклеин, С. В. Тенденции развития минерально-сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса / С. В. Шаклеин, М. В. Писаренко, Т. Б. Рогова // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 1(24). – С. 4-22. – DOI 10.26730/2618-7434-2024-1-4-22. – EDN DQLFGI.
4. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Москва: Машиностроение, 1979. – 432 с.
5. Томашевский, В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова // М.: Бестселлер. – 2003. – 412 с.
6. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО; 2009. 363 с.
7. Рыжиков, Ю.И. Расчет многоканальных систем массового обслуживания с абсолютным и относительным приоритетами на основе инвариантов отношения / Ю.И. Рыжиков, А.Д. Хомоненко // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 3. – С. 11-16.
8. Кирпичников А.П. Прикладная теория массового обслуживания. – Казанск. гос. ун-т, 2008. – 118 с.
9. Sturgul, J. R. Discrete Simulation and Animation for Mining Engineers. CRC Press, 2015. – 600 p.
10. Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations / E. Tarshizi, J. Sturgul, V. Ibarra, D. Taylor // International Journal of Mining Science and Technology, 2015. – Vol. 25. – Iss. 4. – P. 671–674.
11. Henriksen, J. O. The power and performance of Proof Animation / J. O. Henriksen // Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, eds. S. Andradottir, K. J. Healy et al. – 1997. – pp. 574–580.
12. Konyukh V., Sinoviev V., Sturgul J. R. Selection of driving technologies for robotization // Proc. of the 7-th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Netherland, 1998. – P. 697-699.
13. Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ / В. В. Зиновьев, И. С. Кузнецов, П. И. Николаев, А. Н. Стародубов // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 65-76.
14. Варламова С. А., Володина Ю. И., Затонский А. В., Язев П. А. Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10- 0-214-222
15. Чудинов Г.В. Опыт разработки системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «Рудопоток» / Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов пятой юбилейной всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2011. Т. 2. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – С. 311-315.
16. Официальный сайт компании Амальгама: [Электронный ресурс]. – URL: <https://amalgamasimulation.ru/> (дата обращения: 31.05.2026)
17. Головей С.И., Фридрихсон О.В., Швабенланд Е.Е., Мишкурин П.Н. Обоснование параметров циклично-поточной технологии методом имитационного моделирования в среде Anylogic // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 331-340.
18. Девятков В.В. Опыт системного анализа транспортных систем с использованием метода имитационного моделирования. Вестник НЦБЖД. – 2017. – №1. – С. 18-28.
19. Воронов Ан.Ю. Сравнительная оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов в летний и переходный периоды года / Ан.Ю. Воронов, Ю.Е. Воронов, В.Г. Ромашко, Ар.Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2. – С. 11-16.
20. Воронов Ю.Е. Функциональный критерий качества функционирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / Ю.Е. Воронов, А.А. Хорешок, Ан.Ю. Воронов, Н.А. Стенина, Ар.Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 3. – С. 54-60.
21. Официальный сайт программы AnyLogic: [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.anylogic.ru> (дата обращения: 31.05.2026)
22. Щербаков, С.М. Имитационное моделирование экономических процессов в системе Arena: Учебное пособие / С.М. Щербаков; Рост. гос. эконом. ун-т (РИНХ). – Ростов н/Д, 2012. – 128 с.



23. Альсова О.К. Имитационное моделирование систем в среде ExtendSim: учебное пособие / О.К. Альсова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 104 с.
24. Козлова О.Ю. Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле // Уголь. – 2022. – № 5. – С. 42-45. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-42-45
25. Официальный сайт программы GPSS World: [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elina-computer.ru> (дата обращения: 31.05.2026)
26. Клебанов Б.И., Аксенов К.А., Антонова А.С., Пантелеева Ю.С., Крымов Е.А. Применение системы Plant Simulation для моделирования и оптимизации логистических процессов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
27. Официальный сайт программы Simio: [Электронный ресурс]. – URL: www.simio.com (дата обращения: 31.05.2026)
28. Моделирование систем массового обслуживания инструментальным средством Matlab/Simulink: методические указания / составитель В.В. Извозчикова. – Оренбургский гос. ун.-т. – 2021. – 53 с.
29. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022660098 «GPSS World Core» / Девятков В. В., Девятков Т. В., Федотов М. В., Хайбуллин Ш. Д.; правообладатель ООО «Элина-Компьютер». – заявка № 2022619474, заявл. 25.05.2022; опублик. 30.05.2022]
30. Воронов, А.Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06, 05.13.18 / КузГТУ. Кемерово, 2015. – 195 с.
31. Кузнецов, И.С. Оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 – ФИЦ УУХ СО РАН, КузГТУ. - Кемерово, 2022. – 169 с.
32. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 6 (146). – С. 3-8.
33. Девятков В.В. Эволюция имитационного моделирования – от "искусства и науки" к массовому применению / В.В. Девятков // Имитационное моделирование. Теория и XIII Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – 2017. – С. 27-36.
34. Конюх, В.Л. Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
35. Стародубов, А.Н. Система имитационного моделирования горнопроходческих работ / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, М.В. Береснев // Уголь. – 2016. – №2. – С. 20-24.
36. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В. Методика повышения скорости и достоверности принятия решения при проектировании очистных работ в сложных горно-геологических условиях // Уголь. – 2025. – №10. – С. 99-106.
37. Яцкив И.В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2003. Том 1. СПб.: ЦНИИТС. 2003. – с. 211-217.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Зиновьев Василий Валентинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем
e-mail: zv150671@mail.ru

Кузнецов Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры открытых горных работ
e-mail: is150794@mail.ru

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



UDC 620.1.05:622.267

THE USE OF COMPUTER SIMULATION AND ANIMATION METHODS TO IDENTIFY AND ELIMINATE “BOTTLENECKS” IN THE OPERATION OF EXCAVATOR-TRUCK SYSTEMS

Vasily V. Zinoviev^{1,2}, Igor S. Kuznetsov^{1,2}

¹ Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:

21 April 2026

Revised:

14 June 2026

Accepted:

03 July 2026

Keywords: open-pit mining, excavator-truck system, “bottlenecks”, simulation modeling, computer animation, computational experiments, Proof Animation, GPSS, queueing theory, queueing systems

Abstract.

In open-pit mining, the excavation, loading, and transportation of rock mass are typically carried out by excavator-truck complexes, whose operational efficiency is significantly affected by downtime of dump trucks waiting to be loaded or downtime of excavators waiting for dump trucks, creating so-called “bottlenecks” that hinder productivity. This study aims to improve the efficiency of an open-pit mining site with five excavator-truck systems by identifying and eliminating “bottlenecks” through the rational allocation of dump trucks among the excavators. Since the problem is complicated by the dynamic and stochastic aspects of loading and transport processes and is difficult to formalize, computer simulation and animation methods were applied to solve it. A discrete-event model was developed using queueing theory to represent the interaction between excavators and dump trucks in time and space, and it was implemented in the GPSS World Core simulation modeling language. An animation model was created using the Proof Animation software to visualize the simulation process on a mnemonic diagram of the equipment’s operation. The number of simulation runs required to ensure the accuracy and reliability of the simulation results was determined. Computational experiments were conducted to evaluate the efficiency of excavator-truck systems based on operational productivity indicators, the average number of dump trucks waiting to be loaded, and the excavator utilization rate. Bottlenecks were identified, and recommendations for eliminating them were provided; these recommendations were verified using the developed models.

For citation Zinoviev V.V., Kuznetsov I.S. The use of computer simulation and animation methods to identify and eliminate “bottlenecks” in the operation of excavator-truck systems. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2026;3(34):26-48. DOI: 10.26730/2618-7434-2026-3-26-48, EDN: FXXXFB

Acknowledgments. The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2026-0001 «Development of integrated geotechnologies for coal mining in complex mining and geological conditions without the constant presence of people in the mining areas, as well as methods for improving the operational efficiency and monitoring the technical condition of robotic equipment» (Reg. № 1023032000051-1-1.5.1;2.7.5).

References

1. Bratarchuk, T.V. Development and Implementation of Digital Twins for the Optimization and Sustainable Development of Russia’s Coal Industry / T.V. Bratarchuk, A.G. Gladyshev, K.E. Lukichev, et al. // *Coal*. 2024;(11):108-116. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-108-116. [In Russ.].
2. Katsubin A.V., Khoreshok A.A., Tyulenev M.A., Markov S.O. Technology for Advance Mining of Inclined and Steep Coal Seams Using Reverse Hydraulic Shovels. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020;11:27-36. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-11-0-27-36. [In Russ.].



3. Shacklein S.V., Pisarenko M.V., Rogova T.B. Trends in the Development of the Mineral Resource Base of the Kuzbass Coal Industry. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2024;1(24):4–22. – DOI 10.26730/2618-7434-2024-1-4-22. – EDN DQLFLI. [In Russ.]
4. Kleinrock, L. Queuing Theory. *Moscow: Mashinostroyeniye Publishing House*, 1979. – 432 pp. [In Russ.].
5. Tomashevsky V.N., Zhdanova E.G. Simulation Modeling in the GPSS Environment. *Moscow: Bestseller Publishing House*. – 2003. – 412 pp. [In Russ.].
6. Aliyev T.I. Fundamentals of Discrete System Modeling. *St. Petersburg State University ITMO*; 2009. – 363 pp. [In Russ.].
7. Ryzhikov Yu.I., Khomonenko A.D. Analysis of Multichannel Queuing Systems with Absolute and Relative Priorities Based on Ratio Invariants. *Intelligent Technologies in Transportation*. 2015;3:11–16. [In Russ.].
8. Kirpichnikov, A.P. Applied Queuing Theory. – *Kazan State University Press*, 2008. – 118 pp. [In Russ.].
9. Sturgul, J. R. Discrete Simulation and Animation for Mining Engineers. *CRC Press*, 2015. – 600 pp.
10. Tarshizi E., Sturgul J., Ibarra V., Taylor D. Simulation and Animation Model to Boost Mining Efficiency and Environmental Sustainability in Multi-Pit Operations. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015;25(4):671–674.
11. Henriksen, J. O. The Power and Performance of Proof Animation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, eds. S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson. – 1997. pp. 574–580.
12. Konyukh V., Sinoviev V., and Sturgul J. R. Selection of Driving Technologies for Robotization. *Proceedings of the 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. Netherlands, 1998. – pp. 697–699.
13. Zinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation Modeling of Robotized Technologies for Open-Pit and Underground Mining. *Mining Industry*. 2023;(S2):65–76. [In Russ.].
14. Varlamova S.A., Volodina Yu.I., Zatonsky A.V., and Yazev P.A. Development of a Simulation Model for Planning Mining and Excavation Operations. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;10:214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222 [In Russ.].
15. Chudinov, G.V. Experience in Developing a Simulation System for Cargo Flow in Potash Mines — “Rudopotok” Software Package. *Simulation Modeling. Theory and Practice: Proceedings of the Fifth Anniversary All-Russian Scientific and Practical Conference IMMOD-2011*. Vol. 2. – St. Petersburg: Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, JSC. – 2011. – pp. 311–315.
16. Amalgama Company’s official website: [Electronic resource]. – URL: <https://amalgamasimulation.ru/> (accessed May 31, 2026)
17. Golovey S.I., Friedrichson O.V., Shvabenland E.E., and Mishkurov P.N. Justification of the Parameters of Cyclic-Flow Technology Using Simulation Modeling in the AnyLogic Environment. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2021;4:331–340. [In Russ.].
18. Devyatkov, V.V. Experience in the System Analysis of Transportation Systems Using Simulation Modeling. *Bulletin of the National Center for Railway Transport*. 2017;1:18–28. [In Russ.].
19. Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Romashko V.G., Voronov Ar.Yu. Comparative Assessment of the Performance of Excavator-Truck Complexes in Open-Pit Mines During the Summer and Transition Seasons. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021;2:11–16. [In Russ.].
20. Voronov Yu.E., Khoreshok A.A., Voronov An.Yu., Stenina N.A., Voronov Ar.Yu. A Functional Criterion for the Quality of Operation of an Open-Pit Excavator-Truck Complex. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2019;3:54–60. [In Russ.].
21. Official website of the AnyLogic program: [Electronic resource]. – URL: <http://www.anylogic.ru> (accessed May 31, 2026)
22. Shcherbakov S.M. Simulation Modeling of Economic Processes in the Arena System: A Textbook. *Rostov State University of Economics (RINH) Publishing House*. – Rostov-on-Don, 2012. – 128 pp. [In Russ.].
23. Alsova O.K. Simulation Modeling of Systems in the ExtendSim Environment: A Textbook. *Novosibirsk: NSTU Press*, 2016. – 104 pp. [In Russ.].
24. Kozlova O.Yu. Experience in the Application and Prospects for the Development of Simulation Modeling in Mining. *Coal*. 2022;5:42–45. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-42-45 [In Russ.].
25. Official website of the GPSS World program: [Electronic resource]. – URL: <http://www.elina-computer.ru> (accessed May 31, 2026)
26. Klebenov B.I., Aksenov K.A., Antonova A.S., Panteleeva Yu.S., Krymov E.A. Application of the Plant Simulation System for Modeling and Optimizing Logistics Processes. *Contemporary Problems of Science and Education*. 2014;5. [In Russ.].
27. Official website of the Simio program: [Electronic resource]. – URL: www.simio.com (accessed May 31, 2026)
28. Simulation of Queuing Systems Using the Matlab/Simulink Toolkit: Methodological Guidelines / compiled by V.V. Izvozchikova. *Orenburg State University Publishing House*. – 2021. – 53 pp. [In Russ.].



29. Certificate of Registration for Computer Program № 2022660098 “GPSS World Core” / V. V. Devyatkov, T. V. Devyatkov, M. V. Fedotov, Sh. D. Khaibullin; copyright holder: Elina-Computer LLC. – Application № 2022619474, filed May 25, 2022; published May 30, 2022] [In Russ.].
30. Voronov A.Yu. Optimization of the Operational Productivity of Excavator-Truck Systems in Open-Pit Mines: Ph.D. thesis in Technical Sciences: 05.05.06, 05.13.18 / Kuzbass State Technical University. Kemerovo, 2015. – 195 pp. [In Russ.].
31. Kuznetsov I.S. Optimization of Parameters for Open-Pit Excavator-Truck Systems Taking into Account Unscheduled Downtime: Ph.D. thesis in Technical Sciences: 05.05.06 – Federal Research Center for Mining and Coal-Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kuzbass State Technical University. – Kemerovo, 2022. – 169 pp. [In Russ.].
32. Stepin D.V. Prospects for the Development of Autonomous Heavy-Duty Platforms for Unmanned Mineral Extraction. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;6(146):3-8. [In Russ.].
33. Devyatkov V.V. The Evolution of Simulation Modeling – From “Art and Science” to Widespread Application. *Simulation Modeling. Theory and the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and Its Application in Science and Industry*. – 2017. – pp. 27-36. [In Russ.].
34. Konyukh V.L., Zinoviev V.V. Discrete-Event Modeling of Underground Mining Operations. *Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011. – 243 pp. [In Russ.].
35. Starodubov A.N., Zinoviev V.V., Beresnev M.V. Simulation Modeling System for Tunneling Operations. *Coal*. 2016;2:20-24. [In Russ.].
36. Starodubov A.N., Zinoviev V.V. A Methodology for Improving the Speed and Reliability of Decision-Making in the Design of Mining Operations under Complex Mining-Geological Conditions. *Coal*. 2025;10:99-106. [In Russ.].
37. Yatskiv, I.V. The Problem of Validating a Simulation Model and Its Possible Solutions. *Simulation Modeling: Theory and Practice: Proceedings of the First All-Russian Scientific and Practical Conference IMMOD-2003. Vol. 1*. St. Petersburg: TsNIITS. 2003. – pp. 211-217. [In Russ.].

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Vasily V. Zinoviev, PhD (Eng.), Leading Researcher; Associate Professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing System
e-mail: zv150671@gmail.com

Igor S. Kuznetsov, PhD (Eng.), Senior Researcher; Associate Professor of the Department of Open Pit Mining
e-mail: is150794@mail.ru

Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 Sovetskiy Ave., Kemerovo, 650000, Russian Federation

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

