

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»

На правах рукописи

Кузнецов Игорь Сергеевич



**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРНЫХ
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
С УЧЕТОМ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Зиновьев Василий Валентинович

Кемерово 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Проблемы выбора рациональных параметров карьерных ЭАК	10
1.2 Обзор, анализ состояния и тенденций развития методов математического моделирования и оптимизации параметров карьерных ЭАК.....	22
1.3 Выводы по главе.....	30
2 РАЗРАБОТКА АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭАК С УЧЕТОМ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ .	31
2.1 Анализ и систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов	31
2.2.1 Идентификация законов распределения периодичности и продолжительности внеплановых простоев	36
2.2 Разработка аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК55	
2.2.1 Программная реализация концептуальной аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК.....	72
2.2.2 Оценка адекватности аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК	85
2.3 Оценка степени влияния внеплановых простоев на добычу забоя угольного разреза	96
2.4 Выводы по главе.....	98
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭАК	99
3.1 Оценка степени влияния предложений по минимизации внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов на эксплуатационную производительность ЭАК.....	99
3.2 Исследование характера влияния периодичности и продолжительности внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК ..	102

3.3	Разработка критерия оценки влияния периодичности и продолжительности внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК.....	105
3.4	Ранжирование степени влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК.....	107
3.5	Выводы по главе.....	111
4	РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО–МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭАК С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ И ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРИРОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИЧИН И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОСТОЕВ	113
4.1	Определение целевых функций и ограничений при оптимизации параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев	113
4.2	Разработка программно-методического обеспечения для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев.....	121
4.3	Оптимизация параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев на примере вскрышных забоев угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество»	137
4.4	Выводы по главе.....	146
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	164
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	165
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	166
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	167
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Объем угля, извлекаемый открытым способом, составляет 74% от всей добычи в Российской Федерации [1]. Важной остается проблема повышения эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК), на которую влияют параметры горных машин, взаимодействующих во времени и пространстве, а также внеплановые простои, которые могут занимать до 57% рабочего времени, что приводит к временному прекращению работ и как следствие снижению производительности [2-6].

Степень разработанности. Обоснованию, моделированию и оптимизации ЭАК посвящены работы многих ученых, таких как: К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, К.Ю. Анистратов, В.И. Суханов, В.В. Ржевский, А.А. Хорешок, А.С. Морин, Г.Д. Буялич, А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, Б.Л. Герике, Ю.Е. Воронов, В.С. Квагинидзе, А.Ю. Захаров, А.С. Фурман, А.Г. Журавлев, Д.А. Кузиев, О.Н. Вусейкова, А.Ю. Воронов, Д.В. Стенин, В.В. Макаров, Ю.В. Стенин, а также А. Krause, С. Н. Та, S. Alarie, C. Burt, M. M. Vemba, W. Cox, T. French, M. Reynolds, L. While и других.

Анализ исследований и разработок этих авторов позволил выявить следующее:

- недостаточно детально учитывается влияние причин и продолжительности простоев на эффективность работы ЭАК, что приводит к искаженным оценкам при выборе оптимальных параметров ЭАК;
- не в полной мере учитывается вероятностное взаимодействие экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве, что не позволяет избежать ошибок в планировании организации работ и приводит к несоответствию расчетной (плановой) и фактической величин производительности ЭАК;
- отсутствует учет влияния на эксплуатационную производительность ЭАК возможных альтернативных вариантов комбинирования параметров горных машин, при этом возможный пропуск рационального варианта приводит к необоснованной трате ресурсов при ведении открытых горных работ;

- не решена задача многофакторной многокритериальной оптимизации параметров ЭАК с одновременным повышением производительности при минимизации стоимости работ.

В связи с этим работа, направленная на оптимизацию параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев, исключая вышеприведенные недостатки, является актуальной.

Диссертация выполнена при финансовой поддержке РФФИ №19-37-90031 (2019-2021).

Целью работы является оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев для повышения эффективности открытых горных работ.

Идея работы заключается в совместном использовании эволюционного алгоритма и аналитико-имитационного моделирования технологических процессов для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса.

Объект исследования: экскаваторно-автомобильный комплекс для открытых горных работ.

Предмет исследования: параметры работы экскаваторно-автомобильного комплекса, зависящие от горнотехнических условий эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить взаимосвязанные задачи:

1. Разработать аналитико-имитационную модель функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев.
2. Определить степень влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК.
3. Разработать программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев.

Методы исследований:

- анализ и обобщение литературных источников по проблематике исследований;

- методы математического моделирования, включая теорию массового обслуживания, дискретно-событийное имитационное моделирование, эвристическую многофакторную оптимизацию при построении и анализе оптимизационной модели ЭАК;

- методы математической статистики и теории вероятностей при анализе причин и продолжительности простоев оборудования ЭАК;

- пассивные методы экспериментальных исследований при мониторинге использования оборудования ЭАК;

- объектно-ориентированное программирование при анализе результатов оптимизированных параметров работы ЭАК.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Внеплановые простои, характеризующиеся периодичностью и продолжительностью, подчиняющимися гамма-распределению, уменьшают суточную добычу угля в забое по сравнению с плановой добычей в среднем на 17,2% при доверительной вероятности 95,0%.

2. Критерий оценки влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК (K_i) позволяет выявлять наиболее значимые по периодичности возникновения и продолжительности внеплановые простои экскаваторов и автосамосвалов и учитывать их вклад при оптимизации параметров ЭАК.

3. Оптимальные параметры ЭАК определяются применением эволюционного алгоритма с оценкой эксплуатационной производительности ЭАК и удельных затрат на погрузку и транспортирование горной массы посредством аналитико-имитационного моделирования совместной работы экскаваторов и автосамосвалов с учетом их внеплановых простоев.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК, отличающейся учетом в сети массового обслуживания (СеМО) задержек заявок

в приборах обслуживания, равных величине внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов;

- разработке критерия оценки влияния внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов K_i , который является средним значением между коэффициентами детерминации периодичности возникновения простоя и его продолжительности;

- постановке и решении общей задачи многофакторной многокритериальной оптимизации параметров ЭАК с использованием программно-методического обеспечения, основанного на эволюционной оптимизации и аналитико-имитационном моделировании функционирования ЭАК с учетом динамики и вероятностной природы технологических процессов, а также внеплановых простоев.

Достоверность подтверждается применением апробированных классических методов аналитико-имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и оптимизации, планирования экспериментов; сходимость результатов моделирования с фактическими показателями работы угольных разрезов Кузбасса для одних и тех же условий эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии неклассических методов эволюционной оптимизации параметров ЭАК с учётом влияния внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов посредством аналитико-имитационного моделирования технологических процессов.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход, реализованный в виде программно-методического обеспечения для выбора оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев, может быть использован в организациях и институтах, занимающихся проектированием открытых горных работ, а также при обучении студентов горных специальностей.

Личный вклад автора заключается в:

- систематизации простоев экскаваторов и автосамосвалов с установлением законов их распределения;

- разработке аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин в виде замкнутой сети массового обслуживания;
- разработке критерия значимости влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК;
- разработке программно-методического обеспечения для выбора оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин;
- проведении вычислительных экспериментов по оценке влияния учета внеплановых простоев карьерных экскаваторов и автосамосвалов на суточную эксплуатационную производительность ЭАК, с последующей оценкой эффективности мероприятий по их минимизации;
- определении оптимальных параметров ЭАК на примере условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество».

Реализация выводов и результатов работы:

1. Созданы специализированные системы поддержки принятия решений: «Система имитационного моделирования для оптимизации параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом вероятностных простоев» (свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022619692 от 16.06.2022) и «Компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии» (свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021663272 от 13.08.2021).
2. Разработана «Методика оптимизации карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев», принятая к использованию Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» и рекомендованная к реализации в проектных организациях и на угольных разрезах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научно-практических конференциях: «Развитие» (г. Кемерово, 2017-2021 гг.); «Россия молодая» (г. Кемерово, 2018-2021 гг.); «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2017-2021 гг.); «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и

автотранспорте» (г. Кемерово, 2018-2020 гг.); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» «СИБРЕСУРС» (г. Кемерово, 2018 г.); «Имитационное моделирование. Теория и практика» (г. Екатеринбург, 2019 г., Санкт-Петербург, 2021 г.); «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 – в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 – в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus. Получено 2 свидетельства о гос. регистрации программы на ЭВМ.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа изложена на 169 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 116 наименований, содержит 68 рисунков, 60 формул, 30 таблиц и 6 приложений.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблемы выбора рациональных параметров карьерных ЭАК

В Российской Федерации объем добытого угля открытым способом занимает лидирующее положение (на 2021 год объем добычи достиг 325,4 млн. тонн), что составляет 74,2% от общего объема добычи этого твердого полезного ископаемого [1]. Основными операциями на горнодобывающих предприятиях, занимающихся открытым способом, являются погрузка и транспортирование горных пород (угля и вскрышной породы), которые выполняются с применением карьерных одноковшовых экскаваторов цикличного действия и автосамосвалов [3, 7, 8].

Эффективность работы ЭАК зависит от множества параметров горных машин, которые эксплуатируются в конкретных условиях при разработке горных пород, обладающих конкретными физико-механическими свойствами (таблица 1.1) [2, 7-11].

Как правило, для определения эффективности работы ЭАК в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации при разработке горных масс, обладающих конкретными физико-механическими свойствами, оперируют рабочими и технологическими параметрами экскаваторов, а также основными конструкторско-технологическими параметрами автосамосвалов.

Основными рабочими параметрами экскаваторов являются: радиус, высота черпания и разгрузки, глубина копания. К технологическим параметрам экскаваторов относят вместимость ковша [9, 12].

К основным конструкторско-технологическим параметрам автосамосвалов относят: грузоподъемность, масса тары, габариты (длина, ширина, высота), минимальный радиус поворота автосамосвала, [10, 12].

Таблица 1.1 – Параметры ЭАК

Группа параметров	Параметр	Обозначение	Единица измерения
1	2	3	4
Множество параметров горных машин (R_{gt})	Вместимость ковша экскаватора	$E_{экс}$	м ³
	Максимальная высота черпания экскаватора	$H_{ч.мах}$	м
	Максимальная высота разгрузки	$H_{разг.мах}$	м
	Максимальный радиус черпания экскаватора	$R_{ч.мах}$	м
	Грузоподъемность автосамосвала	$q_{мах}$	т
	Вес тары	q_{AC}	т
	Минимальный радиус поворота	r_{AC}	м
	Габариты автосамосвала (длина, ширина, высота)	ABC_{AC}	м
	Вместимость кузова автосамосвала	E_{ac}	м ³
Множество параметров ЭАК (R_{EAK})	Продолжительность погрузки автосамосвала	$t_{погр.}$	сек.
	Число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала	N_k	шт.
	Продолжительность рейса автосамосвалов	$t_{рейс.}$	сек.
	Количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором	$N_{ac.}$	шт.
	Коэффициент использования экскаватора	$k_{экс.}$	-
	Коэффициент использования автосамосвалов	$k_{ac.}$	-
Множество параметров физико-механических свойств горной массы (R_{fm})	Коэффициент разрыхления горной массы	$k_{зм.}$	-
	Плотность горной массы	$\rho_{зм.}$	т/м ³

1	2	3	4
Множество параметров горнотехнических условий эксплуатации (R_{gt})	Дальность транспортирования горной массы	S	м
	Средневзвешенный продольный уклон участков трассы	i_j	‰
	Коэффициент наполнения ковша экскаватора	$k_{н.к}$	-
	Тип экскаваторной заходки	$T_{заход.экс.}$	-
	Длина участков трассы	l_j	М
	Длина блока развала взорванной горной массы	l_{pzn}	м
	Высота уступа	h_{pzn}	м
	Ширина блока развала взорванной горной массы	a_{pzn}	м
	Ширина рабочей площадки	III_{pn}	м
	Схема подъезда к экскаватору	n_i	-
	Радиус кривизны участков трассы	R_j	м
	Угол поворота экскаватора	β	град.
	Соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куска взорванной горной массы	C_k	-
	Схема подъезда автосамосвалов к экскаватору	$n_{м.экс}$	-
Множество параметров горнотехнических условий эксплуатации (R_{gt})	Количество одновременно разгружающихся автосамосвалов в пункте разгрузки	$n_{м.разг.}$	-
	Угол откоса уступа	$\varphi_{отк.уст.}$	град.
	Радиус поворота автосамосвала	$R_{ман.разг.}$	м
	Средний размер взорванной горной массы	$d_{фр.}$	М
	Максимально допустимая средняя техническая скорость движения автосамосвалов на участках трассы	$V_{мах}$	м/с
	Расстояние между осевыми линиями автодорог для груженых и порожних автосамосвалов	$L_{ос.дор.}$	м
	Длина маневрового пути груженого и порожнего автосамосвала	$L_{ман.}$	м
	Средняя скорость маневров при маневрировании автосамосвала под разгрузку	$V_{ман.разг.}$	м/с
	Расстояние от забоя до промплощадки	$S_{заб.пром.}$	М
	Расстояние от пункта разгрузки до промплощадки	$S_{разг.пром.}$	м
	Ширина экскаваторной заходки	$A_{заход.экс.}$	м
	Коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала	k_{qAC}	-

Анализ литературных источников показал, что параметры экскаваторов выбирают исходя из физико-механических свойств разрушаемого массива, высоты уступа, длины и ширины блока развала взорванных горных масс, размера фракции и объема горной массы после проведения буровзрывных работ (БВР) [8, 13].

При выборе автосамосвалов и их количества, закрепляемых за экскаватором, как правило, используют классическое соотношение таких параметров как вместимость ковша ($E_{экс}$) и вместимость кузова автосамосвала ($E_{ас}$), т.е. ($E_{экс} / E_{ас}$) [14]. Авторы утверждают, что для полной загрузки автосамосвала необходимо 3-6 ковшей, но эта тенденция начинает меняться в связи с созданием новых карьерных экскаваторов и автосамосвалов [14, 15].

В зависимости от дальности транспортирования рекомендации по количеству разгружаемых ковшей значительно разнятся. Например, считается, что при дальности транспортирования до 1,5 км достаточно 4-6 ковшей, при дальности до 5 км – 6-10 ковшей, а свыше 5 км – 8-10 ковшей [9, 16].

Для расчета параметров ЭАК используют аналитические формулы, учитывающие продолжительность погрузки экскаваторов, параметры развала горных масс (высота, длина, ширина), скорость движения автосамосвалов, коэффициент использования автосамосвалов, средний размер взорванной горной массы, угол поворота экскаватора и т.д. [14, 17-20].

При расчете времени цикла автосамосвала, рекомендуемое время нахождения их в очереди на погрузку к экскаватору, а также коэффициент использования грузоподъемности автосамосвалов и наполнения ковша экскаватора, разнятся по причине различных условий эксплуатации, состояния горных машин, рекомендаций исследователей, и, в итоге, либо используются крайние значения, либо они усредняются [11, 14, 17, 20, 21].

Современный рынок одноковшовых экскаваторов механических / гидравлических лопат (исключая драглайны) цикличного действия прямого / обратного исполнения ковша, включает в себя множество моделей отечественного и зарубежного производства, например, ЭКГ (Россия), Komatsu (Япония), Hitachi

(Япония), WK (Китай), Liebherr (Германия), P&H (США), Caterpillar (США) и другие с вместимостью ковшей от 5 до 49 м³, применяемых на угольных разрезах не только Кузбасса, но и на других субъектах РФ в основном для погрузки вскрышных пород (54 модели), а также и для погрузки угля с вместимостью ковшей от 5 до 11 м³ (14 моделей), (Рисунок 1.1.) [17, 22-24].



А



Б



В



Г

А – ЭКГ-12; Б - Komatsu - PC-3000; В - Hitachi -EX-1900; Г - P&H 4100 XPC
Рисунок 1.1 – Примеры моделей карьерных одноковшовых экскаваторов

Рынок карьерных автосамосвалов (исключая шарнирно-сочлененные), также включает в себя множество моделей, в большинстве зарубежного производства, например, БелАЗ (Беларусь), Komatsu (Япония), Liebherr (Германия), Caterpillar (США) и другие, с грузоподъемностью от 30 до 450 тонн, применяемых на угольных разрезах не только Кузбасса, но и на других субъектах РФ для транспортирования вскрышных пород (38 моделей) и для транспортирования

угля, грузоподъемностью от 45 до 130 тонн (10 моделей), (Рисунок 1.2) [17, 23, 25].



А



Б



В



Г

А - БелАЗ-7513; Б - Komatsu HD 785-7; В - Caterpillar - 773Е; Г - Liebherr T252

Рисунок 1.2 – Карьерные автосамосвалы

Вследствие возможности применения различного набора карьерных экскаваторов и автосамосвалов с разными характеристиками, подходящими для одних и тех же горнотехнических условий эксплуатации и физико-механических свойств горных пород, возникает многовариантная задача выбора параметров горных машин с целью обеспечения максимальной эффективности добычных и вскрышных работ.

Эффективность ЭАК возможно достигнуть при наборе автосамосвалов с одинаковыми параметрами, но при условии необходимого количества [3]. Но оптимальный состав парка работающих автосамосвалов не всегда достигим на

практике, поскольку, во-первых, на угольном разрезе может не быть в наличии требуемого количества автосамосвалов [3], а, во-вторых, автосамосвалы необходимой грузоподъемности могут не входить в состав серийного производства и для их использования необходимо осуществлять индивидуальный заказ на создание этих автосамосвалов, что требует капитальных затрат. Поэтому применяются автосамосвалы с разнородными параметрами, которые берутся в аренду с соседних участков разрезов (при их условии их закрытия) и/или покупаются исходя из размера капитала разреза, для обеспечения плановой эксплуатационной производительности участков разреза, где действуют ЭАК.

С использованием элемента комбинаторики – сочетание [26], возможно рассчитать количество вариантов комбинаций параметров горных машин разных типоразмеров для заданных условий эксплуатации при соответствующих ограничениях [27]:

$$Var = \prod_{i=1}^a C_{n_i}^{k_i}, \quad (1.1)$$

где a – количество основных видов работ, выполняемых горными машинами, [шт.]; i – номер основных видов работ (1 – погрузка, 2 – транспортирование); C – общепринятое обозначение элемента комбинаторики – сочетание; k_i – выбранное количество моделей горных машин i -го типа подходящего для конкретных горнотехнических условий эксплуатации, [шт.]; n_i – количество моделей горных машин i -го типа подходящего для конкретных горнотехнических условий эксплуатации, [шт.].

$$1 \leq k_i \leq n_i. \quad (1.2)$$

Для примера определим количество возможных вариантов комплектации горных машин и организации их работы для условий угольного разреза ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез», где разрабатываются

пласты мощностью от 6 до 30 м с углами падения от 75 до 82 градусов с III-IV категорией пород. Высота уступов находится в интервале от 5 до 15 м с углом откоса 75 градусов. Транспортирование горной породы осуществляется автосамосвалами на расстояние от 3,9 до 7,2 км.

Исходя из данных условий для выемочно-погрузочных работ из 54 моделей экскаваторов с вместимостью ковшей от 5 до 49 м³ и максимальной высотой черпания от 7,12 до 20,6 м подойдет, например, экскаватор ЭКГ-18 с объемом ковша 18 м³.

Для транспортирования вскрышной породы из 38 моделей автосамосвалов могут подойти, например, автосамосвалы БелАЗ-75306, Komatsu HD 730E и БелАЗ-75600 с грузоподъемностью 220, 186 и 360 тонн соответственно.

Подставив принятые параметры в формулу (1.1), получим, что для ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» количество вариантов сочетаний параметров горных машин составляет:

$$Var = \prod_{i=1}^2 C_{n_i}^{k_i} = (C_{54}^1 \cdot C_{38}^3) = (54 \cdot 8436) = 455544 \quad (1.3)$$

Если рассматривать все возможные модели горных машин, которые можно применить к данным горнотехническим условиям эксплуатации, то количество вариантов будет значительно больше.

Также на эффективность добычных и вскрышных работ, в значительной мере, влияют простои экскаваторов и автосамосвалов, возникающие по различным техническим (аварийным) и организационным причинам, в том числе горно-эксплуатационным и общетехническим, которые являются внеплановыми и носят вероятностный характер. Эти простои могут занимать от 3,39 до 57% рабочего времени, что приводит к снижению эффективности ЭАК и требует учета при исследовании и выборе параметров ЭАК.

Ряд исследователей [2-6] сделали попытки анализа некоторых простоев и степени их влияния на эксплуатационную производительность

автотранспортного и экскаваторного парков. Выделялись доли причин простоев в общем объеме этих простоев.

В.М. Курганов и другие исследовали структуру рабочего дня водителей автосамосвалов с указанием процента простоев автосамосвалов на ООО «Лога» при доставке вскрышных пород, выделив преимущественно лишь организационные причины внеплановых простоев, такие как: наличие сверхнормативного послеобеденного отдыха водителей, отвлечение автосамосвалов на подсыпку карьерных дорог, окончание рабочей смены раньше графика.

А.Ю. Воронов показал распределение общих внутрисменных простоев экскаваторов и автосамосвалов на разрезах «Кедровский», «Моховский», «Бачатский», «Краснобродский», «Талдинский» и «Калтанский».

В работе Ар. Ю. Воронов показал распределение простоев автосамосвалов на разрезе «Кедровский» (Рисунок 1.3).

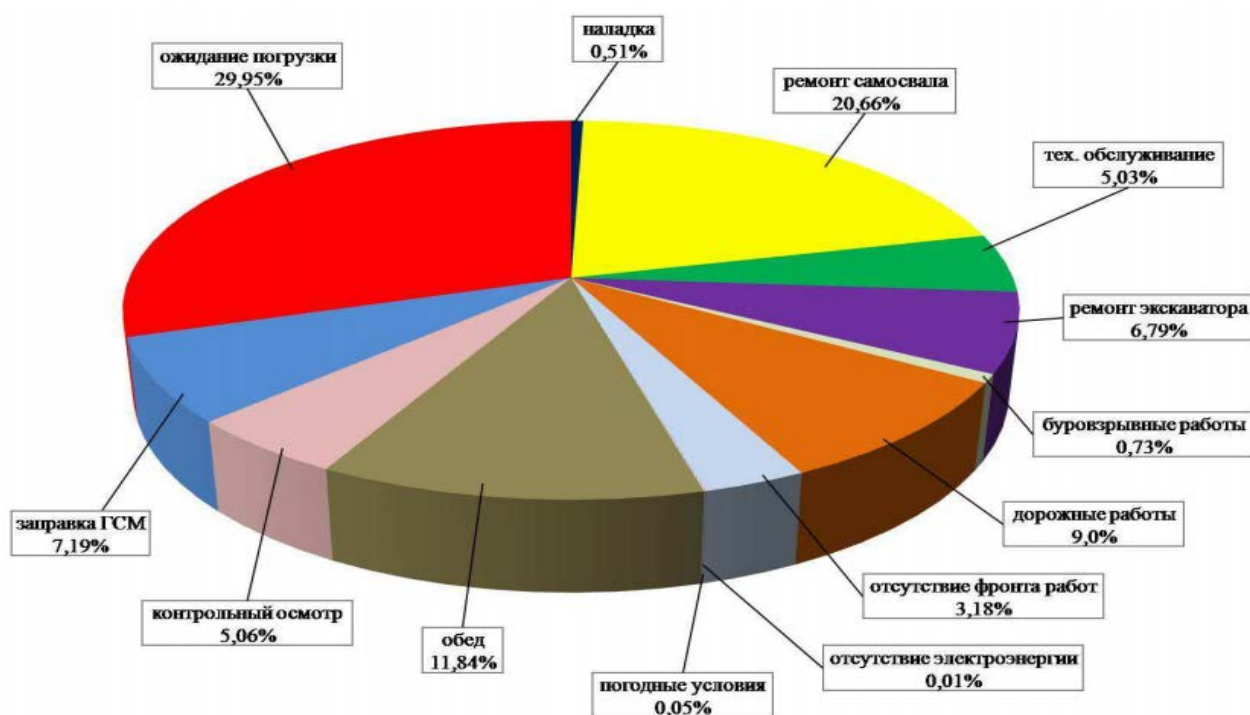


Рисунок 1.3 – Распределение простоев автотранспорта на разрезе «Кедровский» (Ар.Ю. Воронов)

В.С. Квагинидзе исследовал распределение простоев экскаваторов и авто-самосвалов, действующих в условиях Крайнего Севера (Рисунки 1.4, 1.5).

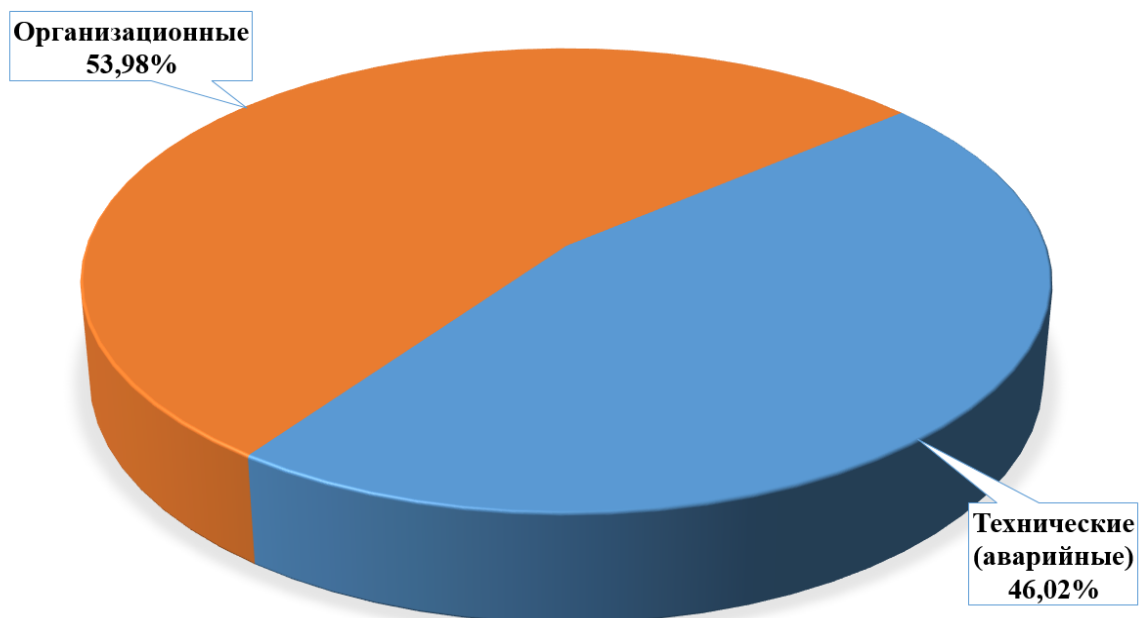


Рисунок 1.4 – Распределение внеплановых простоев экскаваторов
(В.С. Квагинидзе)

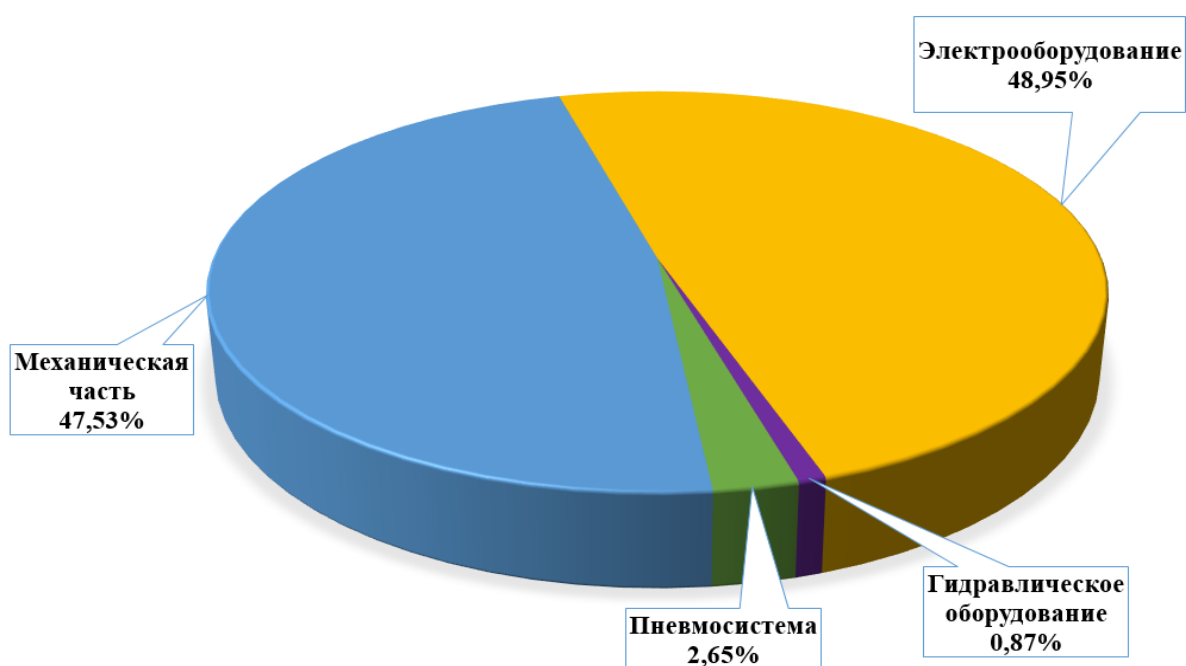


Рисунок 1.5 – Распределение технических (аварийных) простоев экскаваторов
(В.С. Квагинидзе)

П. Булес выявил влияние распределения простоев на производительность экскаваторов Komatsu PC, действующих на рудных карьерах (Рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Распределение технических (аварийных) простоев экскаваторов (П. Булес)

При проведении исследований указанные авторы определяли процент потерянного времени для конкретных единичных разрезов и конкретной статистики, но не определяли влияние причин и продолжительности всех имеющихся простоев на эксплуатационную производительность ЭАК в целом. При этом авторы не учитывали ряд простоев, таких как просадка экскаватора, очистка ковша от налипшей горной породы, отсутствие бульдозера, ремонт системы управления, ремонт системы охлаждения, ремонт бортового компьютера, ремонт грузовой платформы, ремонт автоматизированной системы контроля, отсутствие запасных частей, ремонт системы охлаждения, некачественное и/или отсутствие дизельного топлива и другие.

Таким образом, требуются дополнительные исследования, направленные на более детальный учет влияния причин и продолжительности каждого вида простоев, на эффективность работы ЭАК.

Как правило, на угледобывающих предприятиях не учитывают внеплановые простои, предполагая, что все машины действуют «идеально», либо используют коэффициент технической готовности (КТГ) [28-30].

При расчете КТГ используется усредненное значение интервалов появления и длительности ликвидации простоев горных машин. Так как значения КТГ не регламентированы ГОСТ и носят чисто субъективный характер, рассчитываются по различным методикам, например, формулы (1.4), (1.5) [29,30]. При расчетах используют рекомендованные значения от 0,7 до 0,9 [18].

$$КТГ = \frac{КФВ - T_{рем.}}{КФВ}, \quad (1.4)$$

где $КФВ$ – календарный фонд времени, ч; $T_{рем.}$ – время восстановления работоспособности оборудования, ч.

$$КТГ = \frac{T_{фкв} - T_{рем.} - T_{орг.}}{T_{фкв}}, \quad (1.5)$$

где $T_{фкв}$ – календарный фонд времени, ч; $T_{рем.}$ – время восстановления работоспособности оборудования, ч; $T_{орг.}$ – общее время организационных простоев, ч.

Внеплановые простои фиксируют по факту их появления за годовой или полугодовой период работы разреза, по окончании которого анализируют отклонение фактической и плановой добычи. Затем вносят предложения по минимизации простоев, которые применяют при дальнейшей работе. При этом уже возникшие потери объемов добычи угля (вскрышных пород) остаются невосполнимыми.

Перебор всех возможных значений параметров горных машин затрудняет использование традиционных аналитических методов для выбора их оптимальных или субоптимальных значений. Более того, оптимизация осложняется наличием внеплановых простоев и динамикой взаимодействия горных машин в составе ЭАК [2, 11, 31].

Известные методы сокращения простоев за счет повышения эффективности применяемой системы диспетчеризации карьерного автотранспорта в составе ЭАК разреза не позволяют учитывать множество простоев, не связанных с распределением автосамосвалов по пунктам погрузки, таких как технические ремонты, уборка негабаритов, очистка ковша экскаватора и кузова автосамосвала, отсутствие топлива и др. Все это в значительной степени влияет на эффективность работы ЭАК и приводит к искаженным оценкам при выборе оптимальных параметров ЭАК.

Так как последствия ошибок при проектных решениях очень дороги, необходима разработка методики и создание на ее основе программно-методического обеспечения для определения критериев эффективности каждого альтернативного комплекта значений параметров на математических моделях, отображающих функционирование экскаваторов и автосамосвалов с учетом внеплановых простоев горных машин.

1.2 Обзор, анализ состояния и тенденций развития методов математического моделирования и оптимизации параметров карьерных ЭАК

Моделированием ЭАК и оптимизацией его параметров, с применением аналитических и имитационных методов занимались многие ученые.

К.Ю. Анистратов разработал методику и экономико-математическую модель динамики затрат на владение, эксплуатацию, технический сервис каждой единицы оборудования в зависимости от изменения природно-технологических

условий разработки и надежности оборудования в течение периода планирования по критерию минимума приведенных затрат [19].

А.А. Хорешок применил методы математического моделирования для исследования взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала с точки зрения изменения эффективной производительности этих горных машин. В его работах указана необходимость отхода от принятых критериев по количеству ковшей экскаватора для полной загрузки автосамосвалов (3-6 ковшей), в связи с развитием рынка горных машин, а также необходимость ведения детализированного расчета оптимальных показателей погрузки, при максимально возможном количестве факторов влияющих на работу ЭАК [14].

А.Ю. Воронов разработал приложение имитационного моделирования и электронную базу данных горных машин для описания и оптимизации функционирования ЭАК с учётом стохастического характера процессов с применением языка программирования Visual Basic for Application (VBA) и MS Access. Созданные автором модели диспетчеризации ЭАК позволяют минимизировать простои и повышать эксплуатационную производительность карьерных экскаваторов и автосамосвалов, на основе разработанного критерия принятия решений по распределению автосамосвалов на нижнем уровне модели ЭАК с учетом приоритетности экскаваторов и соответствующих им маршрутов транспортирования горных пород [3].

А.Ю. Захаров представил способы прогнозирования производительности и выбора рационального парка техники для заданных условий [33].

О.Н. Вуейкова с применением методов линейного программирования разработала методику рационального распределения автосамосвалов по экскаваторам для разнотипной структуры парка автосамосвалов с целью снижения совокупных простоев ЭАК, разработала компьютерную программу, позволяющую формировать рациональные по структуре ЭАК, планировать показатели их работы с учетом параметров карьеров для обеспечения снижения простоев машин и повышения объемов вывезенной горнорудной массы (Рисунок 1.7) [32].

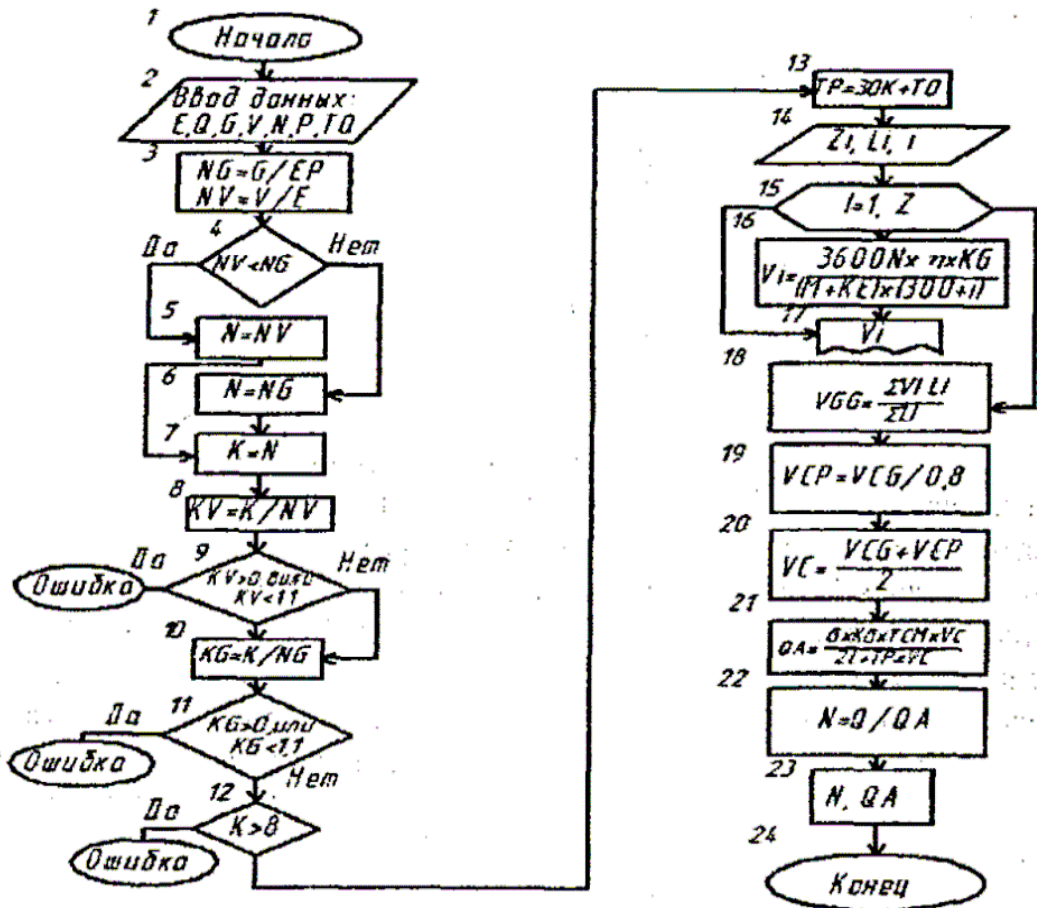


Рисунок 1.7 – Алгоритм расчета плановых показателей работы автосамосвалов (О.Н. Вуейкова)

Ю.Е. Воронов и П.А. Зыков разработали математическую модель, включающую целевую функцию и ограничения, представляемые в виде линейных уравнений регрессионного анализа, непосредственно связывающих соответствующие выходные технико-эксплуатационные показатели с оптимизируемыми параметрами карьерных одноковшовых экскаваторов [38].

Ю.Е. Воронов и А.Ю. Воронов в своей работе представили обоснование и общие принципы формирования функционального критерия, а также общую форму и варианты различных структур ЭАК для повышения эксплуатационных характеристик, качества работы, а также оптимизации основных показателей эффективности по критерию качества [39].

Д.В. Стениным создано алгоритмическое и программное обеспечение для определения оптимальной степени загрузки автосамосвалов и оптимального

сочетания погрузочно-транспортного оборудования при функционировании ЭАК [11]. Отличительной особенностью предложенной методики является учет влияния соотношения вместимости кузова автосамосвала и ковша экскаватора на годовую производительность автосамосвалов (Рисунок 1.8).

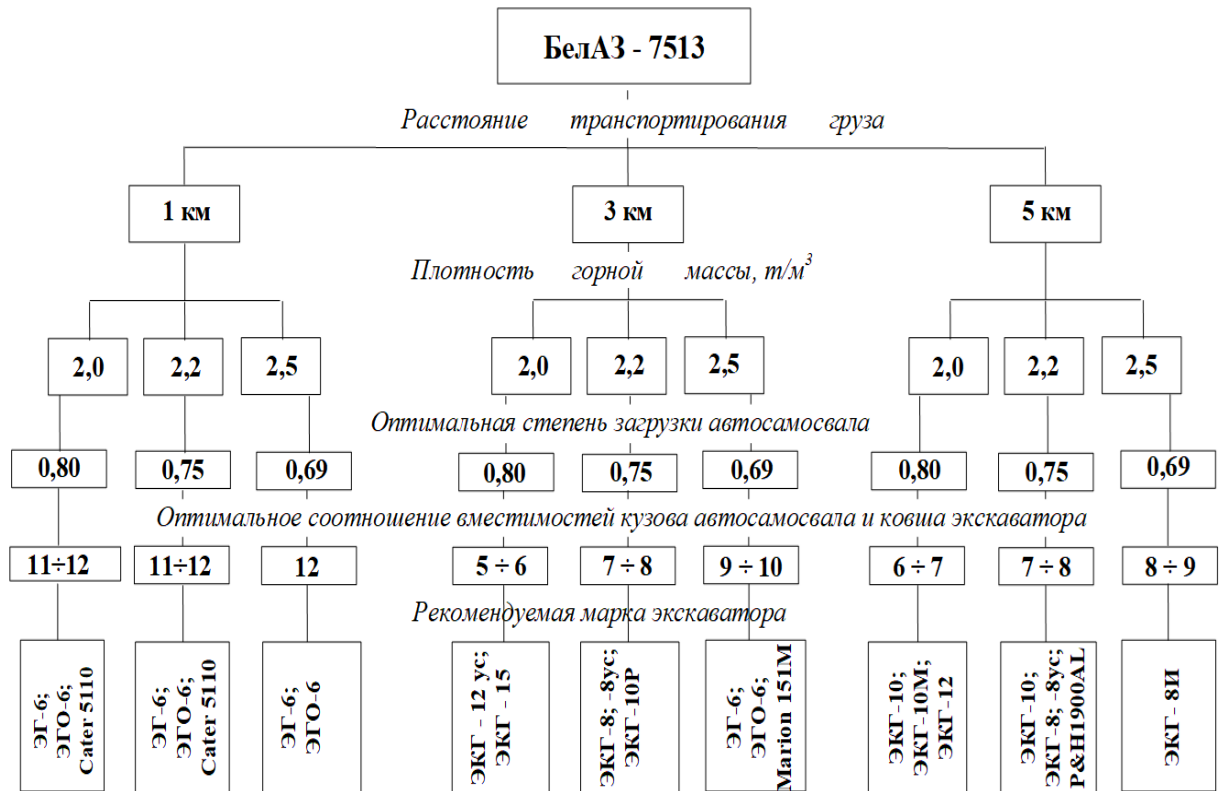


Рисунок 1.8 – Рекомендации по эксплуатации автосамосвала БелАЗ-7513 в различных условиях эксплуатации (Д.В. Стенин)

В работах А.Г. Журавлева применено компьютерное моделирование на базе собственного разработанного программного обеспечения для анализа различных вариантов комплектации ЭАК с целью технико-экономического обоснования рациональной грузоподъемности транспортных средств, (Рисунки 1.9, 1.10) [34, 35].

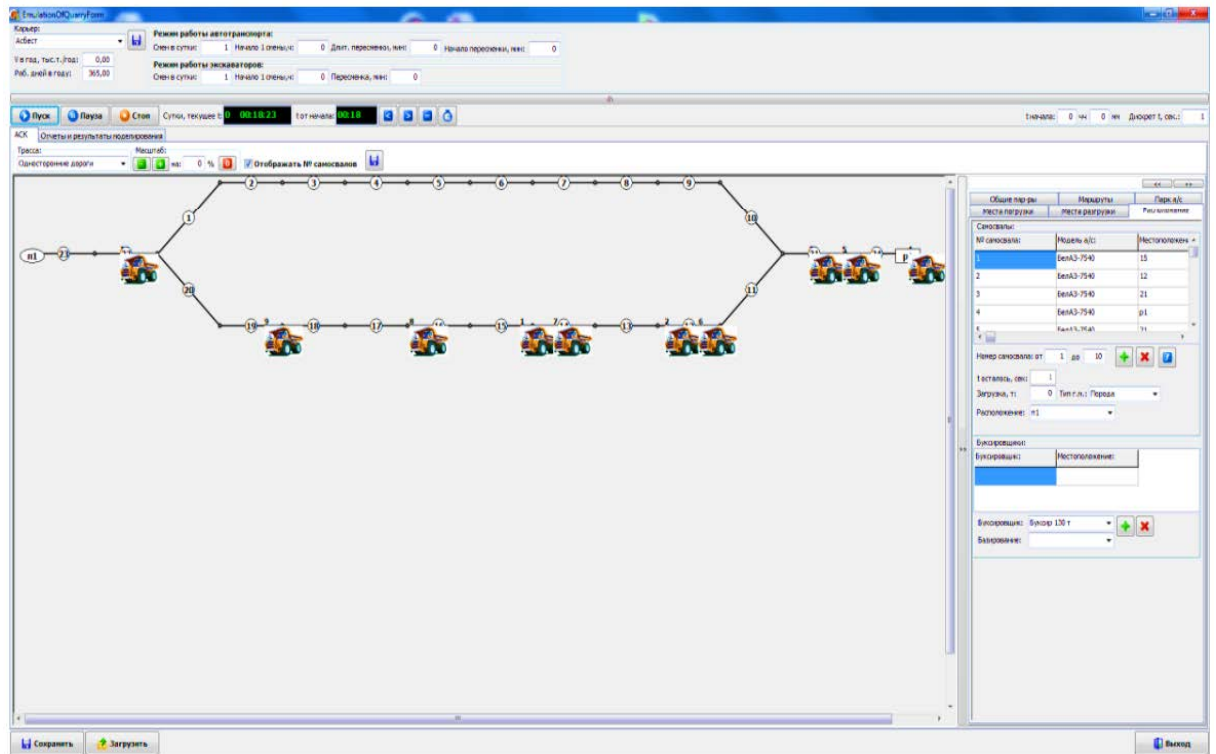


Рисунок 1.9 – Программное обеспечение для анализа различных вариантов комплектации ЭАК с кольцевой трассой (А.Г. Журавлев)

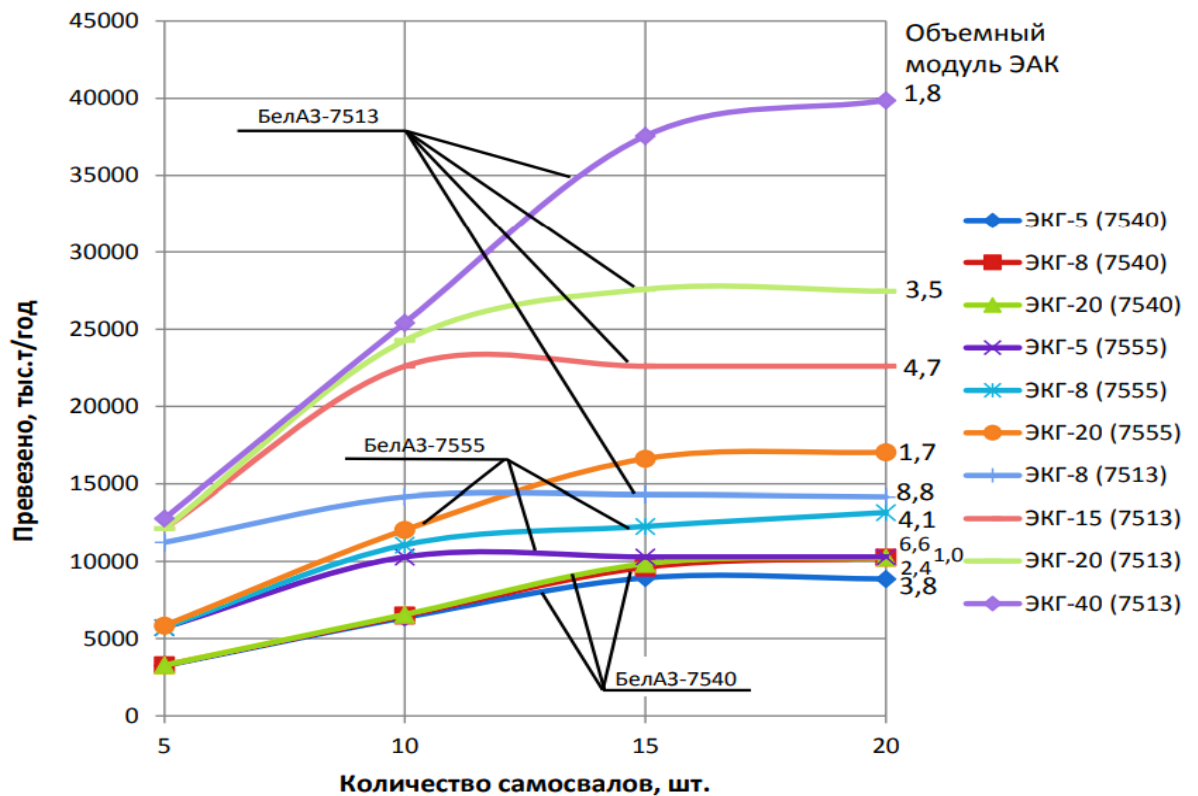


Рисунок 1.10 – Расчетная годовая производительность ЭАК (А.Г. Журавлев)

В.В. Макаровым предложена методика планирования работы ЭАК с применением эвристического подхода на базе экспертных систем, основанная на продуктивных правилах и отличающаяся учетом комплексного влияния неформализуемых параметров (Рисунок 1.11). Производительность ЭАК в данной работе определяется как сумма производительности действующих в нем автосамосвалов [36].

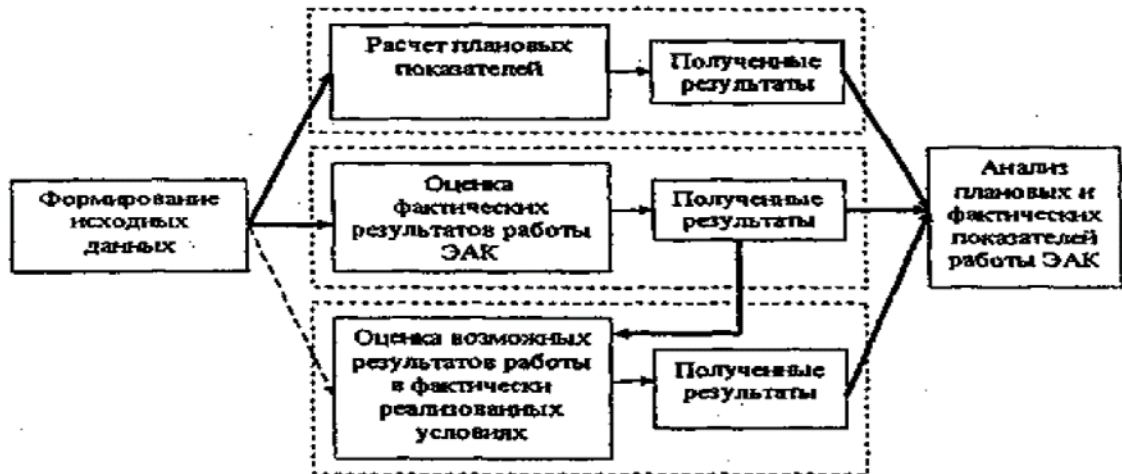


Рисунок 1.11 – Структурная блочно-аналоговая схема экспертной системы планирования работы ЭАК (В.В. Макаров)

$$P_{\kappa}^a = \sum_i \sum_j P_{a_{i,j}}, \quad (1.6)$$

где $P_{a_{i,j}}$ - сменная производительность автосамосвала j -ой модели, работающего с экскаватором на i -ой технологической схеме.

Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец и другие, используя методы математического моделирования, установили зависимости изменения скорости движения и времени рейса от дальности транспортирования горных пород. Классические формулы расчета производительности экскаватора и автосамосвалов, продолжительности рейса автосамосвала, продолжительности погрузки, использование полученных результатов расчетов позволяют спроектировать оптимальную дальность перевозки с учетом требуемого времени рейса, определить требуемое число автосамосвалов для работы того или иного экскаватора с учетом условий работы в отдельно взятом забое и т.д. [17].

$$V = 15,602 \cdot S^{0,3681}, \quad (1.7)$$

$$t = 6,9803 \cdot S^{0,6781}, \quad (1.8)$$

где V – скорость движения автосамосвалов, [км/ч]; S – дальность транспортирования, [км]; t – время рейса, [мин].

П.А. Зыков и К.О. Колупаев предложили программный комплекс, позволяющий производить выбор карьерных одноковшовых экскаваторов с оптимальными для заданных горно-геологических и технических условий параметрами, в основе которого лежит методика количественной оценки качества их функционирования (Рисунок 1.12). Авторами создана база данных экскаваторов ведущих мировых производителей, а также подпрограммы, позволяющие сравнивать характеристики машин (Рисунок 1.13) [37].

Рисунок 1.12 – Интерфейс программного комплекса
(П.А. Зыков, К.О.Колупаев)

Производитель	Страна	Веб-сайт	Типы выпускаемых экскаваторов	Количество моделей в базе	Добавить поле
BEML LIMITED (BHARAT)	Индия	www.bemlindia.com	Карьерные гидравлические	5	
BUCCYRUS INTERNATIONAL, INC.	США	www.buccyrus.com	Драглайны; Карьерные гидравлические; Карьерные механические	7	
BUMAR PHZ SP. Z O.O.	Польша	www.bumar.com	Карьерные гидравлические	3	
CASE CONSTRUCTION EQUIPMENT	Италия	www.cascece.com	Карьерные гидравлические	12	
CATERPILLAR INC.	США	www.cat.com	Карьерные гидравлические	8	
DEERE & COMPANY (JOHN DEERE)	США	www.deere.com	Карьерные гидравлические	9	
HEAVY ENGINEERING CORPORATION LTD.	Индия	www.hectd.com	Драглайны; Карьерные механические	5	
HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD.	Япония	www.hitachimr.ru	Карьерные гидравлические	9	
Модель экскаватора	Рабочее оборудование	Тип привода	Фотография	Брошюра	Добавить поле
ZX470-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3943/18316/file/ZX470-5G_KS-F		
ZX670-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3949/18347/file/ZX670-5G_KS-F		
ZX870-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3951/18354/file/ZX870-5G_KS-F		
EX 1200-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3934/18281/file/KS-EN112_EX1		
EX 1200-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3934/18281/file/KS-EN112_EX1		
EX 1900-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3935/18283/file/EX1900-6_KS-F		
EX 1900-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3935/18283/file/EX1900-6_KS-F		
EX 2600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3939/18298/file/EX2600-6_KS-F		
EX 2600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3939/18298/file/EX2600-6_KS-F		
EX 3600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3936/18285/file/EX3600-6_KS-F		
EX 3600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3936/18285/file/EX3600-6_KS-F		
EX 5600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3958/18371/file/EX5600-6_KS-F		
EX 5600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/3958/18371/file/EX5600-6_KS-F		
EX 8000-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/4080/22175/file/EX8000-6_KS-F		
EX 8000-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package www.hitachimr.ru/content/download/4080/22175/file/EX8000-6_KS-F		
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD	Юж. Корея	www.hhi.co.kr	Карьерные гидравлические	12	
KOBELCO CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD.	Япония	www.kobelco-kenki.co.jp	Карьерные гидравлические	8	
KOMATSU LTD.	Япония	www.komatsu.ru	Карьерные гидравлические	11	
LBX COMPANY, LLC (LINK-BELT)	США	www.lbxco.com	Карьерные гидравлические	8	
LIEBHERR INTERNATIONAL AG	Германия	www.liebherr.com	Карьерные гидравлические	10	
NEW HOLLAND CONSTRUCTION	Великобритания	www.newhollandconstruction.com	Карьерные гидравлические	4	
P&H MINING EQUIPMENT INC.	США	www.phmining.com	Драглайны; Карьерные механические	9	
SICHUAN BONNY HEAVY MACHINERY CO., LTD	Китай	www.bonnyhm.com	Карьерные гидравлические	3	
SINOWAY INDUSTRIAL CO., LTD	Китай	www.sinoway-sh.com	Карьерные гидравлические	5	
SUMITOMO (S.H.J.) CONSTRUCTION MACHINERY	Япония	www.sumitomokenki.com	Карьерные гидравлические	7	
TELCON CONSTRUCTION EQUIPMENT CO., LTD	Индия	www.telcon.co.in	Карьерные гидравлические	9	
TEREX CORPORATION	США	www.terex.com	Карьерные гидравлические	14	
UNEX A.S.	Чехия	www.unex.cz	Карьерные гидравлические	5	

Рисунок 1.13 – База данных карьерных экскаваторов
(П.А. Зыков, К.О. Колупаев)

А.Ю. Воронов, А.А. Хорешок, Ю.Е. Воронов и другие в своей работе на основе применения математической модели оптимизации качества функционирования ЭАК с применением симплекс-метода, установили, что соотношение интенсивности поступления автосамосвалов на погрузку и их погрузка экскаваторами должно быть минимально повышено на 25-30%. При этом соотношение численности экскаваторного и автотранспортного парков должно быть не менее 6,5. Время погрузки должно составлять 3,5-4 минуты, а продолжительность рейса автосамосвала 24-28 минут. Качество функционирования ЭАК повышается на 30-35% при дальности транспортирования 3-3,5 км [40].

Анализ исследований и разработок этих авторов позволил сделать следующие выводы:

- не достаточно детально учитываются влияние причин и продолжительности простоев на эффективность работы ЭАК, что приводит к искаженным оценкам при выборе оптимальных параметров ЭАК;

- не в полной мере учитывается вероятностное взаимодействие экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве, что не позволяет избежать ошибок в планировании организации работ и приводит к несоответствию расчетной (плановой) и фактической величин производительности ЭАК;

- отсутствует учет влияния на эксплуатационную производительность ЭАК возможных альтернативных вариантов комбинирования параметров горных машин, при этом возможный пропуск рационального варианта приводит к необоснованной трате ресурсов при ведении открытых горных работ;

- не решена задача многофакторной многокритериальной оптимизации параметров ЭАК с одновременным повышением производительности при минимизации стоимости работ.

В связи этим работа, направленная на оптимизацию параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев, включающая вышеприведенные недостатки, является актуальной.

1.3 Выводы по главе

В результате проведенного анализа сформулирована цель работы, которая заключается в повышении эксплуатационной производительности и снижении удельных затрат при работе карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев.

Для достижения поставленной цели необходимо решить взаимосвязанные **задачи:**

1. Разработать аналитико-имитационную модель функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев.

2. Определить степень влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК.

3. Разработать программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев.

2 РАЗРАБОТКА АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭАК С УЧЕТОМ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ

2.1 Анализ и систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов

Эффективность работы ЭАК зависит от его структуры и параметров горных машин, взаимодействующих во времени и пространстве. Также на эффективность работы ЭАК в значительной мере влияют простои, возникающие из-за поломок оборудования, несвоевременной доставки требуемых узлов и деталей, ожидания погрузки, отсутствием свободного автосамосвала, перегона экскаватора, заправки горючим, отсутствия транспортных средств для вывоза угля и др. Эти простои могут занимать от 3,39 до 57% рабочего времени [2-6]. Все это приводит к временному прекращению работ и, как следствие, снижению производительности, что требует учета при исследовании и выборе параметров ЭАК используемых при ведении вскрышных или добычных работ.

С целью учета известных видов простоев при моделировании функционирования ЭАК проведен анализ диспетчерских отчетов автоколонн с шести разрезов Кузбасса (Рисунки 2.1, 2.2).

1	Отчет по Ремонтам						
2	Модель	Вид ремонта	Дата начала	Дата окончания	Прод-ть	Прод-ть в часах	Причина
135	БелАЗ-75131	Ремонт	02.07.2018 07:45:00	02.07.2018 08:12:10	00:27:10	0,45	Наладка оборудования
136	БелАЗ-75131	Ремонт	02.07.2018 04:01:00	02.07.2018 07:45:00	03:44:00	3,73	Наладка оборудования
137	БелАЗ-75131	Ремонт	02.07.2018 07:45:00	02.07.2018 09:39:36	01:54:36	1,9	Наладка оборудования
138	БелАЗ-75131	Ремонт	02.07.2018 04:39:05	02.07.2018 05:33:50	00:54:45	0,9	Ремонт гидросистемы
139	БелАЗ-75131	Ремонт	02.07.2018 05:24:40	02.07.2018 05:37:29	00:12:49	0,2	Ремонт Прочие
140	БелАЗ спец	Ремонт	02.07.2018 03:24:24	02.07.2018 05:23:28	01:59:04	1,98	Ремонт гидросистемы
141	БелАЗ спец	Ремонт	02.07.2018 05:51:33	02.07.2018 07:45:00	01:53:27	1,88	Ремонт гидросистемы
142	БелАЗ спец	Ремонт	02.07.2018 07:45:00	02.07.2018 19:45:00	12:00:00	12	Ремонт гидросистемы
143	БелАЗ спец	Ремонт	02.07.2018 19:45:00	02.07.2018 20:15:00	00:30:00	0,5	Ремонт гидросистемы

Рисунок 2.1 – Диспетчерский отчет по ремонтам автосамосвалов

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Отчет по Ремонтам									
#	Модель	Техника	Смена	Вид ремонта	Дата начала	Дата окончания	Прод-ть	Прод-ть в часах	Причина
1	ЭКГ-10	ЭКГ-10 34	Смена 2	Ремонт	01.07.2018 19:45:00	02.07.2018 07:45:00	12:00:00	12	Ремонт Прочие
2	ЭКГ-10	ЭКГ-10 34	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 07:45:00	02.07.2018 08:00:09	00:15:09	0,25	Ремонт Прочие
3	ЭШ 13/50	ЭШ 13/50 145	Смена 1	Ремонт	01.07.2018 07:45:00	01.07.2018 12:00:21	04:15:21	4,25	Механическая часть
4	Volvo EC-460 BLC	Volvo EC-460 BLC 56	Смена 1	Ремонт	01.07.2018 07:45:00	01.07.2018 19:45:00	12:00:00	12	Гидравлическая часть
5	Volvo EC-460 BLC	Volvo EC-460 BLC 56	Смена 2	Ремонт	01.07.2018 19:45:00	01.07.2018 20:00:18	00:15:18	0,25	Гидравлическая часть
6	ЭКГ-18	ЭКГ-18 77	Смена 1	Ремонт	01.07.2018 14:30:45	01.07.2018 20:00:00	05:29:15	5,48	Ремонт Прочие
7	НІТАСНІ ЕХ-2500	НІТАСНІ ЕХ-2500 31	Смена 1	Ремонт	01.07.2018 08:00:00	01.07.2018 08:45:50	00:45:50	0,75	Гидравлическая часть
8	НІТАСНІ ЕХ-2500	НІТАСНІ ЕХ-2500 30	Смена 2	Ремонт	01.07.2018 21:15:02	01.07.2018 23:55:41	02:40:39	2,67	Ремонт Прочие
9	НІТАСНІ ЕХ-2500	НІТАСНІ ЕХ-2500 31	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 08:00:15	02.07.2018 13:00:00	04:59:45	4,98	Гидравлическая часть
10	ЭКГ-10	ЭКГ-10 26	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 12:00:20	02.07.2018 15:20:08	03:19:48	3,32	Механическая часть
11	Volvo EC-480	Volvo EC-480 29	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 11:27:32	02.07.2018 12:39:12	01:11:40	1,18	Гидравлическая часть
12	НІТАСНІ ЕХ-2500	НІТАСНІ ЕХ-2500 33	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 15:15:12	02.07.2018 16:15:02	00:59:50	0,98	Гидравлическая часть
13	Volvo EC-460 BLC	Volvo EC-460 BLC 56	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 13:18:32	02.07.2018 13:26:56	00:08:24	0,13	Гидравлическая часть
14	Volvo EC-460 BLC	Volvo EC-460 BLC 56	Смена 1	Ремонт	02.07.2018 13:49:10	02.07.2018 13:57:49	00:08:39	0,13	Гидравлическая часть

Рисунок 2.2 – Диспетчерский отчет по ремонтам экскаваторов

Выявлены причины простоев горных машин, которые систематизированы по признаку их возникновения на плановые, технические (аварийные) и организационные (Рисунки 2.3, 2.4).

Плановые простои, такие как наращивание высоковольтного кабеля, планово-предупредительный ремонт, подчистка подъезда бульдозером, заправка горючим, проведение буровзрывных работ, подготовка забоев, техническое обслуживание и другие, регламентированы нормативными документами, установленными для конкретных условий эксплуатации горных машин, входящих в состав ЭАК. Такие простои достаточно просто учитывают в существующих методиках и моделях.

Внеплановые простои носят случайный характер. Их можно разделить на технические (аварийные) и организационные. Технические простои возникают в результате ремонта и/или полной замены вышедших из строя исполнительных органов горных машин.

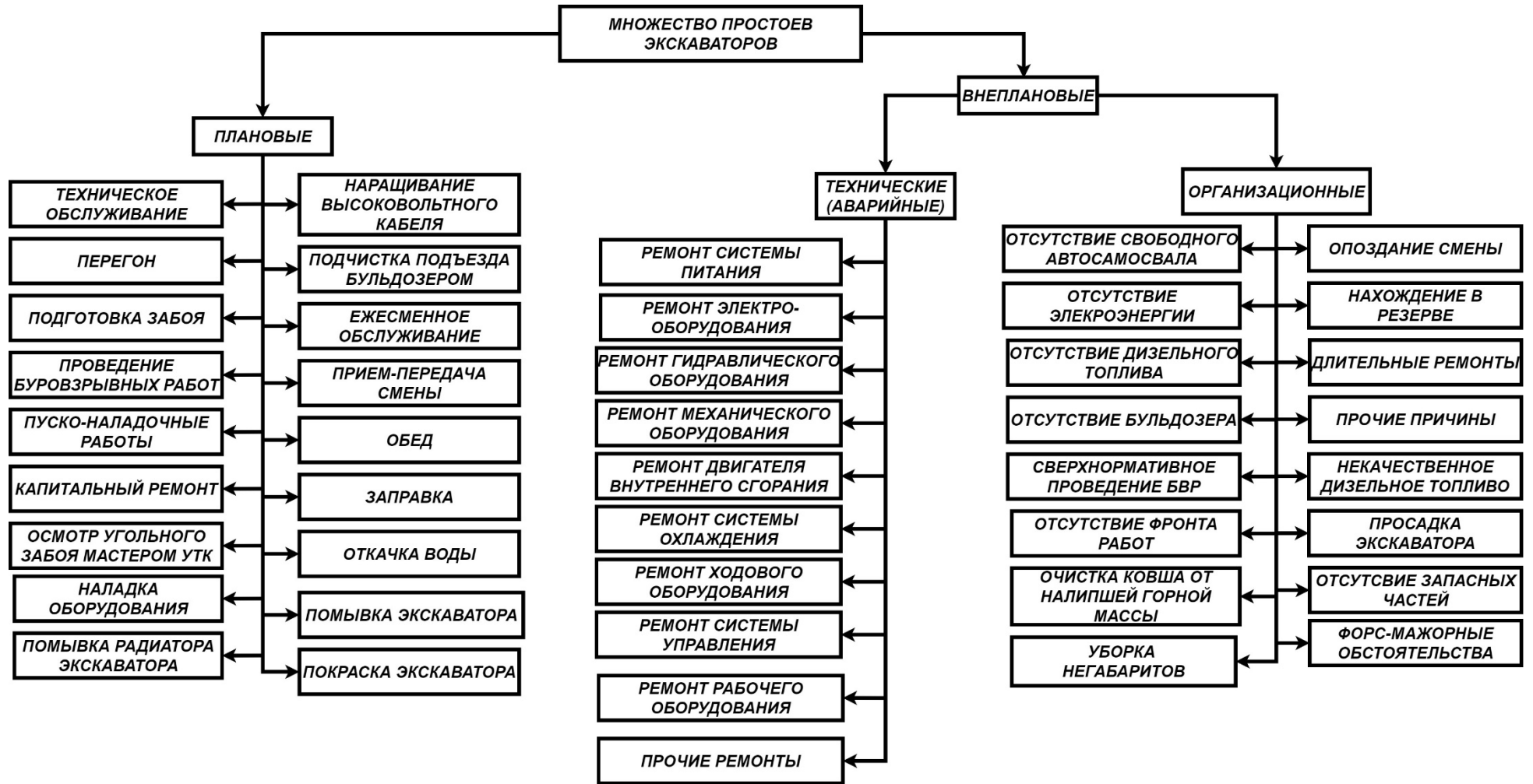


Рисунок 2.3 – Причины простоев карьерных экскаваторов

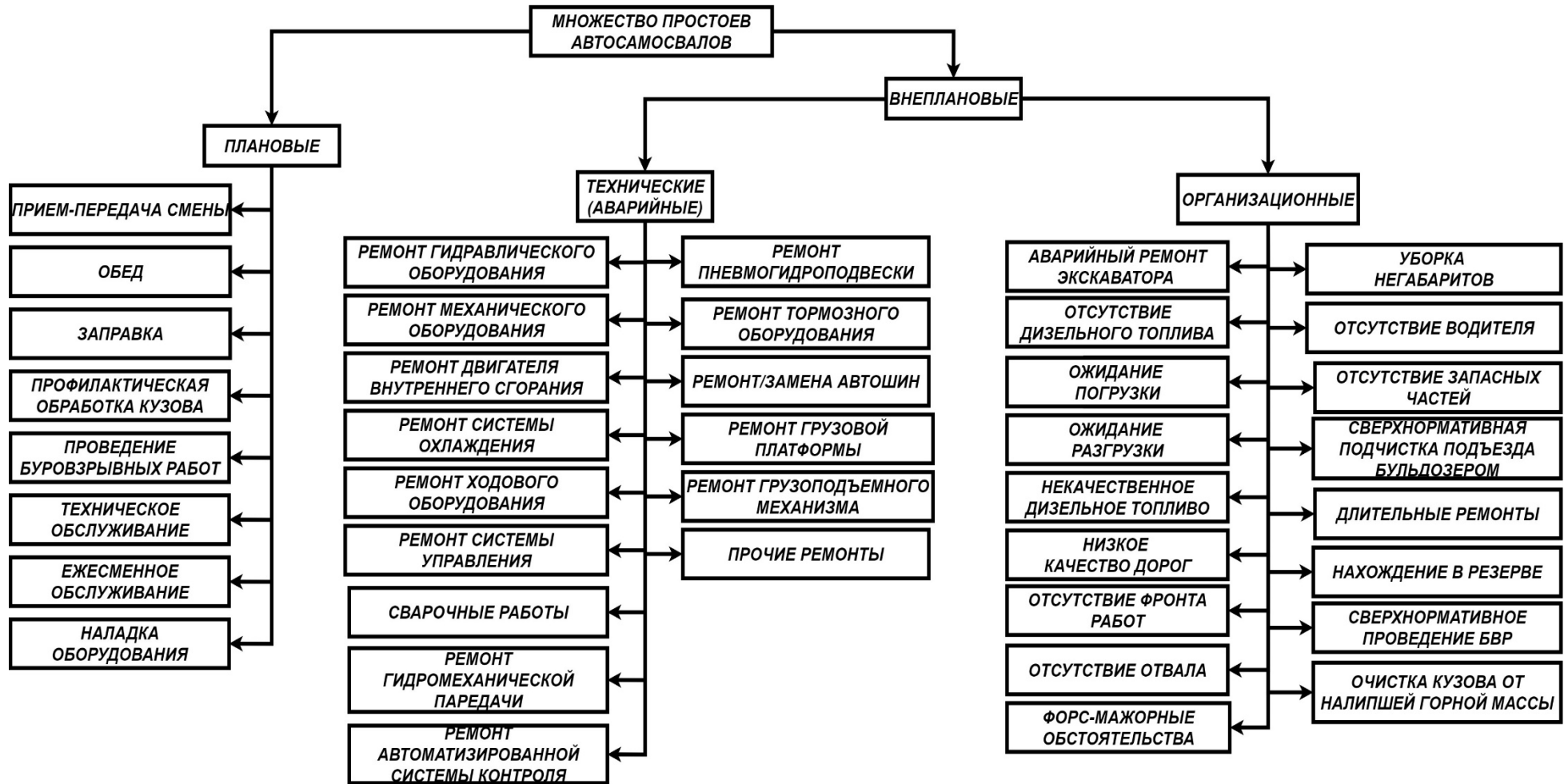


Рисунок 2.4 – Причины простоев карьерных автосамосвалов

На Рисунках 2.3, 2.4. систематизированы основные виды простоев горных машин, при этом каждый основной вид имеет свои подвиды по признаку принадлежности к типу горной машины и ее элементу отдельно взятой части (Рисунки 2.5, 2.6.)

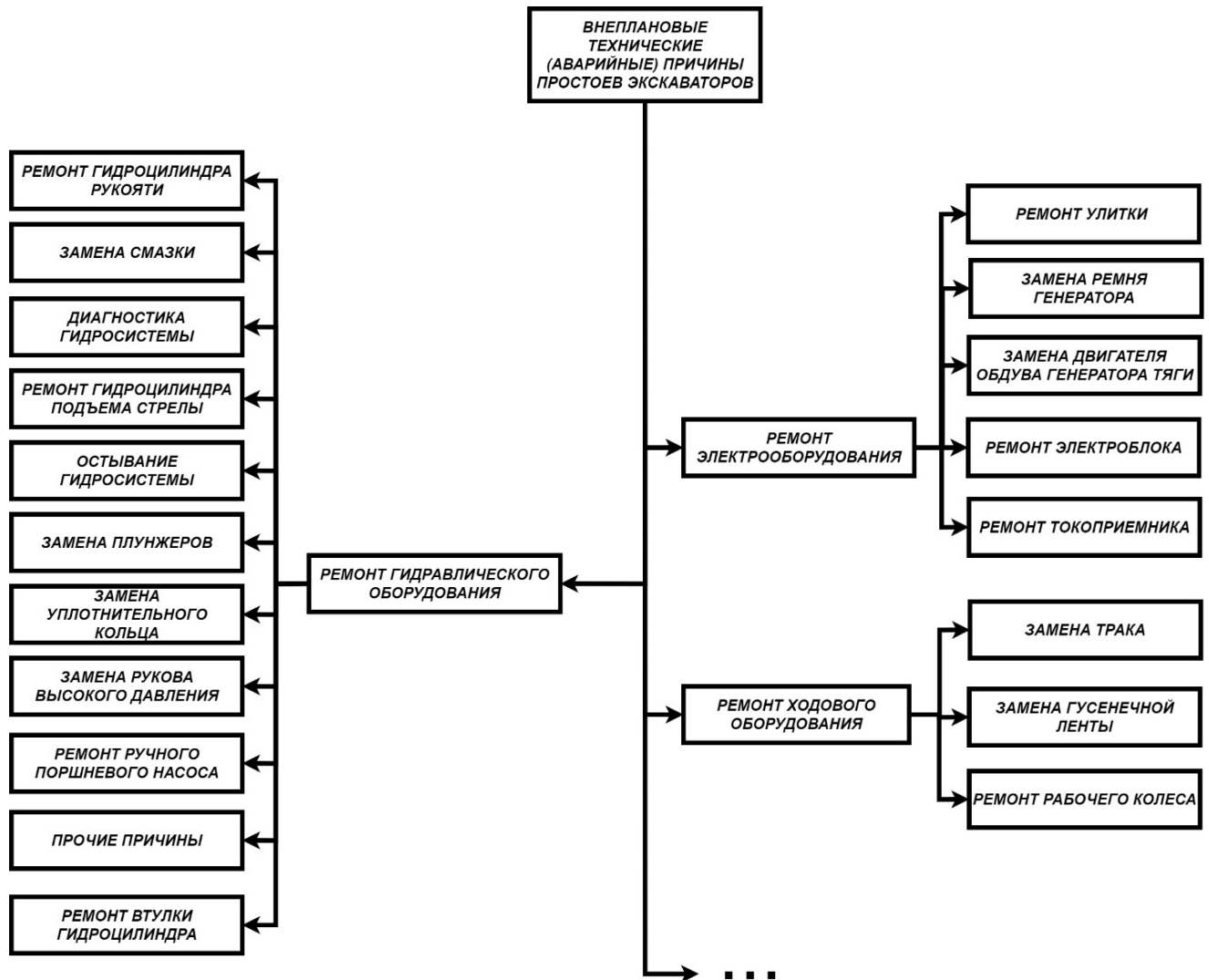


Рисунок 2.5 – Подвиды причин технических (аварийных) простоев карьерных экскаваторов

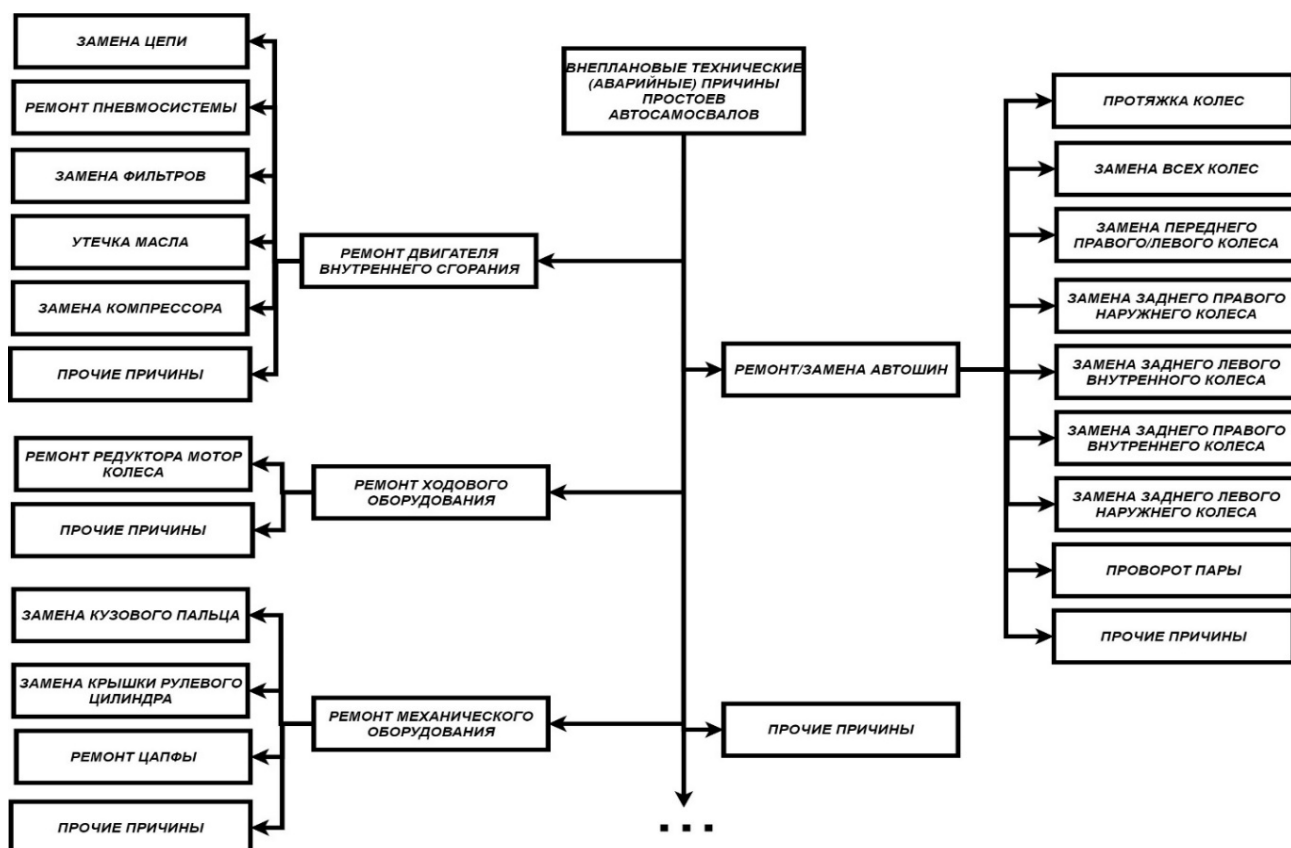


Рисунок 2.6 – Подвиды причин технических (аварийных) простоев карьерных автосамосвалов

Полная систематизированная схема, включающая в себя 151 вид простоев, представлена в Приложениях А и Б.

2.2.1 Идентификация законов распределения периодичности и продолжительности внеплановых простоев

С целью учета внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК в аналитико-имитационной модели, необходимо идентифицировать законы распределения периодичности внеплановых простоев и их продолжительности. Для этого, на основании полученных хронометражных данных согласно диспетчерским отчетам с угольных разрезов Кузбасса, были сформированы отдельные выборки по следующим условиям: во-первых, размер анализируемых выборок ($N \geq 50$), во-вторых, для каждой горной машины и причины

простая формируются свои отдельные выборки. Примеры выборок приведены в Таблицах 2.1 – 2.3.

Сформированные выборки используются как исходные данные при идентификации законов распределения внеплановых простоев, на основании которых определены средние значения, с помощью которых построены планыграммы, отображающие периодичность и продолжительность внеплановых простоев (Рисунки 2.7, 2.8).

Таблица 2.1 – Продолжительность ремонта системы управления БелАЗ-7513

№	Значение, сек
1	5280
2	6500
3	8040
....	
101	43200
Среднее	18416

Таблица 2.2 – Продолжительность ремонта гидравлического оборудования
БелАЗ-7513

№	Значение, сек
1	840
2	842
3	900
...	
259	43200
Среднее	7167,57

Таблица 2.3 – Периодичность ремонта системы управления БелАЗ-7513

№	Значение, сек.
1	1283760
2	2182860
3	3081960
...	
48	1503760
Среднее	4836825

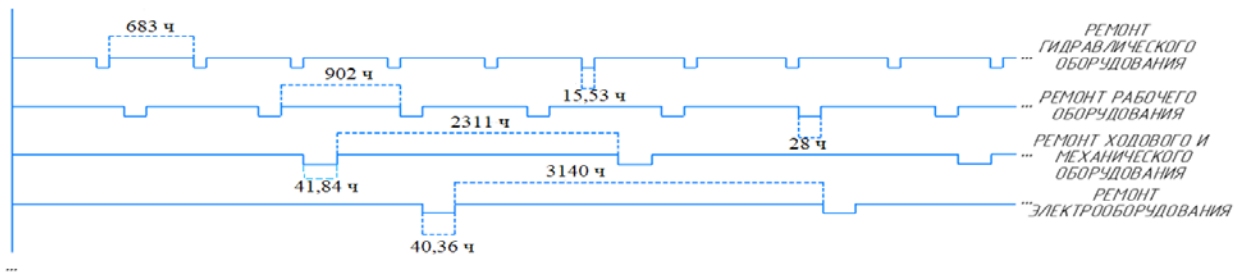


Рисунок 2.7 – Периодичность и продолжительность
внеплановых простоев экскаваторов

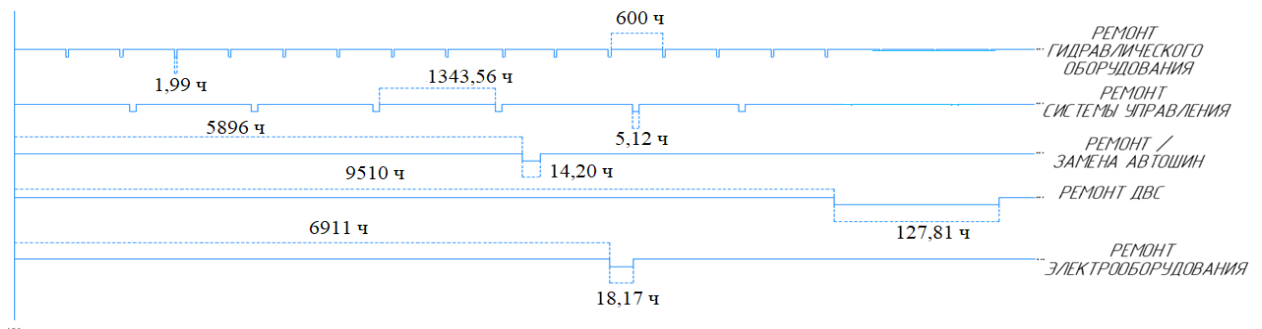


Рисунок 2.8 – Периодичность и продолжительность
внеплановых простоев автосамосвалов

Из Рисунков 2.7 и 2.8 видно, что наиболее часто возникают внеплановые простои экскаваторов и автосамосвалов, связанные с ремонтом гидравлического оборудования, при этом они имеют минимальную продолжительность в сравнении с другими простоями.

Для учета внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК в математической модели необходимо идентифицировать законы распределения временных интервалов возникновения простоев и их продолжительности. Для идентификации законов распределения применяют методы статистического анализа, которые заключаются в определении оптимальной величины интервала; разбиении выборки на интервалы с применением рассчитанной величины; построении гистограммы наблюдаемых частот; выдвижении нулевой гипотезы о предполагаемом законе распределения, исходя из вида построенной ранее гистограммы; выборе и применении статистического критерия оценки достоверности

нулевой гипотезы с учетом доверительного интервала и принятие или отклонение нулевой гипотезы [41]. Логическая блок-схема (Рисунок 2.9).

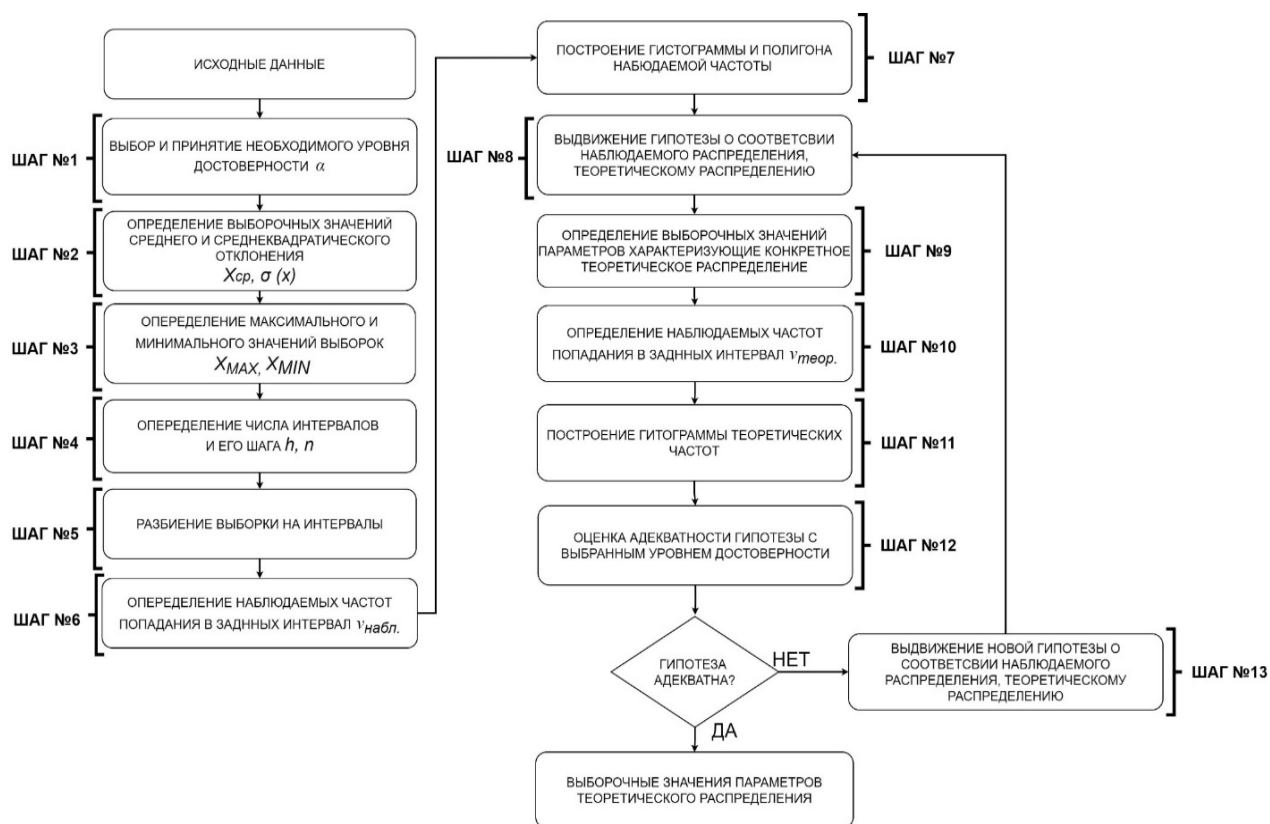


Рисунок 2.9 – Порядок действий для идентификации законов распределения периодичности и продолжительности внеплановых простоев

В качестве исходных данных выступают сформированные выборки хронометражных данных продолжительности и периодичности внеплановых простоев горных машин.

На первом шаге выбирается и принимается уровень достоверности (α) принятия или отвержения гипотезы. Как правило, используют уровень достоверности (α), принимающий значения от 0,9 до 0,99.

На втором шаге определяются выборочные значения математического ожидания, равные среднему значению ($X_{cp.}$), и среднеквадратического отклонения ($\sigma(x)$), с использованием формул [41]:

$$X_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (2.1)$$

где N – размер анализируемых выборок, [шт.]; i – номер элемента выборки; x_i – значение i -го элемента выборки.

$$\sigma(x) = \sqrt{D}, \quad (2.2)$$

где D –выборочная дисперсия.

На третьем шаге определяются минимальное и максимальное значение элементов в выборке.

На четвертом шаге определяются число групп интервалов (n) и значение шага интервала (h), с использованием формул [3,41]:

$$n = 1 + 3,222 Lg(N), \quad (2.3)$$

где N – размер анализируемых выборок, [шт.].

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{n}, \quad (2.4)$$

где $X_{\max}$ – максимальное значение в выборке; $X_{\min}$ – минимальное значение в выборке; n – рекомендуемое число групп интервалов.

На пятом шаге разбивается выборка на требуемое количество интервалов.

На шестом шаге определяются значения наблюдаемых частот, т.е. определение количества значений выборки, попадающие в заданный интервал.

На седьмом шаге строится гистограмма наблюдаемых частот.

На восьмом шаге выдвигается гипотеза о соответствии наблюдаемого распределения теоретическому распределению.

На девятом шаге определяются выборочные значения параметров, характеризующие конкретное теоретическое распределение.

На десятом шаге определяются значения теоретических частот для предполагаемого теоретического закона распределения.

На одиннадцатом шаге строится гистограмма теоретических частот.

На двенадцатом шаге осуществляется оценка адекватности гипотезы с использованием статистических критериев.

Если адекватность гипотезы подтверждается, то принимаются выборочные значения, характеризующие принятое теоретическое распределение. В противном случае, выдвигается новая гипотеза (шаг № 13) и затем шаги с 8 по 12 повторяются вновь.

Для автоматизации процесса расчетов проведения идентификации закона распределения случайных величин проведен обзор рынка программных продуктов (ПО), приведенный в Таблице 2.4 [42-48].

Таблица 2.4 – Анализ рынка программных продуктов для автоматизации процесса проведения расчётов при идентификации закона распределения случайных величин

ПО	Компания разработчик (страна), ссылка на сайт компании	Примерная стоимость лицензии, \$	Достоинства	Недостатки
SYSTAT	Systat Software Inc. (США) https://systatsoftware.com	769,04 - 1100,91	Широкие возможности для проведения анализа общей линейной статистики	Отсутствие редактора отчетов
SPSS	IBM SPSS Statistics (США) https://www.ibm.com	Договорная	Удобный графический интерфейс	Отсутствие гибкости в расчетах

Окончание таблицы 2.4

Statistica	StatSoft Inc (США) https://www.tibco.com	Договорная	Высокий спектр решаемых задач; Имеется русифицированная версия; Большое количество литературных источников	Отсутствует возможность использовать другие критерии кроме заложенных
MS Excel	Microsoft Corporation (США) https://www.microsoft.com	От 35,60	Распространенность; Простота освоения; Удобный интерфейс; Возможность использовать любые критерии	Ограниченность в функциях по анализу данных; Ограниченность на число строк в таблицах

Matlab	MathWorks (США) Mathworks.com	Бессрочная - 2350; Годовая - 940	Мощный пакет для математического анализа данных	Высокая стоимость лицензии; Требуются навыки программирования; Невозможность анализа большого количества данных
STATA	StataCorp (США) https://www.stata.com	Договорная	Широкие возможности проведения статистического анализа и управления данными; Малые затраты компьютерных ресурсов	Отсутствие возможности полноценного экспорта и импорта данных

В результате проведенного анализа в качестве программного продукта выбран MS Excel, который обладает следующими преимуществами: 1. является одним из самых распространенных продуктов для выполнения математических операций; 2. имеется большой объем литературных источников по данному продукту; 3. не требуется навыков программирования; 4. простой интерфейс; 5. возможно применить любой метод оценки адекватности нулевых гипотез и группирования данных.

Несмотря на всеобщую известность теории вероятностей и методов математической статистики, на заключительных этапах идентификации законов

распределения, хронометражных данных работы ЭАК авторы априори выбирают единственный статистический критерий оценки достоверности нулевой гипотезы, как правило, Пирсона, либо Колмогорова, либо Романовского, либо другой [2, 31, 49].

Был проведен анализ существующих критериев для оценки адекватности выдвигаемых гипотез, каждый из которых имеет свои преимущества [49-58]. При анализе учитывались условия применения, а также достоинства и недостатки. Результаты анализа представлены в Таблице 2.5.

При выборе единственного критерия проверки гипотезы о законе распределения случайной величины существует вероятность совершить ошибку первого рода, когда можно отвергнуть верную гипотезу, и второго рода, когда можно принять неверную гипотезу. Поэтому для повышения точности и достоверности выводов о законе распределения используют несколько критериев, причем их количество должно быть нечетным, т.к. один критерий может подтвердить нулевую гипотезу о законе распределения, а другой ее отвергнуть [59].

В результате проведенного анализа в качестве критериев для оценки достоверности выдвигаемых гипотез выбраны критерии: Пирсона, Колмогорова и Смирнова-Крамера-Мизеса, так как:

- критерии обладают высокой математической мощностью;
- размер выборок позволяет применить данные критерии;
- являются критериями для оценки любого вида распределения.

Для доказательства важности проверки гипотез о выборе закона распределения по нескольким статистическим критериям проведена идентификация закона распределения длительности ликвидации вероятностного технического простоя автосамосвалов марки БелАЗ-7513 – «Ремонт гидравлического оборудования» на разрезе ООО СП «Барзасское товарищество». Размер анализируемой выборки составил 259 значений (Таблица 2.2). Результаты расчетов сводятся к Таблицам 2.6–2.10 и Рисунку 2.10.

Таблица 2.5 – Критерии оценки адекватности выдвигаемых гипотез

Критерий	Формула критерия	Параметры	Условия	Достоинства	Недостатки
Пирсона	$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(v_{набл.} - v_{теор.})^2}{v_{теор.}}$	$v_{набл.}$ – наблюдаемое значение частот, попавших в заданный интервал; $v_{теор.}$ – теоретическое значение частот, попавших в заданный интервал; n – количество интервалов	$N \geq 50$	Критерий применим для любых видов распределений; Высокая математическая мощность	Смежные интервалы с частотами ≤ 5 необходимо объединять в результате снижается точность; Сильная зависимость от числа интервалов и порядок ее разбиения
Шапиро-Уилка	$W = \frac{[\sum_{i=1}^N a_{n-i-1}(x_{n-1-i} - x_i)]^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu(x))^2}$	a_{n-i-1} – затабулированный коэффициент	$8 \leq N \leq 50$	Высокая математическая мощность	Позволяет оценить выборку только на закон Гаусса
Романовского	$C = \frac{ \chi^2 - df }{\sqrt{2df}}$	df – число степеней свободы. ($df = k - r - 1$) k – количество интервалов; r – количество параметров характеризующие распределение;	$N \geq 20$	Удобен при отсутствии возможности пользоваться критерием Пирсона; Применим для проверки любого распределения	Сильная зависимость от наблюдаемого значения χ^2

Окончание таблицы 2.5

Крамера-Мизеса-Смирнова	$\varpi^2 = \frac{1}{12N} + \left(\sum_{i=1}^N F_0(x_i) - \left(\frac{2i-1}{2N} \right)^2 \right)$	$F_0(x)$ – теоретическая функция распределения; x_i – значение элемента в выборке; i – номер элемента в выборке	Применим для любого размера выборок	Расчет производится без предварительной группировки выборки; Применим для проверки любого распределения; Обращение к теоретической функции распределения.	При исследовании выборок $N \leq 40$, необходимо использовать специальное преобразование; Необходимость в знании теоретической функции распределения с точностью до параметров.
Колмогорова	$\lambda = \frac{\max v_{\text{накоп.набл.}} - v_{\text{накоп.теор.}} }{\sqrt{N}}$	$v_{\text{накоп.набл.}}$ – накопленное значение наблюдаемой частоты; $v_{\text{накоп.теор.}}$ – накопленное значение теоретической частоты	$N \geq 20$	Критерий применим для любых видов распределений; Высокая математическая мощность.	Необходимо знать значения математического ожидания и дисперсии.
Числа Вестергарда	$\begin{aligned} \mu(x) \pm 0,3\sigma(x) &\in 0,25N \\ \mu(x) \pm 0,7\sigma(x) &\in 0,5N \\ \mu(x) \pm 1,1\sigma(x) &\in 0,75N \\ \mu(x) \pm 3\sigma(x) &\in N \end{aligned}$	$\mu(x)$ – оценочное математическое ожидание (среднее) выборки; $\sigma(x)$ – оценочное среднеквадратическое отклонение выборки; N – количество элементов в выборке	$N \geq 50$	Простота в использовании;	Позволяет оценить выборку только на закон Гаусса; Низкая математическая мощность.

Таблица 2.6 – Полученные в результате анализа параметры выборки –
«Продолжительность ремонта гидравлического оборудования АС»

Параметр	Значение, [ед. изм.]
Выборочное среднее ($X_{cp.}$)	7167,567, сек
Выборочное среднеквадратическое отклонение ($\sigma (x)$)	6700,399, сек
Максимум ($X_{max.}$)	43200, сек
Минимум ($X_{min.}$)	840, сек
Количество интервалов (n)	9, шт.
Шаг интервала (h)	4707, сек
Размер выборки (N)	259, шт.

В качестве гипотез, выдвигались распределения: Гамма, Бета, Усеченное слева Гаусса и Показательное, так как данные распределения наиболее часто используются в теории массового обслуживания и теории надежности, для которых определены наблюдаемые и теоретические частоты (Таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Наблюдаемые и теоретические частоты

n	$\nu_{набл.}$	$\nu_{теор.}$ (Гамма)	$\nu_{теор.}$ (Усеч. слева Гаусса)	$\nu_{теор.}$ (Экспон.)	$\nu_{теор.}$ (Бета)
840 - 5547	147	136	105	140	170
5548 - 10254	52	62	71	58	51
10255-14961	23	31	52	30	23
14962 - 19668	21	16	24	15	10
19669 - 24375	14	8	7	8	4
24376 - 29082	0	4	1	4	1
29083 - 33789	0	2	0	2	0
33790 - 38496	0	1	0	1	0
38497 - 43203	2	0	0	1	0

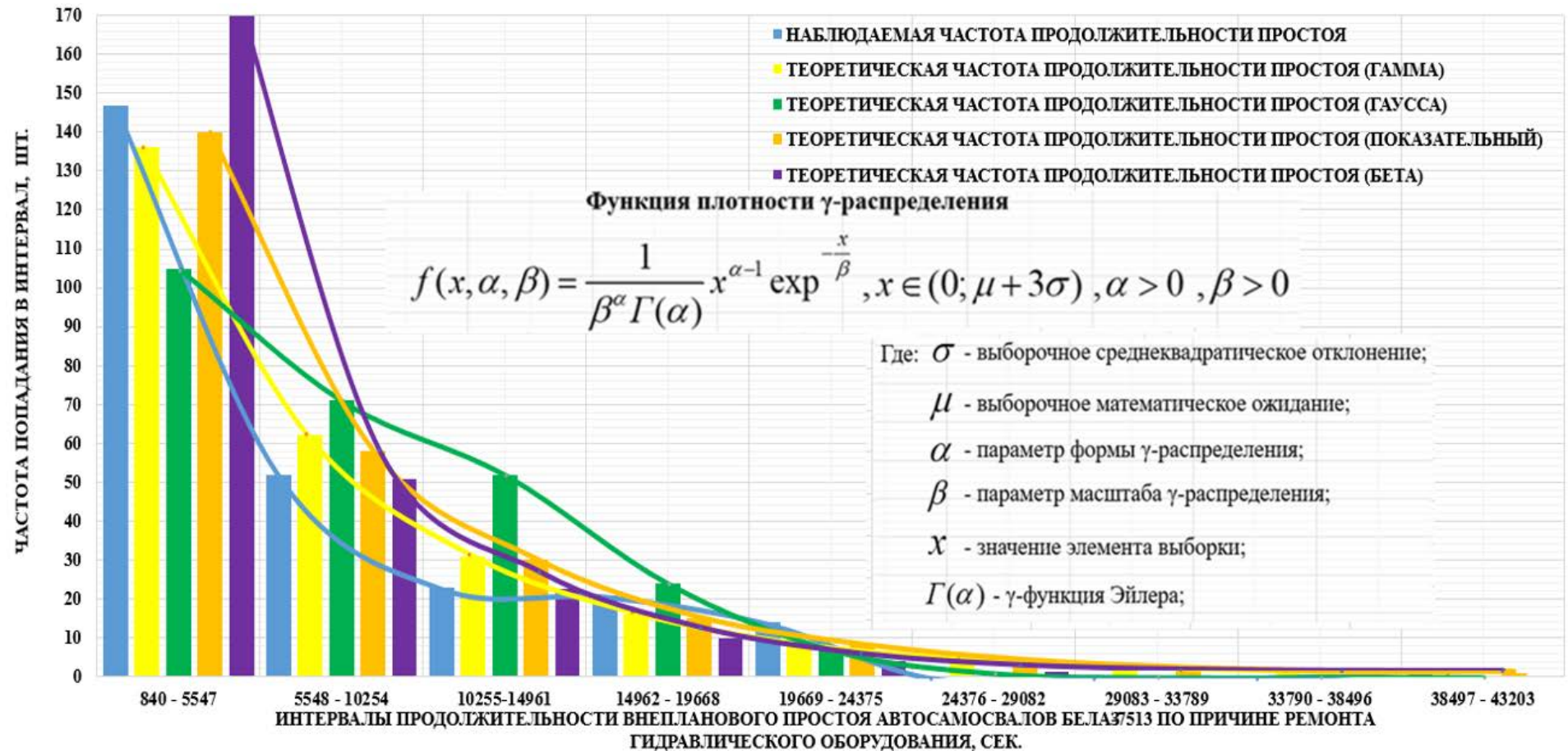


Рисунок 2.10 – Гистограмма и полигон наблюдаемых частот при идентификации закона распределения продолжительности внепланового простоя автосамосвалов марки БелАЗ-7513 – «Ремонт гидравлического оборудования» на разрезе ООО СП «Барзасское товарищество»

Таблица 2.8 – Результаты идентификации закона распределения продолжительности вероятностного простоя
автосамосвалов марки БелАЗ-7513 – «Ремонт гидравлического оборудования»
на разрезе ООО СП «Барзасское товарищество» по критерию Пирсона

n	840-5547	5547-10254	10254-14961	14961-19668	19668-43203	$\sum_{i=1}^N \nu_i$
$\nu_{набл.}$	147	52	23	21	16	259
$\nu_{теор.}$ (Гамма)	136	62	31	16	15	260
$\chi^2_{наб.}$ (Гамма)	0,89	1,61	2,06	1,56	0,07	6,20
Вывод	$\chi^2_{наб.}(6,20) > \chi^2_{крит.}(5,99)$ - Гипотеза отвергается					
$\nu_{теор.}$ (Усеч. слева Гаусса)	105	71	52	24	8	260
$\chi^2_{наб.}$ (Усеч. слева Гаусса)	16,80	5,08	16,17	0,38	8,00	46,93
Вывод	$\chi^2_{наб.}(46,93) > \chi^2_{крит.}(5,99)$ - Гипотеза отвергается					
$\nu_{теор.}$ (Бета)	170	51	23	10	5	259
$\chi^2_{наб.}$ (Бета)	3,11	0,02	0	12,10	24,20	39,43
Вывод	$\chi^2_{наб.}(39,43) > \chi^2_{крит.}(5,99)$ - Гипотеза отвергается					
$\chi^2_{крит.}$	5,99 (при $\alpha = 0,95$ и $df = 2$)					

Окончание таблицы 2.8

$\nu_{теор.}$ (Экспон)	140	58	30	15	16	259
$\chi^2_{наб.}$ (Экспон)	0,35	0,62	1,63	2,40	0,00	5,00
Вывод	$\chi^2_{наб.} (5,00) > \chi^2_{крит.} (5,99)$ – Гипотеза принимается					
$\chi^2_{крит.}$	7,81 (при $\alpha = 0,95$ и $df = 3$)					

где $\chi^2_{наб.}$ — наблюдаемое значение критерия Пирсона; $\chi^2_{крит.}$ — критическое значение критерия Пирсона.

Таблица 2.9 – Результаты идентификации закона распределения продолжительности вероятностного простоя
автосамосвалов марки БелАЗ-7513 – «Ремонт гидравлического оборудования» на разрезе
ООО СП «Барзасское товарищество» по критерию Колмогорова

$\nu_{накоп.набл.}$	1	147	199	222	243	257	257	257	257	259	$\lambda_{крит.}$
$\nu_{накоп.теор}$ (Гамма)	23	136	198	229	245	253	257	259	260	260	
$\lambda_{набл.}$ (Гамма)	1,35										1,36
Вывод	$\lambda_{набл.} (1,35) < \lambda_{крит.} (1,36) - \text{Гипотеза принимается}$										

$\nu_{\text{накоп.теор}}$ (Усеч. слева Гаусса)	45	105	176	228	252	259	260	260	260	260	1,36
$\lambda_{\text{набл.}}$ (Усеч. слева Гаусса)	1,29										
Вывод	$\lambda_{\text{набл.}}$ (2,71) > $\lambda_{\text{крит.}}$ (1,36) – Гипотеза отвергается										
$\nu_{\text{накоп.теор}}$ (Экспон.)	29	140	198	228	243	251	255	257	258	259	
$\lambda_{\text{набл.}}$ (Экспон.)	1,74										
Вывод	$\lambda_{\text{набл.}}$ (1,74) > $\lambda_{\text{крит.}}$ (1,36) – Гипотеза отвергается										
$\nu_{\text{накоп.теор}}$ (Бета.)	170	221	243	253	257	259	259	259	259	259	
$\lambda_{\text{набл.}}$ (Бета.)	10,50										
Вывод	$\lambda_{\text{набл.}}$ (10,50) > $\lambda_{\text{крит.}}$ (1,36) – Гипотеза отвергается										

где $\lambda_{\text{набл.}}$ – наблюдаемое значение критерия Колмогорова; $\lambda_{\text{крит.}}$ – критическое значение критерия Колмогорова.

Таблица 2.10 – Результаты идентификации закона распределения продолжительности вероятностного простоя автосамосвалов марки БелАЗ-7513 - «Ремонт гидравлического оборудования» на разрезе ООО СП «Барзасское товарищество» по критерию Крамера-Мизеса-Смирнова

i	1	2	3	...	259	$\sum_{i=1}^N N_i$
X_i	840	842	889	...	43200	-
Расчет (Гамма)	7,31E-03	6,71E-03	6,94E-03	...	2,27E-07	4,26E-01
$\varpi_{набл.}^2$ (Гамма)	0,46					
Вывод	$\varpi_{набл.}^2$ (0,43) < $\varpi_{крит.}^2$ (0,46) – Гипотеза принимается					
Расчет (Усеч. слева Гаусса)	2,91E-02	2,78E-02	2,71E-02	...	3,73E-06	2,85E+00
$\varpi_{набл.}^2$ (Усеч. слева Гаусса)	2,85					
Вывод	$\varpi_{набл.}^2$ (2,85) > $\varpi_{крит.}^2$ (0,46) – Гипотеза отвергается					
Расчет (Экспон.)	1,18E-02	1,10E-02	1,14E-02	...	2,32E-07	6,75E-01
$\varpi_{набл.}^2$ (Экспон.)	0,68					
Вывод	$\varpi_{набл.}^2$ (0,68) > $\varpi_{крит.}^2$ (0,46) - Гипотеза отвергается					
Расчет (Бета.)	3,73E-06	1,19E-06	1,49E-03	...	3,73E-06	3,13E+00
$\varpi_{набл.}^2$ (Бета.)	3,17					
Вывод	$\varpi_{набл.}^2$ (3,17) > $\varpi_{крит.}^2$ (0,46) – Гипотеза отвергается					

где $\varpi_{набл.}^2$ – наблюдаемое значение критерия Крамера-Мизеса-Смирнова; $\varpi_{крит.}^2$ – критическое значение критерия Крамера-Мизеса-Смирнова

Из Таблиц 2.8 - 2.10 видно, что все три критерия отвергли предположение об Усеченном распределении Гаусса и Бета продолжительности внепланового простоя автосамосвалов марки БелАЗ-7513 - «Ремонт гидравлического оборудования». При этом два критерия, Пирсона и Колмогорова (Таблицы 2.8 и 2.9), дали противоречивые результаты. Лишь применение третьего критерия, Крамера-Мизеса-Смирнова (Таблица 2.10), позволяет сделать вывод о принятии нулевой гипотезы, которая подтверждает, что случайная величина – продолжительность внепланового простоя автосамосвалов марки БелАЗ-7513 – «Ремонт гидравлического оборудования», распределена по Гамма закону.

Аналогичным образом была проведена идентификации законов распределения продолжительности протекания процессов в ЭАК, скорости движения автосамосвалов (в груженом/порожном состояниях), а также периодичности и продолжительности остальных внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов. Установлено, что периодичность между появлением внеплановых простоев горных машин, их продолжительность распределены согласно Гамма закона с ограниченной правосторонней областью, а сами процессы, протекающие в ЭАК, не являются Марковскими [3].

Значения параметров, описывающих периодичность внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов, а также их продолжительность, определены и усреднены на основе хронометражных данных на базе диспетчерских отчетов с шести угольных разрезов Кузбасса, представлены в Таблицах 2.11 и 2.12.

Таблица 2.11 – Значения параметров, описывающих математическое ожидание интервалов возникновения внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов

Простой	X_{cp} , сек	σ , сек	α	β
Экскаваторы				
Ремонт гидравлического оборудования	2458912,5	955729	6,619	371472,256
Ремонт рабочего оборудования	3247785,0	645986,1	25,277	128486,964
Ремонт ходового и механического оборудования	8321220,0	1695001,5	24,101	345265,472
Ремонт электрооборудования	11303730,0	4005124	7,965	1419090,405
Автосамосвалы				
Ремонт / замена автошин	21225204	22782227,2	0,868	24453469,342
Ремонт двигателя внутреннего сгорания	34236090,0	23000139,7	2,216	15451718,523
Ремонт системы управления	4836825	3104752,81	2,427	1992937,518
Ремонт гидравлического оборудования	2160000	721000	9,000	240000
Ремонт электрооборудования	24880464	18818901,67	1,748	14234101,901

Таблица 2.12 – Значения параметров, описывающих продолжительность внеплановых простоев экскаваторов
и автосамосвалов

Причина	X_{cp} , сек	σ , сек	α	β
Экскаваторы				
Ремонт гидравлического оборудования	55915,2	26238,7	4,541	12312,795
Ремонт рабочего оборудования	100918,8	61975,0	2,652	38059,328
Ремонт ходового и механического оборудования	150638,4	82070,9	3,369	44713,996
Ремонт электрооборудования	145296,0	135809,6	1,145	126942,525
Автосамосвалы				
Ремонт / замена автошин	51129,2	31965,6	2,558	19984,735
Ремонт ДВС	460118,7	488879,8	0,886	519438,670
Ремонт системы управления	18416,0	14057,4	1,716	10730,412
Ремонт электрооборудования	65406,8	57943,8	1,274	51332,318
Ремонт гидравлического оборудования	7167,57	6700,39	1,144	6263,680

2.2 Разработка аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК

Практически все системы, которые нас окружают, представляют собой совокупность элементов, взаимодействующих между собой в определенной последовательности, где процессы, повторяются многократно. Продолжительность процессов в таких системах, как правило, носят вероятностный (реже детерминированный) характер. К таким системам можно отнести, например, погрузка горных пород экскаваторами в автосамосвалы, телефонные станции, транспортные системы, автоматизированные производственные системы (АПС), горнопроходческие и очистные подземные горные работы. Для исследования таких систем активно применяют математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО) [60-64].

Созданные с помощью ТМО математические модели представляются в виде систем массового обслуживания (СМО), либо в виде сетей массового обслуживания (СеМО) – представляющие собой совокупность нескольких СМО [65].

Основными элементами любой СМО являются:

- 1) Источник заявок – формирует входной поток, задерживая на какой-то отрезок времени поступление требования в его состав.
- 2) Входной поток – временная последовательность поступления требований на входе СМО, для которой появление требования подчиняется детерминированным или вероятностным законам.
- 3) Очередь – в соответствии с заданным вероятностным (или детерминированным) законом осуществляет выборку (или перераспределение) во времени требований во входном потоке для выдачи их на вход прибора обслуживания;
- 4) Прибор обслуживания – осуществляет задержку во времени каждого поступившего на его вход требования в соответствии с заданным детерминированным или случайным законом обслуживания.

5) Выходной поток – это поток обслуженных и не обслуженных требований, которые покидают систему. Отличается от входного в зависимости от дисциплины очереди и дисциплины обслуживания.

Применительно к горному делу ТМО применяли и применяют многие отечественные и зарубежные ученые: В.Л. Конюх, Н.И. Головкин, Ю.И. Рыжиков, А.П. Кирпичиков, В.А. Романенко, В.В. Зиновьев, М.Е. Корягин, П.Ю. Гусев, А.Н. Стародубов, В.В. Додонов, А.Ю. Воронов, А.А. Емельянов, М.Л. Жарков, С.В. Митрофанов, П.И. Николаев, J. Sturgul, E. Gokalp, J. Ruuskanen и др. [3, 60-76].

Для отображения взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в виде систем массового обслуживания, представим автосамосвалы как заявки с набором индивидуальных параметров, которые перемещаясь из точки А (забой) в точку Б (пункт разгрузки) через приборы обслуживания – забои, экскаваторы, пункты разгрузки, осуществляют транспортирование горных пород, т.е. совершают рейс. Для совершения рейса автосамосвалы выполняют ряд процессов: установку под погрузку, погрузку горных пород экскаватором в кузов, транспортирование горных пород, установку для разгрузки, разгрузку, возвращение к экскаватору. Длительность протекаемых процессов ЭАК в разрабатываемой аналитико-имитационной модели возможно задавать двумя способами:

- 1) с использованием хронометражных данных;
- 2) использование аналитических формул.

При использовании аналитических формул определяется математическое ожидание. Для определения среднеквадратического отклонения в данном случае используется теория трех сигм [41]. Адекватность использования данного метода определяется свойством гамма распределения и дальнейшим проведением оценки адекватности созданной аналитико-имитационной модели.

Представим каждый процесс в виде отдельной СМО с описанием её согласно символики Кендалла-Башарина [77] (Рисунки 2.11-2.13).

$$A / B / m / N , \quad (2.5)$$

где A и B – законы распределений соответственно интервалов времени между моментами поступления заявок в систему и длительности обслуживания заявок в приборе; m – число обслуживающих приборов в системе ($m = 1, 2, \dots, \infty$); N – число мест в накопителе, которое может принимать значения $0, 1, 2, \dots$ (отсутствие N означает, что накопитель имеет неограниченную ёмкость).

Для задания законов распределений A и B используются следующие обозначения [77]:

- G – произвольное распределение общего вида;
- M – экспоненциальное (показательное) распределение;
- D – детерминированное распределение;
- U – равномерное распределение;
- g – гамма-распределение;
- P – распределение Парето;
- h_k – гипотенциальное распределение k -го порядка (с k последовательными разными экспоненциальными фазами);
- H_r – гиперэкспоненциальное распределение порядка r (с r параллельными экспоненциальными фазами) и т. д.

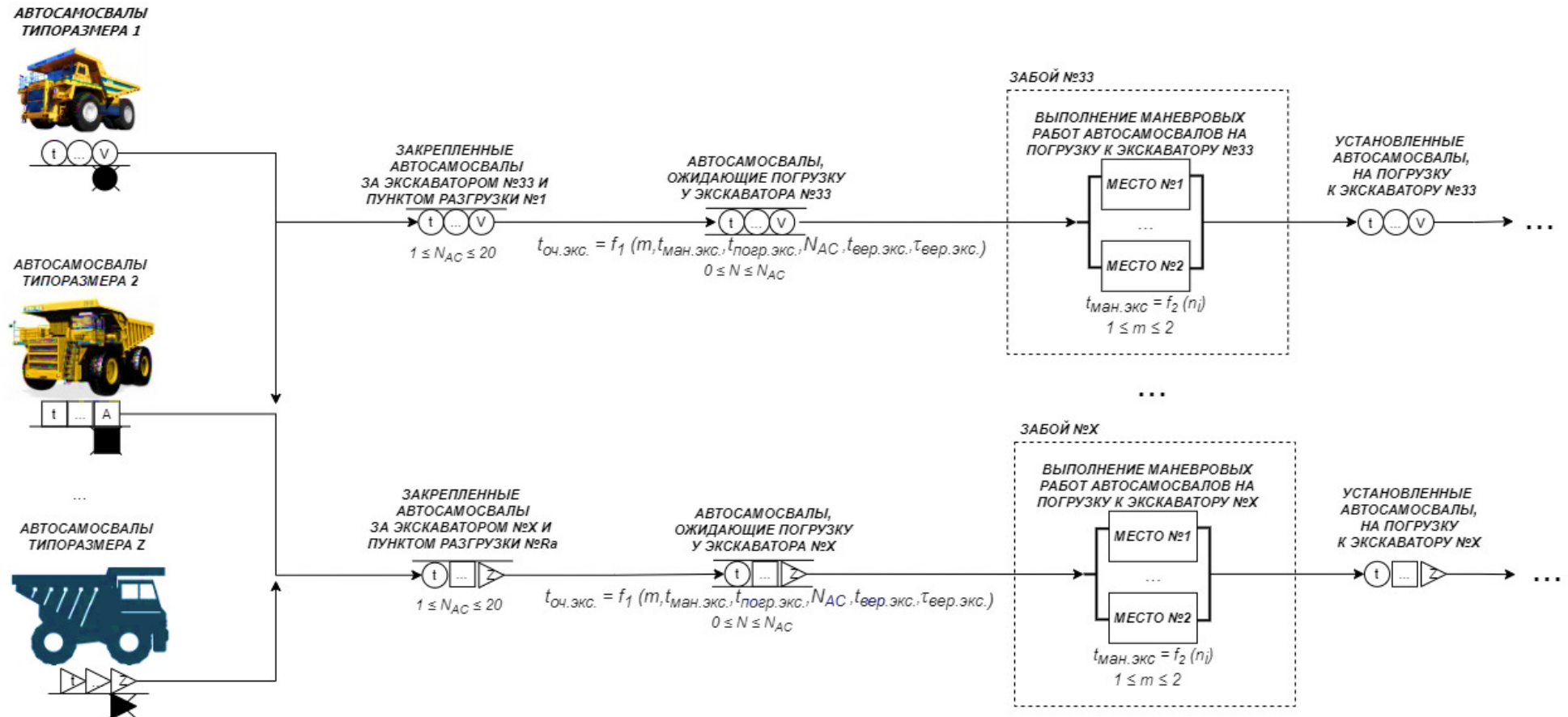


Рисунок 2.11 – Процесс установки автосамосвалов под погрузку в виде СМО

Так, процесс установки автосамосвалов под погрузку описывается СМО вида $g/g/m/N$ (гамма-распределение интервалов поступления заявок, гамма-распределение времени обслуживания заявок в m параллельно работающих обслуживающих приборах с ограниченной очередью).

В данной СМО количество источников заявок соответствует количеству типоразмеров автосамосвалов, закрепленные за конкретным экскаватором и осуществляющие транспортирование горных пород в закрепленный за ними пункт (ты) разгрузки. Суммарное количество поступающих заявок, в конкретный забой (N_{ac}) находится в интервале $1 \leq N_{ac} \leq 20$. Количество заявок, которые закрепляются за конкретным пунктом разгрузки (H_{ac}), определяется исследователем.

Каждая поступившая заявка, занимая один из каналов (m), задерживается в многоканальном устройстве (МКУ) – «Забой» на время, равное времени установки автосамосвала на погрузку к экскаватору. Те же заявки, которые не могут попасть в МКУ, встают в очередь перед соответствующим МКУ. Обслуживание их происходит по дисциплине FIFO («раньше пришёл - раньше обслужился»). Размер очереди из заявок ожидающих обслуживания (N) находится в интервале $0 \leq N \leq N_{ac}$. Поскольку возможна организация работы экскаватора на один или два подъезда, то количество каналов МКУ находится в интервале $1 \leq m \leq 2$. Математическое ожидание продолжительности выполнения маневровых операций автосамосвалами перед погрузкой ($\mu_{ман.погр.}$) определяется в зависимости продолжительности выполнения маневровых работ при использовании конкретной схемы подъезда ($t_{ман.заб.}$) [78]:

$$t_{ман.заб.} = f(n_i), \quad (2.6)$$

где n_i - тип принятой схемы выполнения маневровых работ.

По истечении этого времени заявка покидает обслуживающее устройство. Если в момент времени t_i прибытия заявки к обслуживающему многоканальному

устройству последнее недоступно (по причине нахождения в нем обслуживаемой заявки, прибывшей в момент времени t_{i-1} или недоступности экскаватора вследствие его простоя по какой-либо причине), то поступившая заявка становится в очередь и ожидает обслуживания. Размер этой очереди N находится в интервале $0 \leq N \leq N_{ac}$, где N_{ac} – общее количество автосамосвалов, распределенных в конкретных забой, [шт.].

Время нахождения заявок в очереди на обслуживание зависит от горнотехнических условий эксплуатации и параметров горных машин:

$$t_{оч.экс.} = f(m, t_{ман.экс.}, t_{погр.экс.}, N_{ac}, t_{вер.экс.}, \tau_{вер.экс.}), \quad (2.7)$$

где m – количество мест для одновременной установки автосамосвалов на погрузку к экскаватору, [шт.]; $t_{ман.экс.}$ – продолжительность выполнения маневровых работ автосамосвалом для погрузки, [сек]; $t_{погр.экс.}$ – продолжительность погрузки горных пород экскаватором в автосамосвалы, [сек]; $t_{вер.экс.}$ – продолжительность вероятностного простоя экскаватора, [сек]; $\tau_{вер.экс.}$ – математическое ожидание интервалов возникновения вероятностного простоя экскаватора, [сек].

Выходной поток представляет собой обслуженные заявки, которые отображают установленные под погрузку автосамосвалы.

На Рисунке 2.12 отображена структурная схема СМО, отображающая процесс погрузки горных пород в автосамосвалы экскаватором.



Рисунок 2.12 – Процесс погрузки горных пород в автосамосвалы экскаватором в виде СМО

Согласно символике Кендалла-Башарина, данная СМО имеет вид $g/g/1/0$ (гамма-распределение интервалов поступления заявок, гамма-распределение времени обслуживания заявок с одноканальным обслуживающим устройством и нулевой очередью). Входным потоком являются заявки выходного потока из МКУ – «Забой». Максимальное количество таких заявок соответствует количеству подъездов к экскаватору. Эти заявки попадают в одноканальное обслуживающее устройство – «Экскаватор», где каждая заявка задерживается на время, равное времени погрузки горных пород в автосамосвалы экскаватором. Длительность задержки заявки зависит от значений параметров горнотехнических условий эксплуатации, параметров горных машин и физико-механических свойств погружаемых горных пород. Эту зависимость можно представить в виде:

$$t_{погр.} = f(t_{ц}, E_{экс.}, d_{фр.}, k_{нк}, q_{max}, k_{qAC}, k_p, N_k, C_k, \beta, \rho), \quad (2.8)$$

где $t_{ц}$ – длительность цикла экскаватора, [сек]; $E_{экс.}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³]; $d_{фр.}$ – средний размер взорванной горной породы, [м]; $k_{нк}$ – коэффициент наполнения ковша экскаватора; q_{max} – грузоподъемность автосамосвала, [тонн]; k_{qAC} – коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала; k_p – коэффициент разрыхления горных пород; N_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, [шт.]; C_k – соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куса взорванной горной массы; β – угол поворота экскаватора, [град.]; ρ – плотность горной массы, [т/м³].

Математическое ожидание продолжительности погрузки экскаватором в автосамосвалы ($\mu_{погр.}$), равное времени погрузки ($t_{погр.}$), определяется по формуле [3, 11, 16]:

$$t_{ногр.} = t_{\text{ц}} \cdot N_k = (5,5 \cdot \sqrt{E_{\text{экс}}} \cdot 0,1 \cdot \beta + \frac{25}{1,07 \sqrt[3]{E_{\text{экс}}}}) \cdot \left(\frac{q_{\text{max}} \cdot k_p \cdot k_{qAC}}{E_{\text{экс}} \cdot k_{\text{нк}} \cdot \rho} \right) \cdot d_{\text{фр}}. \quad (2.9)$$

Объем зачерпываемой горной породы ковшом экскаватора ($G_{\text{экс.}}$) и объем перевозимой горной породы автосамосвалом ($G_{\text{ас}}$) определяются соответственно [11]:

$$G_{\text{экс.}} = \frac{E_{\text{экс}} \cdot k_{\text{нк}} \cdot \rho}{k_p}, \quad (2.10)$$

$$G_{\text{ас}} = N_k \cdot G_{\text{экс.}}, \quad (2.11)$$

Выходной поток представляет собой обслуженные в одноканальном устройстве «Экскаватор» заявки, отображающие погруженные автосамосвалы и закрепленные за конкретным пунктом разгрузки.

Структурная схема модели СМО процессов установки на разгрузку и разгрузка автосамосвалов представлена на Рисунке 2.13.

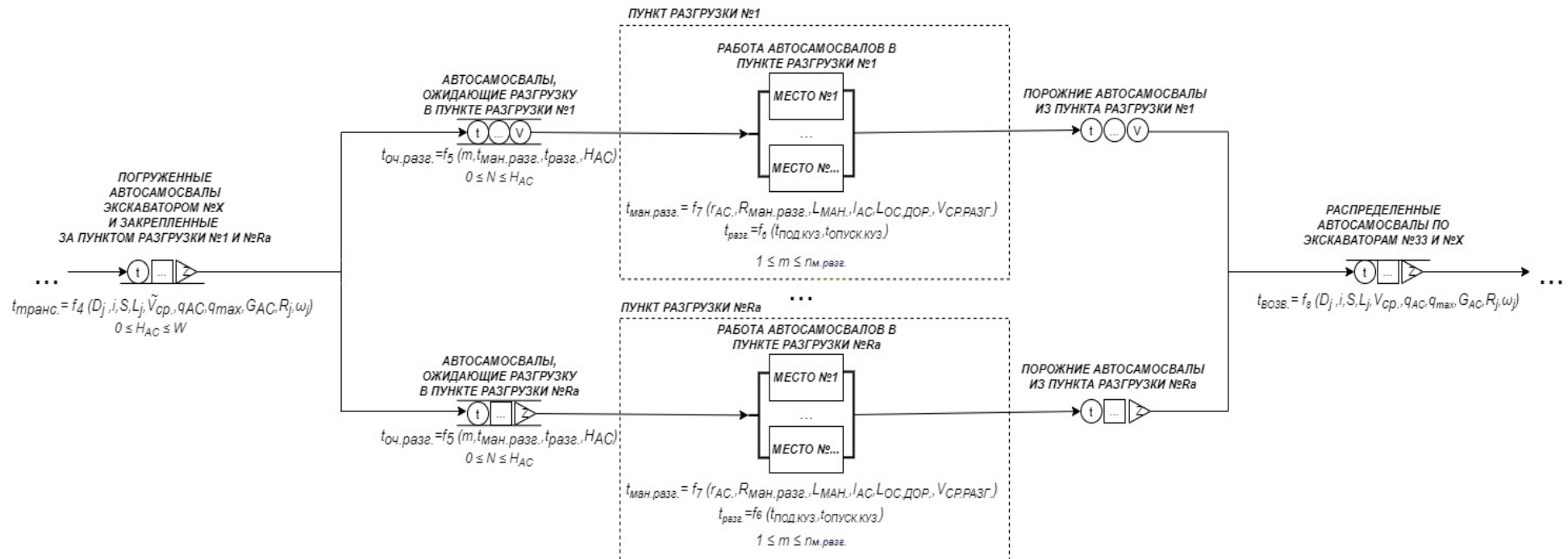


Рисунок 2.13 – Процессы установки на разгрузку и разгрузка автосамосвалов в виде СМО

В данной СМО вида $g/g/m/N$ (гамма-распределение интервалов поступления заявок, гамма-распределение времени обслуживания заявок в m параллельно работающих обслуживающих приборах с ограниченной очередью) входной поток формируется выходным потоком с СМО, отображающей процесс погрузки горных пород в автосамосвалы экскаватором. Из входного потока заявки поступают на обслуживающее многоканальное устройство – «Пункт разгрузки». Количество поступающих заявок находится в интервале $0 \leq H_{ac} \leq W$, где H_{ac} – количество автосамосвалов, распределенных в конкретный пункт разгрузки, [шт.], определяется исследователем; W – общее количество автосамосвалов, действующих на участке угольного разреза [шт.].

Интервалы поступления заявок, которое соответствует продолжительности транспортирования горных пород автосамосвалами в конкретный пункт разгрузки, зависит от параметров горных машин и горнотехнических условий эксплуатации:

$$t_{\text{транс.}} = f(D_j, i_j, S, L_j, \tilde{V}_{\text{ср.}}, q_{AC}, q_{\text{max}}, G_{ac}, R_j, \omega_j), \quad (2.12)$$

где D_j – значение тягово-динамической характеристики автосамосвала на j -ом участке, [кН/т]; i_j – средневзвешенный продольный уклон j -ого участка трассы, [%]; S – дальность транспортирования, [м]; L_j – длина j -ого участка трассы, [м]; $\tilde{V}_{\text{ср.}}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, [м/с]; q_{AC} – масса тары, [тонн]; q_{max} – грузоподъемность автосамосвала, [тонн]; G_{ac} – объем горной массы перевозимый автосамосвалом, [тонн]; R_j – радиус кривизны j -ого участка трассы, [м]; ω_j – удельное основное сопротивление движению на j -ом участке трассы, [Н/т].

Математическое ожидание времени транспортирования горных пород автосамосвалом в пункт разгрузки ($\mu_{\text{транс.}}$) определяется как среднее время транспортирования горных пород от забоя в пункт разгрузки ($t_{\text{транс.}}$) по формуле:

$$t_{\text{транс.}} = \frac{S}{\tilde{V}_{\text{ср.}}} = \frac{\sum_{j=1}^U L_j}{\frac{\sum_{j=1}^U \tilde{V}_{\text{ср.},j}}{U}}, \quad (2.13)$$

где S – дальность транспортирования, [м]; L_j – длина j -ого участка трассы, [м]; $\tilde{V}_{\text{ср.}}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, [м/с]; $\tilde{V}_{\text{ср.},j}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, на j -ом участке трассы, [м/с]; U – количество участков трассы (забойный, карьерный, траншейный, отвальный).

Средняя техническая скорость движения автосамосвалов в груженом и порожнем состояниях на j -ом участке трассы определяется в зависимости от тягово-динамической характеристики и грузоподъемности автосамосвала:

$$\tilde{V}_{\text{ср.},j} = f(q_{\text{max}}, D_j), \quad (2.14)$$

где q_{max} – грузоподъемность автосамосвала, [тонн]; D_j – значение тягово-динамической характеристики автосамосвала на j -ом участке, [кН/т].

Для автоматизации процесса определения технической скорости движения автосамосвалов на j -ом участке трассы проведена аппроксимация графиков зависимости тягово-динамической характеристики от скорости движения автосамосвалов [93]. В результате получены следующие уравнения (Таблица 2.13).

Значения констант, определяются с использованием уравнений аппроксимации в зависимости от грузоподъемности автосамосвалов, таблица 2.14.

Таблица 2.13 – Результаты аппроксимации графиков зависимости тягово-динамической характеристики от скорости движения автосамосвалов

Грузоподъемность АС, тонн	Уравнение	Коэффициент детерминации (R^2)
90 - 240	$V_{cp.j}^{\sim} = A \cdot e^{D_j \cdot B}$	0,97
до 90	$V_{cp.j} = \xi \cdot D_j^{\vartheta}$	0,97

где A, B, ξ, ϑ – константы, e – основание натурального логарифма.

Таблица 2.14 – Результаты аппроксимации графиков зависимости значения констант от грузоподъемности автосамосвалов

Уравнение	Коэффициент детерминации (R^2)
$A = 0,00006 \cdot q_{\max}^3 - 0,0292 \cdot q_{\max}^2 + 4,2745 \cdot q_{\max} - 126,35$	0,96
$B = 0,002487 \cdot q_{\max} - 0,000002 \cdot q_{\max}^2 - 1,902045$	0,97
$\xi = 0,0229 \cdot q_{\max}^2 - 1,9512 \cdot q_{\max} + 52,615$	0,95
$\vartheta = 0,0009 \cdot q_{\max}^2 - 0,0926 \cdot q_{\max} - 0,9508$	0,95

В случае, если в результате расчетов с использованием результатов аппроксимации технической скорости движения автосамосвалов на j -ом участке трассы ($V_{cp.j}^{\sim}$), больше максимально допустимой ($V_{\max.}$), то принимается в расчет максимально допустимая скорость, в противном случае принимается техническая скорость, полученная согласно расчетам.

Значение тягово-динамической характеристики, определяется [3, 79]:

- Для груженых автосамосвалов:

$$D_j = \frac{(G_{ac} + q_{AC}) \cdot (\omega_{0j} + 9,81 \cdot i_j + 294,3 - 1,4715 \cdot R_j)}{(q_{\max} + q_{AC})} / 1000, \quad (2.15)$$

- для порожних автосамосвалов:

$$D_j = \frac{q_{AC} \cdot (1,25 \cdot \omega_{0j} - 9,81 \cdot i_j + 294,3 - 1,4715 \cdot R_j)}{(q_{\max} + q_{AC})} / 1000, \quad (2.16)$$

где G_{ac} – объем горной массы, перевозимый автосамосвалом, [тонн]; R_j – радиус кривизны j -ого участка трассы, [м]; ω_j – удельное основное сопротивление движению на j -ом участке трассы, [Н/т]; i_j – средневзвешенный продольный уклон j -ого участка трассы, [‰]; q_{AC} – масса тары, [тонн].

Удельное основное сопротивление движению на j -ом участке трассы определяется в зависимости от типа покрытия дорог (Таблица 2.15) [79].

Таблица 2.15 – Удельное основное сопротивление движению при различном покрытии дорог

Дорога	Тип покрытия	Удельное основное сопротивление движению, [Н/т]
Главные откаточные	Гравийное	275
	Щебеночное	345
Забойные и отвальные дорожные проезды	Грунтовые укатанные проезды в забоях	600
	Грунтовые укатанные проезды на отвалах	1150
	Грунтовые не укатанные	2250

По прибытию каждая заявка занимает один из каналов многоканального обслуживающего устройства и задерживается в нем на время, равное времени выполнения маневровых работ при установке на разгрузку и саму разгрузку.

Количество каналов находится в интервале $1 \leq m \leq n_{м.разг.}$, где $n_{м.разг.}$ – максимальное количество мест для одновременной установки автосамосвалов на разгрузку, [шт.], которое зависит от площади пункта разгрузки. Время задержки заявки в обслуживающем устройстве зависит от горнотехнических параметров эксплуатации и параметров горных машин:

$$t_{ман.разг.} = f(r_{AC}, R_{ман.разг.}, L_{ман.}, l_{ас}, L_{ос.дор.}, V_{ср.разг.}), \quad (2.17)$$

где r_{AC} – минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]; $R_{ман.разг.}$ – радиус поворота автосамосвала при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $L_{ман.}$ – длина маневрового пути при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $l_{ас}$ – длина автосамосвала, [м]; $L_{ос.дор.}$ – расстояние между осевыми линиями дорог, [м]; $V_{ср.разг.}$ – скорость маневрирования карьерных автосамосвалов в пунктах разгрузки, [м/с].

Математическое ожидание продолжительности выполнения маневровых операций автосамосвалами перед разгрузкой ($\mu_{ман.разг.}$), равное времени выполнения маневровых работ ($t_{ман.разг.}$) перед разгрузкой, которое определяется по формуле [11,16]:

$$t_{ман.разг.} = \frac{L_{ман.}}{V_{ср.разг.}} = \frac{4 \cdot l_{ас.} + \pi \cdot R_{ман.разг.} + L_{ос.дор.}}{V_{ср.разг.}}, \quad (2.18)$$

где $R_{ман.разг.}$ – радиус поворота автосамосвала при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $L_{ман.}$ – длина маневрового пути при выполнении

маневровых операций на разгрузку, [м]; l_{oc} – длина автосамосвала, [м]; $L_{oc.дор.}$ – расстояние между осевыми линиями дорог, [м]; $V_{cp.разг.}$ – скорость маневрирования карьерных автосамосвалов в пунктах разгрузки, [м/с].

Скорость маневрирования карьерных автосамосвалов при выполнении маневровых операций в пунктах разгрузки ($V_{cp.разг.}$) принимается равной 9 км/ч, а радиус разворота автосамосвала при выполнении маневровых операций в пунктах разгрузки $R_{ман.разг.} = 1,45 \cdot r_{AC}$ в соответствии с действующими рекомендациями [16].

$$t_{разг.} = f(t_{под.куз.}, t_{опуск.куз.}), \quad (2.19)$$

где $t_{под.куз.}$ – время подъема кузова автосамосвала, [сек]; $t_{опуск.куз.}$ – время опускания кузова автосамосвала, [сек].

Математическое ожидание продолжительности разгрузки ($\mu_{разг.}$), равное продолжительности разгрузки ($t_{разг.}$), которое определяется по формуле [11]:

$$t_{разг.} = 1,5 \cdot (t_{под.куз.} + t_{опуск.куз.}), \quad (2.20)$$

где $t_{под.куз.}$ – время подъема кузова автосамосвала, [сек]; $t_{опуск.куз.}$ – время опускания кузова автосамосвала, [сек].

По истечении этого времени заявка покидает обслуживающее устройство – «Пункт разгрузки».

Для отображения взаимодействия горных машин во времени и пространстве с учетом внеплановых простоев, описанные выше процессы объединены в единую сеть – СеМО (Рисунок 2.14).

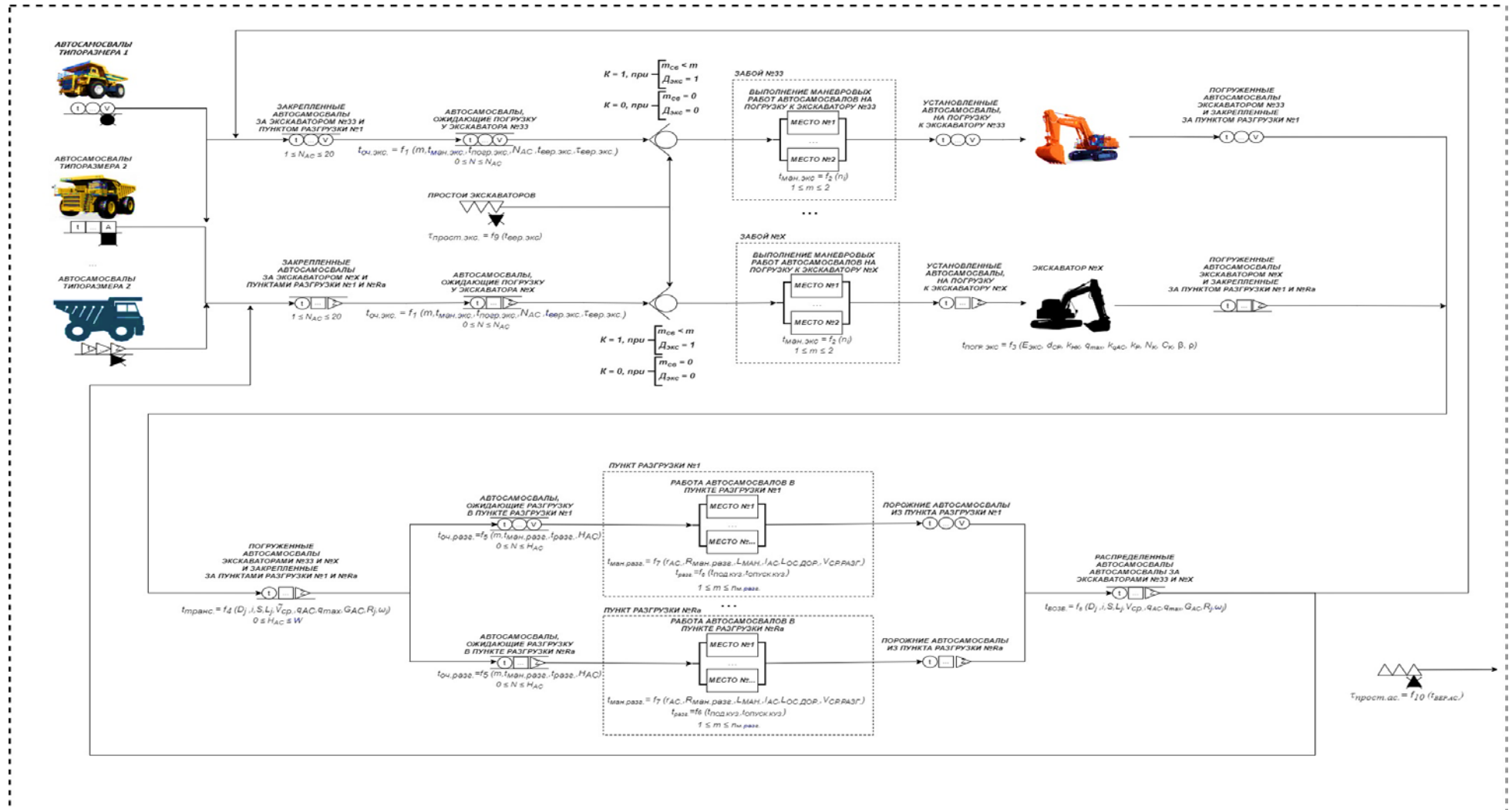


Рисунок 2.14 – Концептуальная модель взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в виде СеМО

Для учета внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов в СеМО введен дополнительный источник, генерирующий заявки через вероятностные моменты времени. При генерации эти заявки изменяют количество действующих заявок-автосамосвалов на время их простоя, а также закрывают своеобразные клапаны () и ограничивают доступ заявок-автосамосвалов к обслуживающим устройствам. Условия открытия ($K=1$) и закрытия ($K=0$) клапанов:

$$K=1, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} < m \\ D_{экс.} = 1 \end{cases}, \quad (2.21)$$

$$K=0, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} = 0 \\ D_{экс.} = 0 \end{cases}, \quad (2.22)$$

где $D_{экс.}$ – доступность экскаватора (1 – доступен; 0 – не доступен); $m_{св.}$ – количество свободных мест у экскаватора до и после установки и погрузки автосамосвалов, находящиеся в интервале $0 \leq m_{св.} \leq m$, где m – количество каналов многоканального устройства «Забой», [шт.].

Значение среднеквадратического отклонение продолжительности процессов ЭАК, используемые в СеМО (σ_j), определяется согласно правилу 3-х сигм по формуле:

$$\sigma_j = \frac{t_j}{3}, \quad (2.23)$$

где j – номер процесса ЭАК (погрузка, транспортирование, разгрузка, маневровые работы перед погрузкой/разгрузкой, возврат).

Эксплуатационная производительность ЭАК в СеМО определяется интенсивностью выходного потока, а удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород – количеством и типом заявок во входном потоке, а также

количеством и типом приборов обслуживания. Так как количество заявок - автосамосвалов ограничено, и они не покидают систему, то данная СеМО является замкнутой.

Марковские модели неадекватно описывают процессы, протекающие в ЭАК, что доказано в работе [3]. Кроме того, разработанная СеМО усложнена наличием разнородных типов заявок и обратными связями. Несмотря на современное развитие ТМО, аналитический расчет такой СеМО в настоящее время невозможен. В связи с этим для реализации созданной СеМО предложен альтернативный подход путем программной реализации СеМО посредством специализированных средств имитационного моделирования.

2.2.1 Программная реализация концептуальной аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК

В качестве средства программной реализации, разработанной СеМО отображающей процессы взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК, в наибольшей степени подходит язык имитационного моделирования GPSS World. Данный язык является одним из наиболее популярных и используемых средств имитационного моделирования в России и во всем мире. Принцип работы языка GPSS основан на теории массового обслуживания и позволяет моделировать вероятностные процессы и простои, распределенные по различным непрерывным и дискретным законам, а также отображать динамику взаимодействия горных машин во времени и пространстве. Язык GPSS в различных его версиях успешно применялся и применяется с начала 90-х годов прошлого века для моделирования горных работ [60, 61, 64, 65, 80-84].

Также важным в настоящее время обстоятельством является то, что GPSS World является отечественной системой имитационного моделирования, разрабатываемой компанией «Элина компьютер» (Россия).

Основными элементами в GPSS World-модели являются: транзакты, блоки и управляющие операторы. Транзакты по своей сути являются заявками в СеМО

и описывают различные физические объекты, например, автосамосвалы, дискретные объемы угля/породы. Применительно к данной модели, транзакты отображают автосамосвалы и заявки возникновения внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов. Блоки определяют логику функционирования работы модели системы и определяют пути движения транзактов по модели. Применительно к ЭАК это аналоги обслуживающих устройств в СеМО, отображающие экскаватор, забой, пункты разгрузки. Управляющие операторы предназначены для задания продолжительности процесса моделирования, функций и последовательностей псевдослучайных чисел, количества параллельно работающих обслуживающих устройств. Присутствуют только в программной реализации модели. В процессе моделирования системы транзакты взаимодействуют с блоками, в результате чего происходит изменения их атрибутов, а также преобразование арифметических или логических значений. Такие преобразования называются событиями. При перемещении транзактов, от блока к блоку, происходит имитация процессов в ЭАК (маневры на погрузку, погрузка горных пород экскаватором, транспортирование горных пород, выполнение маневровых операций на разгрузку, разгрузка, возвращение к экскаватору).

Имитационную GPSS-модель сначала строят в виде блок-схемы, обеспечивающую наглядность перед записью программы. Каждый блок имеет свой графический аналог, с помощью которого отображается пространственная конструкция модели [66, 81]. Набор блоков - операторная часть, т.е. отображающая конкретный процесс, называют сегментами модели [85, 86].

Разработанная модель отображения взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в составе ЭАК с учетом внеплановых простоев состоит из 7 сегментов:

Сегмент 1. Прибытие автосамосвалов и присвоение им значений параметров.

Сегмент 2. Работа экскаваторов и автосамосвалов в забое.

Сегмент 3. Транспортирование горных пород в пункт разгрузки и возвращение автосамосвалов к экскаватору.



Работа сегмента начинается с момента поступления транзактов-автосамосвалов в блок QUEUE, в котором начинается сбор статистики о характеристиках очереди в пунктах разгрузки (текущий, средний размер очереди автосамосвалов, среднее, максимальное время нахождения в очереди автосамосвалов). Математическое ожидание интервалов поступления автосамосвалов в пункт разгрузки ($\mu_{\text{транс.}}$) определяется как среднее время транспортирования горных пород от забоя в пункт разгрузки ($t_{\text{транс.}}$) по формуле:

$$t_{\text{транс.}} = \frac{S}{\tilde{V}_{\text{ср.}}} = \frac{\sum_{j=1}^U L_j}{\frac{\sum_{j=1}^U \tilde{V}_{\text{ср.}j}}{U}}, \quad (2.24)$$

где S – дальность транспортирования, [м]; L_j – длина j -ого участка трассы, [м]; $\tilde{V}_{\text{ср.}}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, [м/с]; $\tilde{V}_{\text{ср.}j}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, на j -ом участке трассы, [м/с]; U – количество участков трассы (забойный, карьерный, траншейный, отвалный).

Для окончания сбора статистики используется блок DEPART. В блоках ADVANCE происходит задержка транзактов-автосамосвалов на время, равное времени выполнения маневровых работ, выполняемых автосамосвалами перед разгрузкой, и далее сама разгрузка. Математическое ожидание продолжительности выполнения маневровых операций автосамосвалами перед разгрузкой ($\mu_{\text{ман.разг.}}$) определяется по формуле [11, 16]:

$$t_{\text{ман.разг.}} = \frac{4 \cdot l_{\text{ас.}} + \pi \cdot (1,45 \cdot r_{\text{ас}}) + L_{\text{ос.дор.}}}{V_{\text{ср.разг.}}}, \quad (2.25)$$

а продолжительность разгрузки ($\mu_{\text{разг.}}$) [11]:

$$t_{разг.} = 1,5 \cdot (t_{под.куз.} + t_{опуск.куз.}), \quad (2.26)$$

где r_{AC} – минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]; $L_{ман.}$ – длина маневрового пути при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $l_{ос}$ – длина автосамосвала, [м]; $L_{ос.дор.}$ – расстояние между осевыми линиями дорог, [м]; $V_{ср.разг.}$ – скорость маневрирования карьерных автосамосвалов в пунктах разгрузки, [м/с]; $t_{под.куз.}$ – время подъема кузова автосамосвала, [сек]; $t_{опуск.куз.}$ – время опускания кузова автосамосвала, [сек].

Значение среднеквадратического отклонение продолжительности процессов в данном сегменте (σ_i) определяется, согласно правилу 3-х сигм, по формуле:

$$\sigma_i = \frac{t_i}{3}, \quad (2.27)$$

где i – номер процесса в сегменте работы автосамосвалов в пункте разгрузки (маневрирование, разгрузка).

Скорость маневрирования карьерных автосамосвалов при выполнении маневровых операций в пунктах разгрузки ($V_{ср.разг.}$) принимается 9 км/ч, согласно рекомендациям [16].

В случае, если используются хронометражные данные, то в модель вводятся значения параметров гамма распределения с плотностью вероятностей:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x \in (0; \mu + 3\sigma), \quad \alpha > 0, \beta > 0, \quad (2.28)$$

где α – параметр формы, β – параметр масштаба, $\Gamma(\alpha)$ – гамма функция Эйлера, μ – выборочное математическое ожидание, σ – выборочное среднеквадратическое отклонение; X – значение элемента выборки.

Для описания мест для одновременной установки автосамосвалов на разгрузку используются блоки ENTER – LEAVE. При входе транзакта-автосамосвала в блок ENTER происходит занятие им одного из m мест. Если свободных мест нет, то поступившие транзакты не могут их занять. Освобождение места происходит при прохождении одним из транзактов блока LEAVE и занятие его следующим транзактом. Те же транзакты, которые не могут попасть в какой-либо блок, встают в очередь перед соответствующим блоком. Обслуживание их происходит по дисциплине FIFO («раньше пришёл - раньше обслужился»). Количество мест для одновременной разгрузки автосамосвалов задаётся оператором STORAGE. Блоки ASSIGN служат для определения месторасположения транзакта-автосамосвала в пункте разгрузки (в очереди, на разгрузке, за пределами пункта разгрузки), это необходимо для имитации внеплановых простоев автосамосвалов. Для фиксации доставленного объема горных пород и совершенного рейса в пункт разгрузки используем блоки SAVEVALUE. Для перехода к блокам проверки необходимости выполнения планового простоя автосамосвалов используем блок TRANSFER. Количество набора блоков соответствует количеству пунктов разгрузки (Рисунок 2.16).

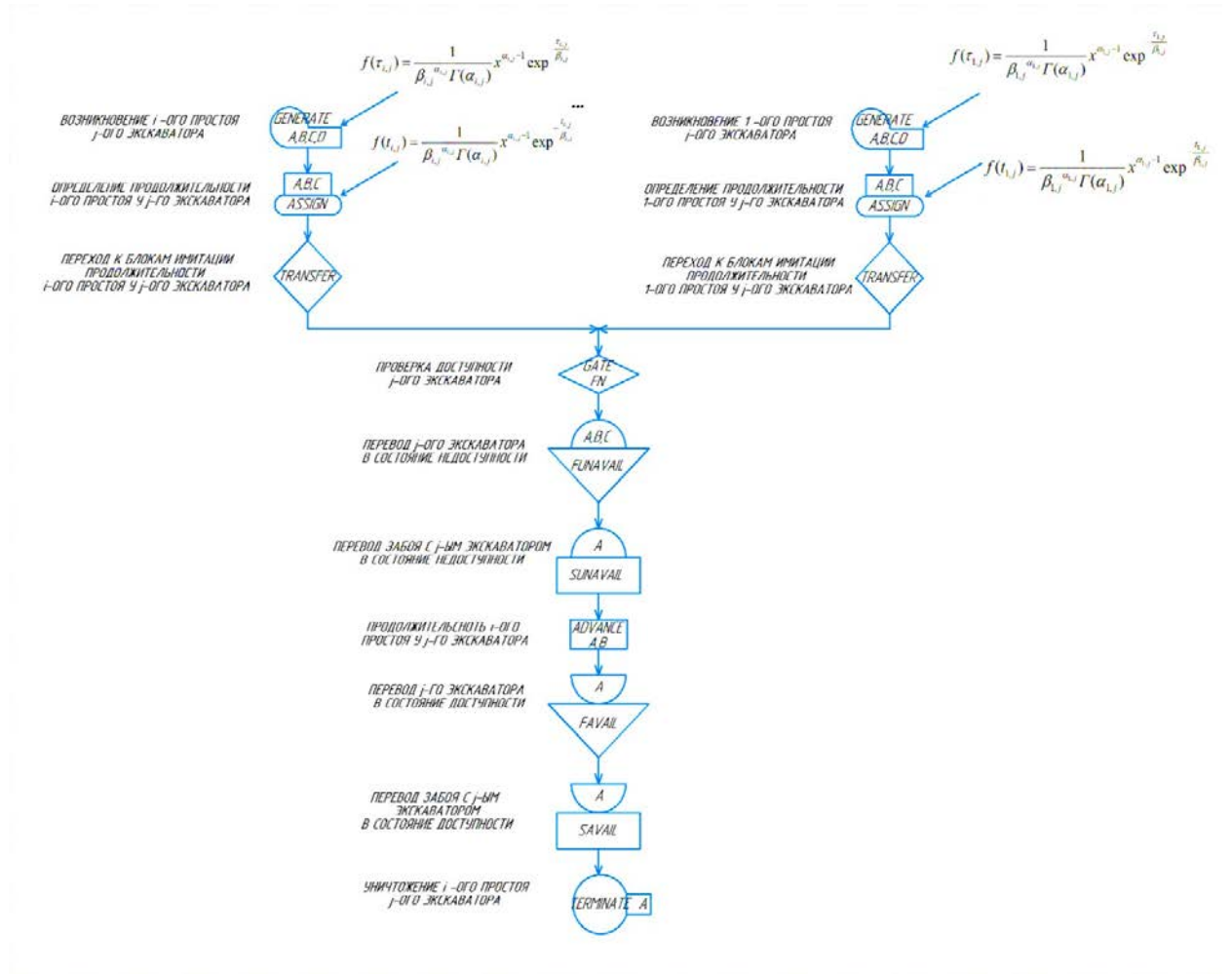


Рисунок 2.16 – Блок-схема сегмента имитации простоев экскаваторов

В блоке GENERATE происходит появление транзактов и ввод их в сегмент модели. Поступающие транзакты соответствуют заявкам на проведение i -ого вероятностного простоя у j -ого экскаватора. Математическое ожидание интервалов поступления транзактов ($\tau_{i,j}$) распределены по гамма закону с плотностью вероятностей:

$$f(\tau_{i,j}, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}) = \frac{1}{\beta_{i,j}^{\alpha_{i,j}} \Gamma(\alpha_{i,j})} x^{\alpha_{i,j}-1} \exp \left(-\frac{\tau_{i,j}}{\beta_{i,j}} \right), \tau_{i,j} \in (0, \mu + 3\sigma), \alpha > 0, \beta > 0, (2.29)$$

где $\alpha_{i,j}$ – параметр формы, $\beta_{i,j}$ – параметр масштаба, $\Gamma(\alpha_{i,j})$ – гамма функция Эйлера, μ – выборочное математическое ожидание, σ – выборочное среднеквадратическое отклонение; $\tau_{i,j}$ – значение элемента выборки.

Математическое ожидание продолжительности i -ого вероятностного простоя j -го экскаватора ($t_{i,j}$), также распределены по гамма закону с плотность вероятностей:

$$f(t_{i,j}, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}) = \frac{1}{\beta_{i,j}^{\alpha_{i,j}} \Gamma(\alpha_{i,j})} x^{\alpha_{i,j}-1} \exp \frac{t_{i,j}}{\beta_{i,j}}, t_{i,j} \in (0, \mu + 3\sigma), \alpha > 0, \beta > 0, (2.30)$$

где $\alpha_{i,j}$ – параметр формы, $\beta_{i,j}$ – параметр масштаба, $\Gamma(\alpha_{i,j})$ – гамма функция Эйлера, μ – выборочное математическое ожидание, σ – выборочное среднеквадратическое отклонение; $\tau_{i,j}$ – значение элемента выборки.

Блок ASSING служит для фиксации математического ожидания продолжительности i -ого вероятностного простоя у i -го экскаватора. Переход к блокам проверки доступности экскаватора с последующей имитацией продолжительности простоя j -ого экскаватора воспользуемся блоком TRANSFER. Количество блоков GENERATE, ASSIGN и TRANSFER соответствует количеству учитываемых внеплановых простоев экскаваторов.

Проверка доступности экскаватора осуществляется с использованием блока GATE. Если на момент прибытия экскаватор недоступен, то поступивший транзакт ожидает его доступности. В противном случае происходит блокирование экскаватора и забоя с применением блоков FUNAVAIL и SUNAVAIL, в результате поступающие транзакты-автосамосвалы к экскаватору не могут быть им обслужены. В случае если на момент возникновения i -ого вероятностного простоя у j -ого экскаватора им осуществлялась погрузка k -ого автосамосвала, то происходит прерывание погрузки и освобождение j -ого экскаватора. Для это используется режим RE работы блока FUNAVAIL. При попадании транзакта в блок ADVANCE выполняется его задержка на время, равное времени продолжительности вероятностного простоя заданная в блоке ASSIGN. После вновь открывает доступ транзактов-автосамосвалов к и забоя с j -ым экскаватором. Для этого использованы блоки SAVAIL и FAVAIL соответственно. После транзакт отображающий i -ый вероятностный простой у j -ого экскаватора покидает систему. Для

этого использован блок TERMINATE. Количество таких блоков соответствует количеству экскаваторов (Рисунок 2.17).

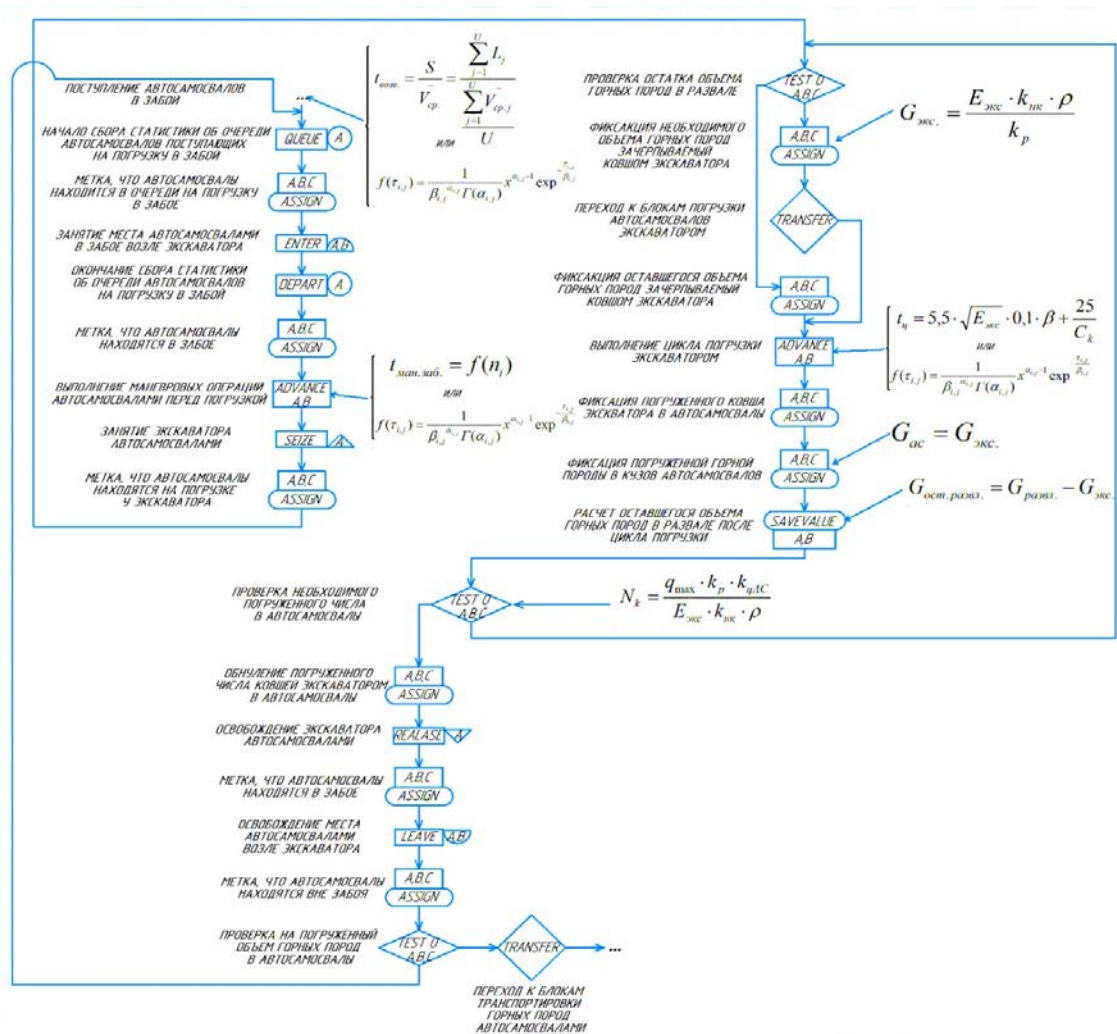


Рисунок 2.17 – Сегмент работы экскаваторов и автосамосвалов в забое

Работа сегмента начинается с момента поступления транзактов-автосамосвалов в блок QUEUE, в котором начинается сбор статистики о характеристиках очереди в пунктах разгрузки (текущий, средний размер очереди автосамосвалов, среднее, максимальное время нахождения в очереди автосамосвалов). Математическое ожидание интервалов поступления автосамосвалов в забой ($\mu_{\text{возв.}}$) определяется как среднее время возвращения автосамосвалов после разгрузки ($t_{\text{возв.}}$) по формуле:

$$t_{возв.} = \frac{S}{\tilde{V}_{cp.}} = \frac{\sum_{j=1}^U L_j}{\frac{\sum_{j=1}^U \tilde{V}_{cp.j}}{U}}, \quad (2.31)$$

где S – дальность транспортирования, [м]; L_j – длина j -ого участка трассы, [м]; $\tilde{V}_{cp.}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, [м/с]; $\tilde{V}_{cp.j}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, на j -ом участке трассы, [м/с]; U – количество участков трассы (забойный, карьерный, траншейный, отвалный).

Для окончания сбора статистики использует блок DEPART. В блоках ADVANCE происходит задержка транзактов-автосамосвалов на время, равное времени выполнения маневровых работ, выполняемых автосамосвалами перед погрузкой и цикла погрузки горных пород экскаватором в автосамосвалы. Для расчета математического ожидания продолжительности процессов, воспользуемся аналитическими формулами, заложенные в данных блоках:

- Математическое ожидание продолжительности выполнения маневровых операций автосамосвалами перед погрузкой ($\mu_{ман.погр.}$) определяется в зависимости от продолжительности выполнения маневровых работ при использовании конкретной схемы подъезда ($t_{ман.заб.}$) [78]:

$$t_{ман.заб.} = f(n_i), \quad (2.32)$$

где n_i – тип принятой схемы выполнения маневровых работ: (сквозная (10 сек), тупиковая (55 сек); петлевая с разворотом (22,5 сек.).

- Математическое ожидание продолжительности цикла экскаватора ($\mu_{цикл.экс.}$) равное времени цикла ($t_{ц.}$), определяется по формуле профессора Репина Н.Я. [11]:

$$t_y = 5,5 \cdot \sqrt{E_{\text{экс}}} \cdot 0,1 \cdot \beta + \frac{25}{C_k}, \quad (2.33)$$

где t_y – длительность цикла экскаватора, [сек]; $E_{\text{экс}}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³]; C_k – соотношение ширины ковша и с размерами фракции горных пород; β – угол поворота платформы экскаватора, [град.];

$$C_k = \frac{1,07^3 \sqrt{E_{\text{экс}}}}{d_{\text{фр}}}, \quad (2.34)$$

где $d_{\text{фр}}$ – средний размер фракции взорванных горных пород, [м];

В случае, если используются хронометражные данные, то в модель вводятся значения параметров гамма распределения с плотностью вероятностей:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x \in (0; \mu + 3\sigma), \quad \alpha > 0, \beta > 0, \quad (2.34)$$

где α – параметр формы, β – параметр масштаба, $\Gamma(\alpha)$ – гамма функция Эйлера, μ – выборочное математическое ожидание, σ – выборочное среднеквадратическое отклонение.

Для описания мест для одновременной установки автосамосвалов на погрузку используются блоки ENTER – LEAVE. При входе транзакта-автосамосвала в блок ENTER происходит занятие им одного из m мест. Освобождение места происходит при прохождении одним из транзактов блока LEAVE и занятие его следующим транзактом. Те же транзакты, которые не могут попасть в какой-либо блок, встают в очередь перед соответствующим блоком. Обслуживание их происходит по дисциплине FIFO («раньше пришёл – раньше обслужился»). Количество мест для одновременной разгрузки задаётся оператором

STORAGE. Для описания работы экскаватора используются блоки SEIZE и RELEASE. При входе транзакта в блок SEIZE происходит занятие экскаватора, при этом для всех остальных транзактов вход в данный блок закрыт. Открытие происходит во время прохождения блока RELEASE транзактом.

Блоки ASSIGN служат для определения месторасположения транзакта-автосамосвала в забое (в очереди, в забое, но не у экскаватора, в забое и у экскаватора, вне забоя и экскаватора), это необходимо для имитации внеплановых простоев автосамосвалов. Также блоки ASSIGN хранят в себе информацию о необходимом числе погруженных ковшей экскаватором в автосамосвал и объеме. Необходимое количество ковшей погружаемых ковшей экскаватором в автосамосвал определяется [3, 11, 16]:

$$N_k = \frac{q_{\max} \cdot k_p \cdot k_{qAC}}{E_{\text{экс}} \cdot k_{\text{нк}} \cdot \rho}, \quad (2.35)$$

где $E_{\text{экс}}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³]; $k_{\text{нк}}$ – коэффициент наполнения ковша экскаватора; $q_{\max}$ – грузоподъемность автосамосвала, [тонн]; k_{qAC} – коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала; k_p – коэффициент разрыхления горной массы; ρ – плотность горной массы, [т/м³].

Рекомендуемые значения коэффициентов наполнения ковша экскаватора, разрыхления, а также плотности горных масс в зависимости от типа экскаватора и категории пород по трудности экскавации, представлены в работе [3].

Проверка на количество погруженных ковшей экскаватором в автосамосвалы, погруженный объем горных пород в автосамосвалы, а также оставшийся объем горных пород в развале определяется с использованием блоков TEST.

Необходимый расчетный объем зачерпываемой горной породы ковшом экскаватора определяется [11]:

$$G_{\text{экс.}} = \frac{E_{\text{экс}} \cdot k_{\text{нк}} \cdot \rho}{k_p} . \quad (2.36)$$

При возникновении вероятностного простоя экскаватора происходит прерывание его работы. В результате происходит немедленное освобождение места в забое и экскаватора и далее осуществляется проверка погруженного объема горных пород в автосамосвал. Если в автосамосвале есть некий объем горных пород, то он отправляется в рейс, иначе рейс не совершается и автосамосвал ожидает погрузки в очереди. Это необходимо для исключения совершения лишнего (пустого) рейса автосамосвалом.

Объем погруженный в автосамосвал экскаватором за один цикл (G_{ac}) определяется:

$$G_{ac} = G_{\text{экс.}} . \quad (2.37)$$

Общий объем погруженный в автосамосвал экскаватором после погрузки определяется [11]:

$$G_{ac} = N_k \cdot G_{\text{экс.}} . \quad (2.38)$$

Остаток объема горных пород в развале ($G_{\text{ост.развл.}}$) после зачерпывания объема горных пород i -ым ковшом экскаватора ($G_{\text{экс.}}$) определяется:

$$G_{\text{ост.развл.}} = G_{\text{развл.}} - G_{\text{экс.}} , \quad (2.39)$$

где $G_{\text{развл.}}$ – объем горных пород в развале, [тонн].

Переход к блокам транспортирования горных пород, а также к циклу экскаватора осуществляется с использованием блоков TRANSFER.

Аналогичным образом отображены остальные сегменты модели, которые представлены в приложении В.

2.2.2 Оценка адекватности аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК

Если модель неадекватно отображает работу системы, то очевидно, что полученные с помощью нее результаты будут недостоверными. Поэтому одной из главных задач при моделировании работы ЭАК является проверка соответствия разработанной модели реальной системе [66,87, 88].

Проверка адекватности разработанной модели является достаточно сложной задачей, т.к. она связана со многими статистическими, логическими и практическими задачами. В целом задача оценки адекватности не имеет полного решения [66, 89].

Суть оценки адекватности модели заключается в определении погрешности результатов ее работы в сравнении с некоторыми данными, достоверность которых подтверждена экспериментально, либо с данными, полученными проверенными аналитическими методами. Нет общепринятых количественных оценок доказательства адекватности моделей. Большинство специалистов в теории моделирования сходятся во мнении, что отклонение показателей, полученных на реальной системе от показателей, полученных на модели системы не должно превышать 10-20% [66, 89]. В современной теории имитационного моделирования систем процесс проверки адекватности модели разделяют на валидацию и верификацию [64, 66, 89].

Суть верификации заключается в построении логической блок-схемы событий, протекающих в реальной системе и сравнением их с событиями, происходящими в имитационной модели, работающей в режиме отладки [65].

На Рисунке 2.18 представлен фрагмент логической блок-схемы, отображающей процессы протекающие в пункте разгрузки. Этапы проверки представлены на Рисунках 2.19 – 2.27.

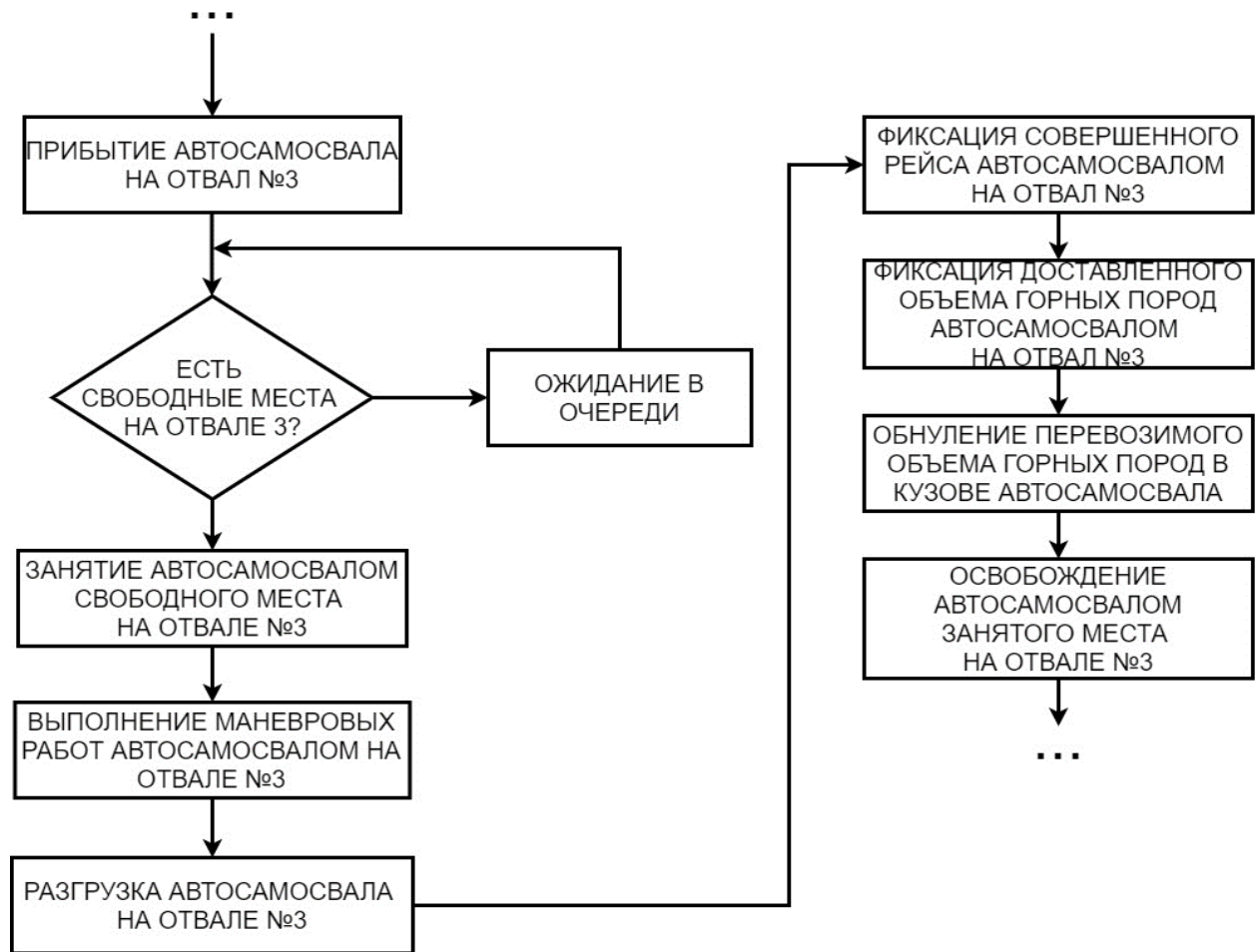


Рисунок 2.18 – Фрагмент логической блок - схемы сегмента, отображающего процессы, протекающие в пункте разгрузки (Отвал №3)

Для проведения верификации данного сегмента модели воспользуемся режимом отладки в специализированной системе имитационного моделирования GPSS Studio, в основе которого лежит язык GPSS World. Режим отладки предназначен для отображения хода моделирования, состояния объектов модели и значений стандартных числовых атрибутов (СЧА) в ходе моделирования. В режиме отладки можно наблюдать, как транзакты перемещаются от блока блоку, и как при этом меняются характеристики модели [64].

Запустим созданную модель в режиме отладки и перейдем к блоку 68 TRANSFER ,P\$OTVLAL. Блок направляет транзакты-автосамосвалы к закрепленному пункту разгрузки (Отвал №3). Это отображается переменной PUT, которая принимает значение «115 / OTVAL3». Это показывает, что транзакт-

автосамосвал перейдет в блок QUEUE с расположенной справа от блока меткой «OTVAL3» (Рисунок 2.19), тем самым, отобразится процесс прибытия транзакта-автосамосвала на Отвал №3, что соответствует логической блок-схеме.

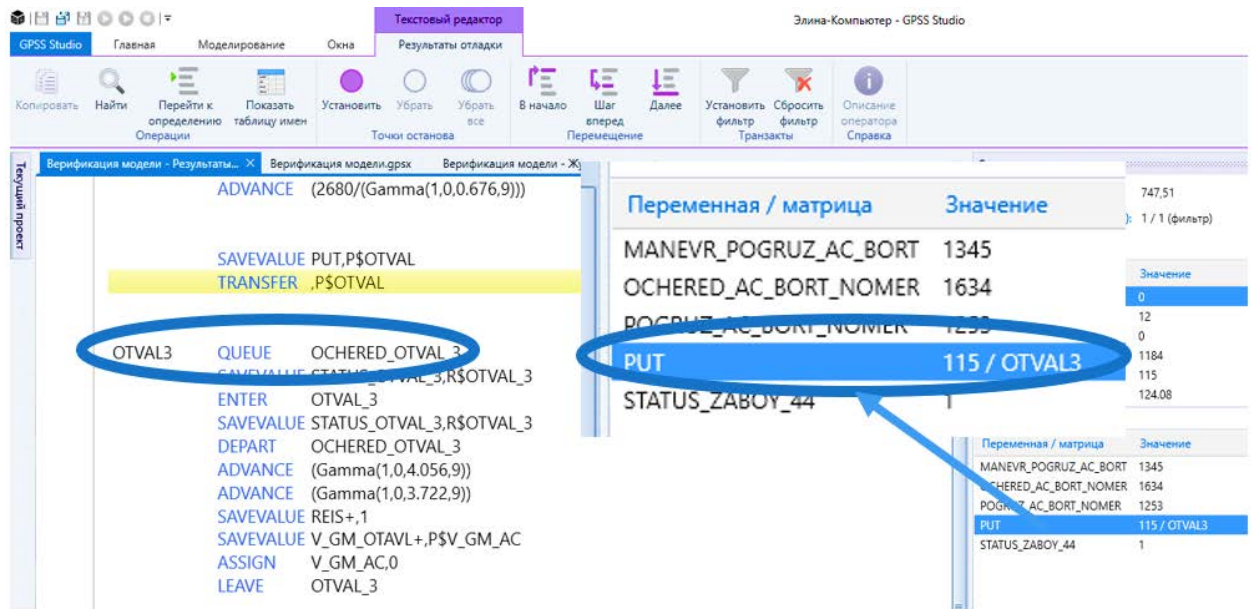


Рисунок 2.19 – Прохождение транзактом-автосамосвалом блока TRANSFER

Прибыв в Отвал №3, транзакт-автосамосвал вначале проходит блок QUEUE, а затем блок SAVEVALUE с переменной «STATUS_OTVAL_3» которое описывает количество свободных мест на Отвале №3. Из Рисунка 2.20 видно, что на момент поступления транзакта-автосамосвала, значение переменной STATUS_OTVAL_3 равно двум. Это означает, что на Отвале №3 есть два свободных места и транзакт-автосамосвал может занять одно из них.

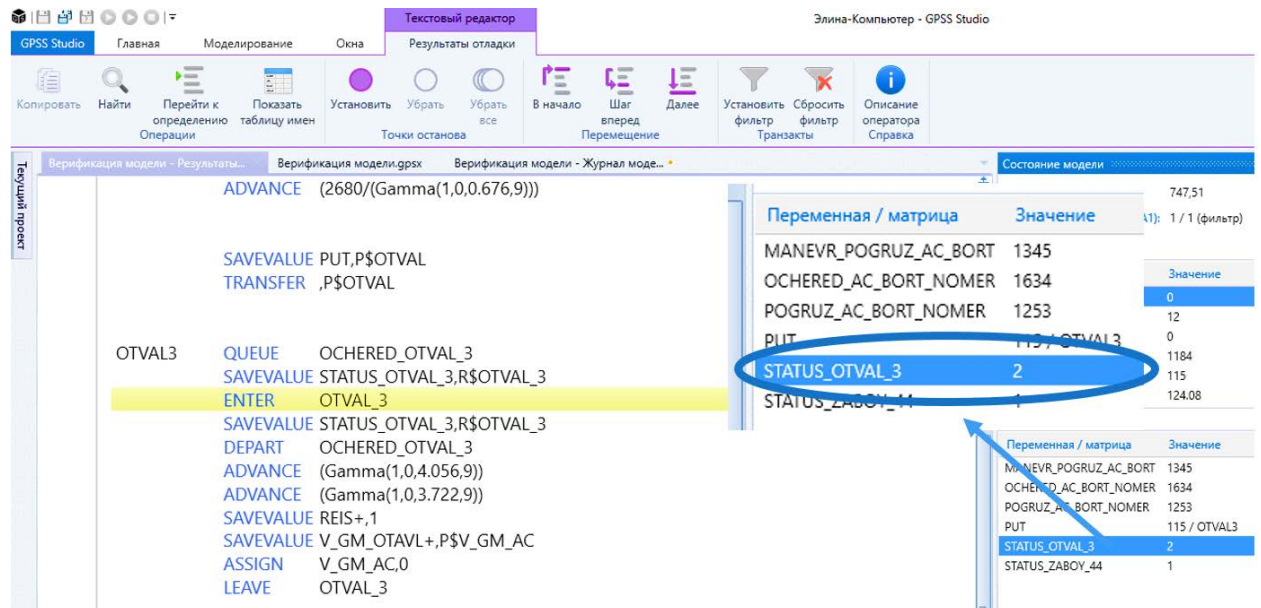


Рисунок 2.20 – Проверка количества свободных мест на Отвале №3

При занятии места транзактом-автосамосвалом (прохождение блока ENTER) значение переменной STATUS_OTVAL_3 изменится и станет равно единице (Рисунок 2.21), что соответствует логической блок-схеме.

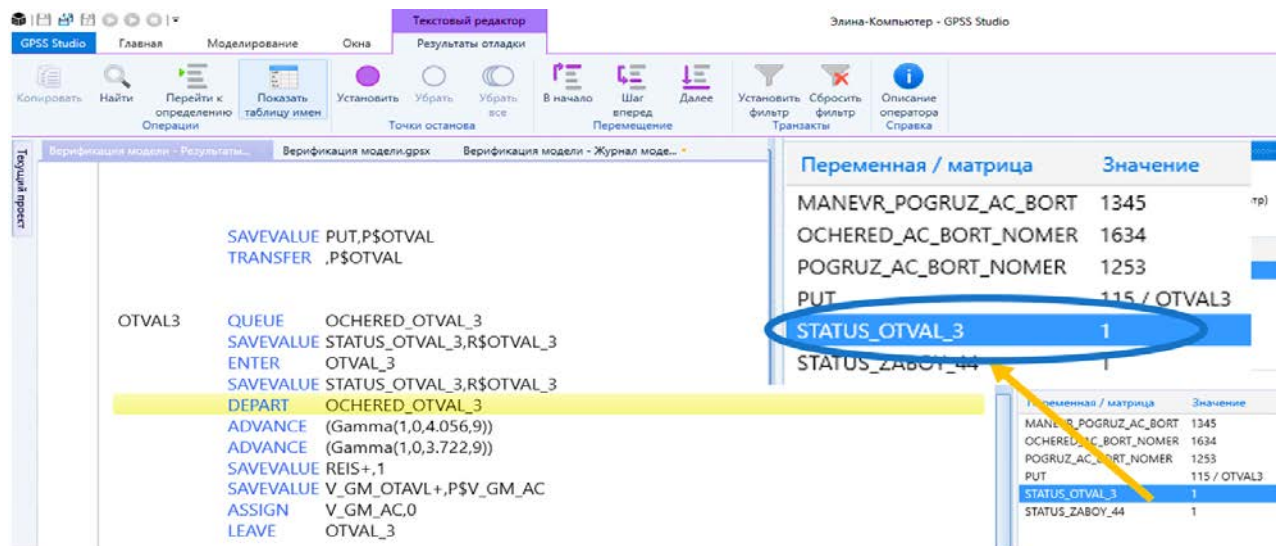


Рисунок 2.21 – Занятие свободного места транзактом-автосамосвалом на Отвале №3

При нахождении в первом блоке ADVANCE транзакта-автосамосвала (Рисунок 2.22), отображается процесс выполнения манёвровых операций перед разгрузкой, что соответствует логической блок-схеме.

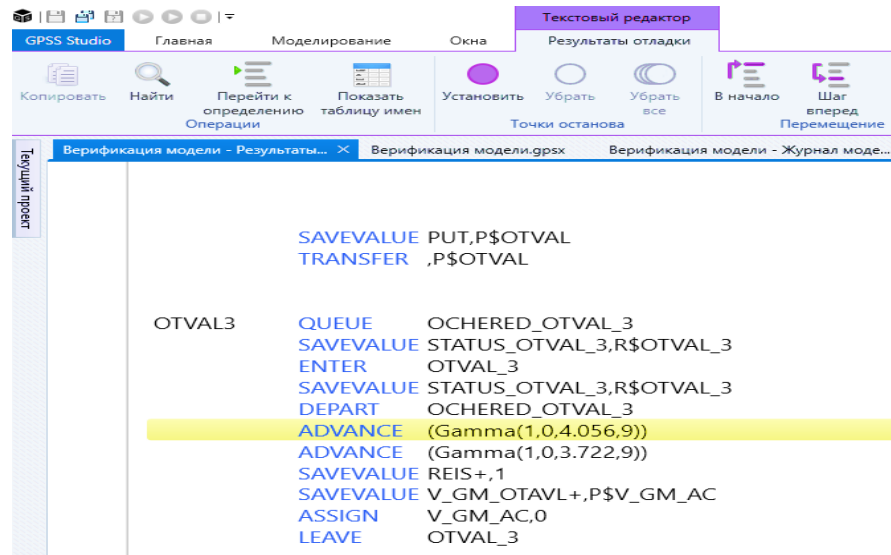


Рисунок 2.22 – Нахождение транзакта-автосамосвала в первом блоке ADVANCE (выполнение маневровых работ перед разгрузкой)

Далее, при нахождении во втором блоке ADVANCE транзакта-автосамосвала (Рисунок 2.23), отображается процесс разгрузки автосамосвала, что соответствует логической блок-схеме.

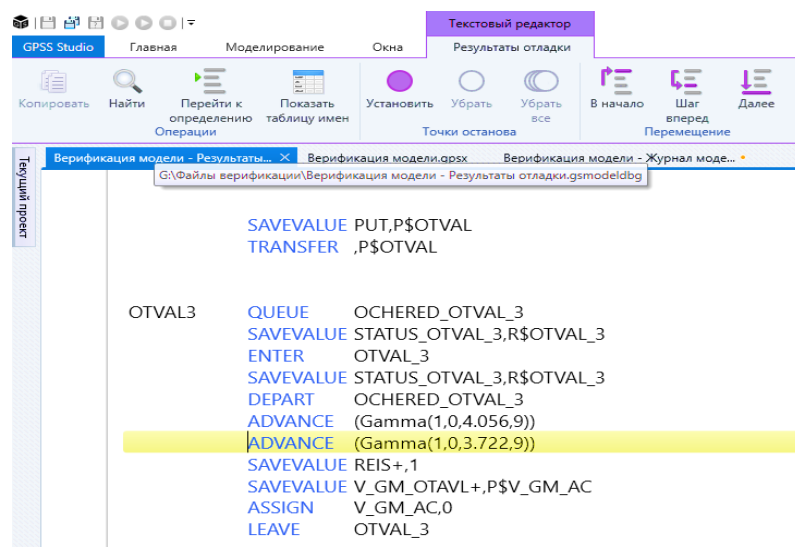


Рисунок 2.23 – Нахождение транзакта-автосамосвала во втором блоке ADVANCE (разгрузка автосамосвала)

После прохождения первого блока SAVEVALUE транзактом-автосамосвалом, значение переменной REIS измениться с нуля на единицу (Рисунок 2.24), так как произошла фиксация совершенного рейса транзактом-автосамосвалом на Отвал №3, что соответствует логической блок схеме.

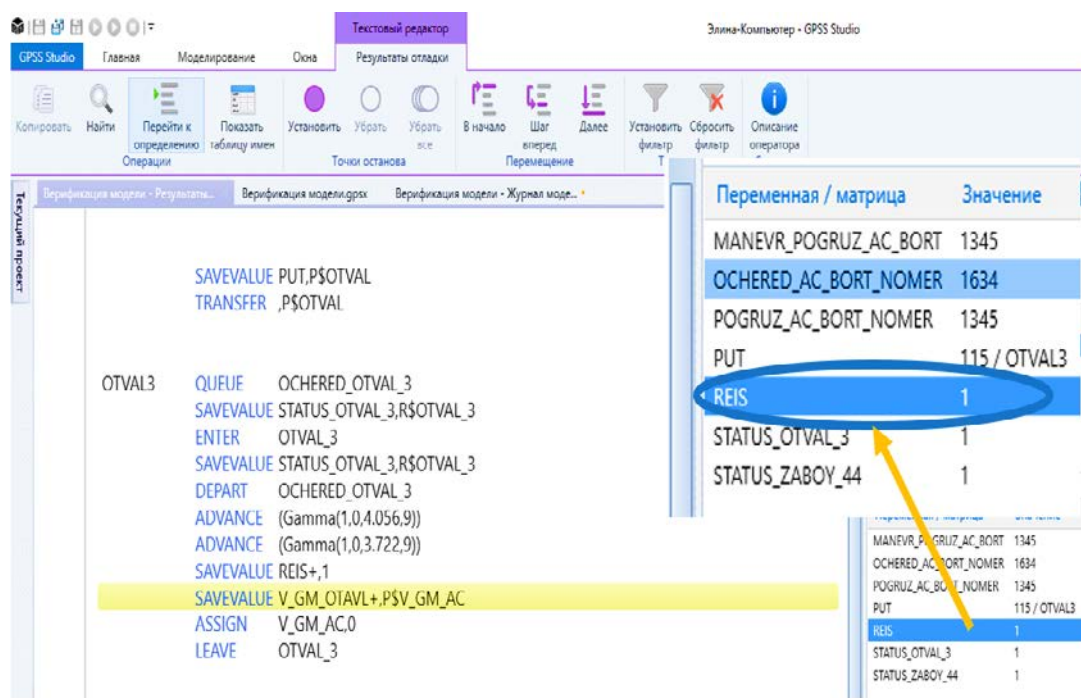


Рисунок 2.24 – Фиксация совершенного рейса транзактом-автосамосвалом на Отвал №3

После прохождения второго блока SAVEVALUE транзактом-автосамосвалом, значение переменной V_GM_OTVAL измениться с нуля на значение, равное значению переменной V_GM_AC (Рисунок 2.25), т.е. произойдет фиксация доставленного объема горных пород автосамосвалом на Отвал №3, что соответствует логической блок схеме.

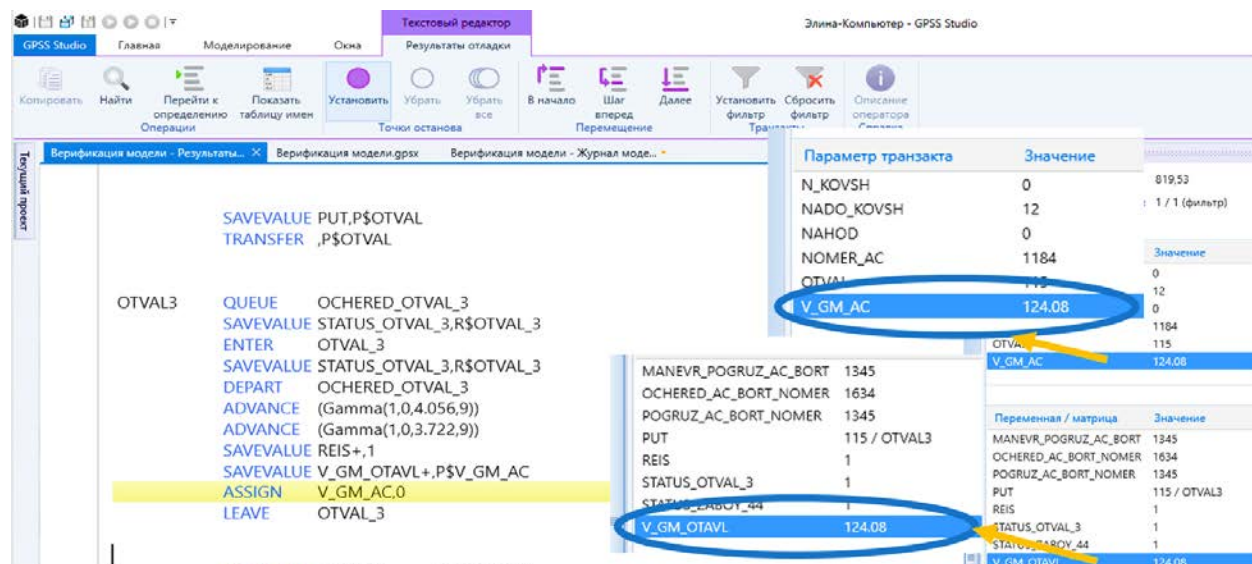


Рисунок 2.25 – Фиксация доставленного объема горных пород транзактом-автосамосвалом на Отвал №3

По прохождению транзактом-автосамосвалом блока ASSIGN произойдет обнуление значения переменной V_GM_AC (Рисунок 2.26). Это означает, что кузов автосамосвала пуст, что соответствует логической блок схеме.

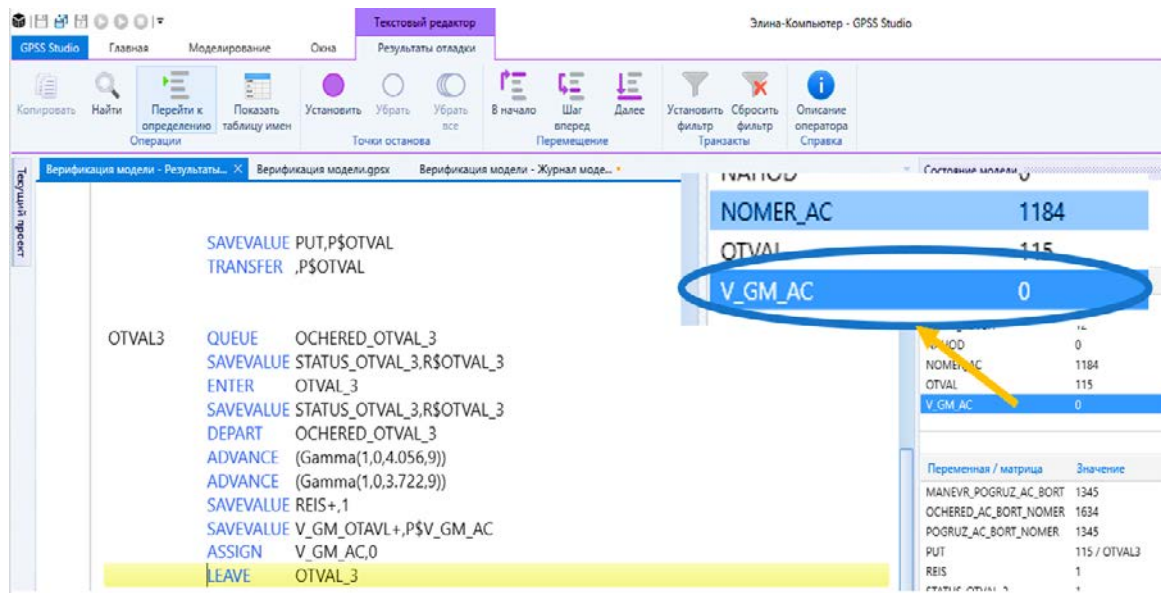


Рисунок 2.26 – Обнуление значения объема горных пород в кузове транзакта-автосамосвала

По прохождению транзактом-автосамосвалом блока LEAVE произойдет изменение значения переменной STATUS_OTVAL_3, которое станет равно двум (Рисунок 2.27), т.е. произошло освобождение занятого места на Отвале №3 транзактом – автосамосвалом, что соответствует логической блок - схеме.

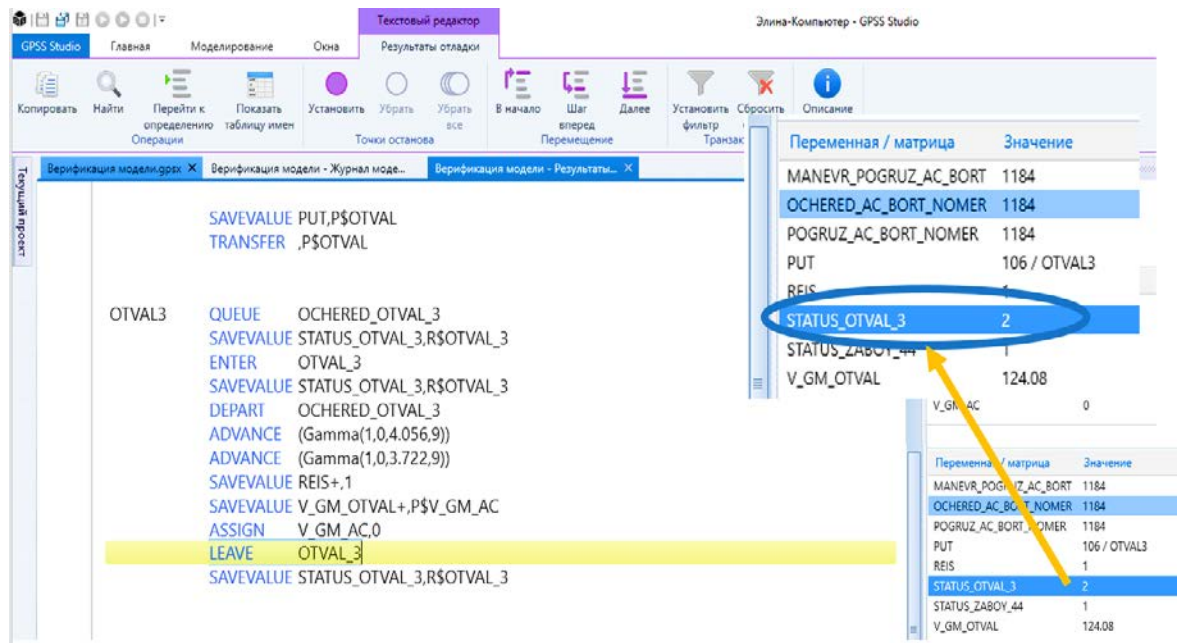


Рисунок 2.27 – Освобождение занятого места транзактом-автосамосвалом на Отвале №3

При проведении подобным образом пошагового прогона данного сегмента модели выясняется, что сегмент модели полностью соответствует логической блок-схеме, а значит, построен верно. Аналогичным образом был проведен пошаговый прогон остальных сегментов модели. В результате проведения верификации выяснилось, что все сегменты модели полностью соответствует логическим блок-схемам, а значит, построены правильно. Тем самым можно утверждать, что построенная модель прошла этап верификации.

Валидация является важнейшим этапом имитационного моделирования. В отличие от верификации, она отвечает на вопрос: «Является ли имитационная модель допустимым представлением реальной системы?» Чаще всего сравнивают поведение модели и реальной системы при одном и том же входном

воздействии. Если данные по реальной системе отсутствуют, то полноценную проверку провести нельзя. Однако можно использовать экспертные знания [65].

Оценивают правильность отображения моделью реальной системы и уточняют модель до тех пор, пока расхождение между поведением системы и ее модели не будет признано приемлемым. Этот процесс называется калибровкой модели. Как правило, максимальное расхождение не должно быть $\Delta_{\max} \leq 10\%$. Это позволит начать вычислительные эксперименты [65].

Для валидации используют [65]:

- Метод контрольных задач, при котором сравнивают данные, полученные в результате моделирования, с аналогичными данными, полученными в результате эксплуатации системы.
- Метод объемного баланса, при котором сравнивают преобразование объемов системой и моделью.
- Сравнение результатов аналитических расчетов с результатами имитационного моделирования.
- Сопоставление результатов эксплуатации системы за реальное время с результатами моделирования за тоже модельное время.
- Показ результатов моделирования эксперту по системе, не знакомому с методом их получения.

Для валидации нашей модели используем метод контрольных задач, так как имеются данные, полученные в результате эксплуатации системы. Сравнивались реальные данные, полученных с разреза ООО СП «Барзасское товарищество», с данными, полученными на аналитико-имитационной модели (Рисунок 2.28).

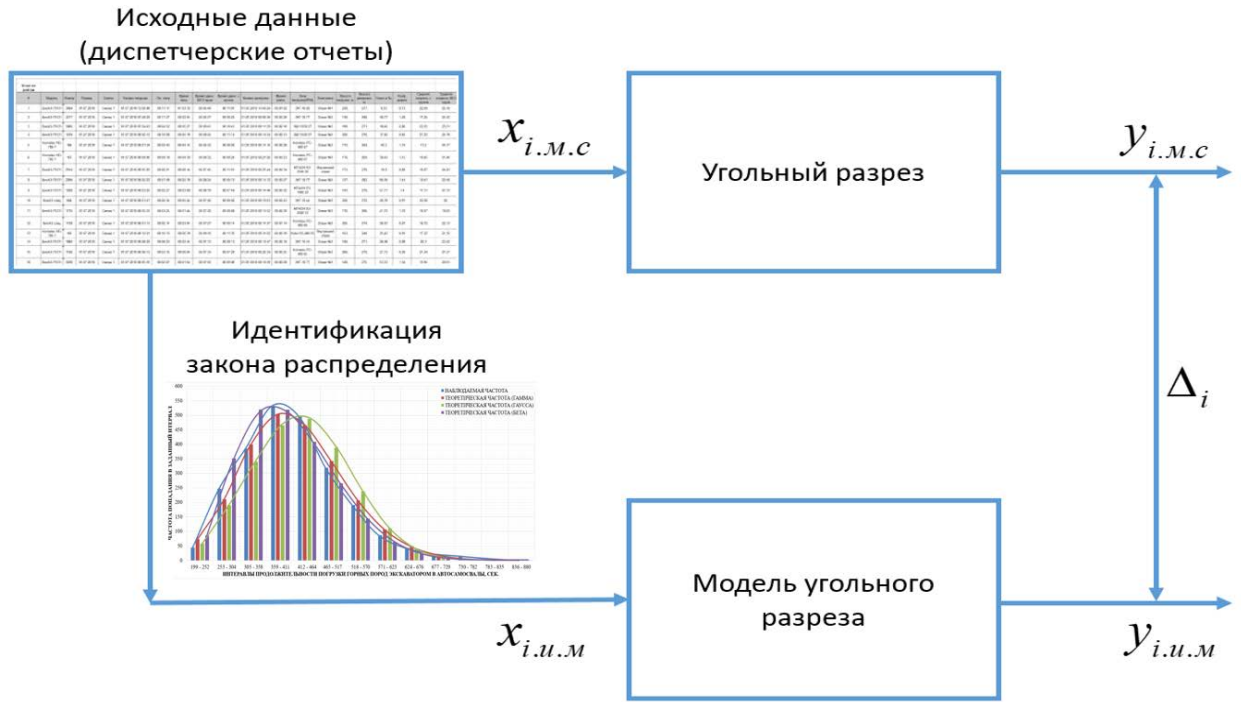


Рисунок 2.28 – Схема проведения валидации

Расчет относительной погрешности i -го выходного параметра определялся с использованием формулы (2.40), при этом сохранялось равенство входных значений, используемых в моделируемой системе (параметры горных машин и их количество, физико-механические свойства горной массы и горнотехнические условия эксплуатации), и аналитико-имитационной модели, то есть $x_{i.m.c} = x_{i.u.m}$. В качестве входных параметров использованы горнотехнические условия эксплуатации, физико-механические свойства горных пород и параметры эксплуатируемых горных машин на угольном разрезе.

$$\Delta_i = \frac{|y_{i.m.c} - y_{i.u.m.}|}{y_{i.m.c}} \cdot 100\%, \quad (2.40)$$

где $x_{i.m.c}$ – значение i -го параметра на входе в моделируемой системе; $x_{i.u.m}$ – значение i -го параметра на входе в модели системы; $y_{i.m.c}$ – значение i -го параметра на выходе в моделируемой системе; $y_{i.u.m}$ – значение i -го параметра на выходе в модели системы.

В качестве выходных параметров сравнивали: среднее время погрузки горной массы каждым экскаватором в автосамосвалы ($\tilde{t}_{позр.}$), [сек]; коэффициент использования каждого экскаватора ($k_{экс.}$); общее количество совершенных рейсов автосамосвалами (N_p), [шт.]; среднее время нахождения в очереди автосамосвалов на погрузку к каждому экскаватору ($\tilde{t}_{оч.позр.}$), [сек]. Период моделирования составил 24 часа.

При этом были приняты в качестве допущения отсутствие внутрисменного перегоня автосамосвалов между экскаваторами. Результаты валидации представлены в Таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Результаты валидации

Параметр	$Y_{i.м.с}$	$Y_{i.и.м}$	Δ_i
Забой №44			
$k_{экс.}$	0,660	0,694	5,18
$\tilde{t}_{позр.}$	249	248	0,40
$\tilde{t}_{оч.позр.}$	197	180	8,62
Забой №32			
$k_{экс.}$	0,440	0,439	0,27
$\tilde{t}_{позр.}$	210	209	0,47
$\tilde{t}_{оч.позр.}$	87	82	5,74
N_p	112	111,878	0,10

В результате максимальное отклонение реальных и модельных результатов ($\Delta_{\max}$) составило 8,62%.

Таким образом, в результате проведенной верификации и валидации можно полагать, что разработанная модель адекватно отображает моделируемую систему, и на ней можно проводить имитационные эксперименты.

2.3 Оценка степени влияния внеплановых простоев на добычу забоя угольного разреза

Разработанная аналитико-имитационная модель позволяет оценивать объемы вывезенной горной породы как с отдельного забоя при помощи ЭАК, так и со всего разреза, включающего несколько забоев и ЭАК. Дополнительно модель позволяет анализировать и другие параметры: степень использования экскаваторов, текущий, средний и максимальный размер очереди автосамосвалов на погрузку/разгрузку, среднее и максимальное время простоя автосамосвалов в очереди.

Разработанная аналитико-имитационная модель позволяет оценивать объемы вывезенной горной породы с учетом внеплановых простоев. Для примера на Рисунке 2.29 представлены результаты одного из вычислительных экспериментов по оценке суточного объема добычи из одного забоя с учетом различных видов простоев. Имитировалась работа одного ЭАК, действующего в условиях угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество». Исследуемый ЭАК включал в себя один экскаватор марки Hitachi EX-2500 (вместимость ковша 15 м³) и четыре автосамосвала марки БелАЗ-7513 (грузоподъемность 130 тонн). Использовалась тупиковая схема установки на погрузку. После погрузки автосамосвалы транспортировали добытый уголь, двигаясь со средней скоростью 4,33 м/с на угольный склад. Дальность транспортирования – 1380 м. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращались обратно к экскаватору, двигаясь со средней скоростью 5,31 м/с. При проведении экспериментов учитывались плановые

и внеплановые простои горных машин. Доверительная вероятность принята 95%.

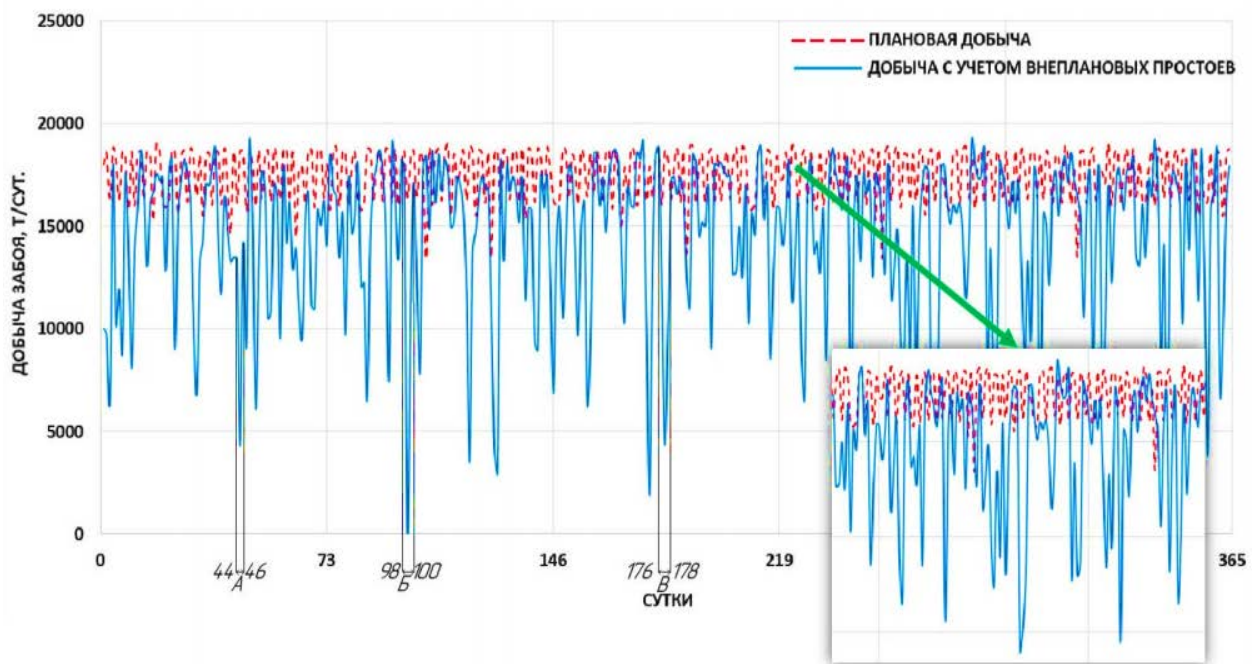


Рисунок 2.29 – Динамика суточной добычи забоя с учетом простоев

Пунктирная линия отображает плановую добычу забоя, сплошная – добычу с учетом внеплановых простоев технического и организационного характера. Видно, что плановая добыча отличается от добычи с учетом внеплановых простоев, где возникают «периоды провалов добычи». Так, в период (А), в течение 44-46 суток происходили простои, связанные с заменой гидроцилиндра подъема стрелы и гидромотора экскаватора, протяжкой колес автосамосвалов, ремонтом их пневмогидроподвески (ПГП), охлаждением и ремонтом гидросистемы у автосамосвалов. В период (Б), 98-100 суток проводились ремонт двигателя внутреннего сгорания (ДВС), замена рукава высокого давления (РВД), ремонт гидравлической части экскаватора, подкачка колеса, ремонт гидросистемы, ходовой части и системы управления автосамосвалов и т.д.

Аналогичным образом проведены вычислительные эксперименты по пяти разрезам Кузбасса. В результате отклонение планируемой годовой добычи от добычи с учетом внеплановых простоев составило в среднем $16,72 \approx 17\%$, при доверительной вероятности 95%.

2.4 Выводы по главе

1. Произведена систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов на плановые и внеплановые (технические и организационные).
2. Установлено, что периодичности и продолжительности внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов соответствует Гамма распределению с ограниченной правосторонней областью.
3. Разработана аналитико-имитационная модель функционирования ЭАК с применением теории массового обслуживания и выполнена ее программная реализация с помощью языка имитационного моделирования GPSS World, что позволяет оценивать суточную производительность ЭАК и удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы с учетом внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов. Установлено, что максимальная относительная погрешность выходных модельных данных по сравнению с данными диспетчерских отчетов не превышает критического значения в 10%.
4. Установлено, что расхождение суточной плановой добычи с добычей при учете внеплановых простоев составляет в среднем 17,2% при доверительной вероятности 95,0%.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭАК

3.1 Оценка степени влияния предложений по минимизации внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов на эксплуатационную производительность ЭАК

Для минимизации внеплановых простоев на угольных разрезах разрабатывают и применяют специальные мероприятия (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Мероприятия по минимизации простоев,
применяемые на угольных разрезах Кузбасса

Направление мероприятий	Мероприятия
Улучшение работы автотранспорта	Сократить внутрисменные перегоны а/м
	Контролировать соблюдение скоростного режима водителями автотранспорта
Охрана труда и техника безопасности	Неисправный автомобиль не выпускать на линию до устранения неисправности
	При обнаружении неисправности на линии автосамосвал отстранять от работы до её устранения
	Контролировать работу автосамосвалов на линии
Повышение производительности труда и оборудования	Выявление не рационального использования рабочего времени с помощью хронометражей
	Организация работы экскаваторов в подготовленных забоях на два подъезда с удовлетворительным состоянием подъездных и забойных автодорог
	Рациональная расстановка автомобилей под экскаваторами с целью исключения простоев в ожидании погрузки

Повышение производительности труда и оборудования	Проведение контрольных взвешиваний перевозимой горной массы с целью недопущения недогруза и перегруза автомобилей
	Внутрисменный контроль полноты загрузки технологических автосамосвалов, а также наполняемость ковша экскаватора (визуальный осмотр, сбор данных с приборов)
	Поддерживать в исправном состоянии оборудование для проведения ежесменного обслуживания автомобилей на западной промплощадке, с целью сокращения перегонов технологических автомобилей с горного участка в ремонтный бокс автоколонны. Замена физически устаревшего оборудования. Проработать вопрос с бригадой о необходимости рациональной отгрузки горной массы (заполнение ковша, угол поворота стрелы).
	Ежесменный контроль за окончанием и началом рабочих смены Подготовка рабочих площадок, проведение планировки подъездов к экскаваторам во время технологических перерывов

Как правило, эти мероприятия проводят после ведения горных работ и выявления снижения уровня добычи угля. Разработанная аналитико-имитационная модель позволяет на ранней стадии опробовать меры по минимизации простоев, определить степень их влияния на добычу (вскрышу) и затем уже применить наиболее эффективные мероприятия на практике.

В качестве примера использования аналитико-имитационной модели для минимизации простоев экскаватора и автосамосвалов в модели с описанными условиями (см. раздел 2.5) организована работа экскаватора в подготовленных

забоях на два подъезда с удовлетворительным состоянием подъездных и забойных автодорог (Рисунок 3.1).

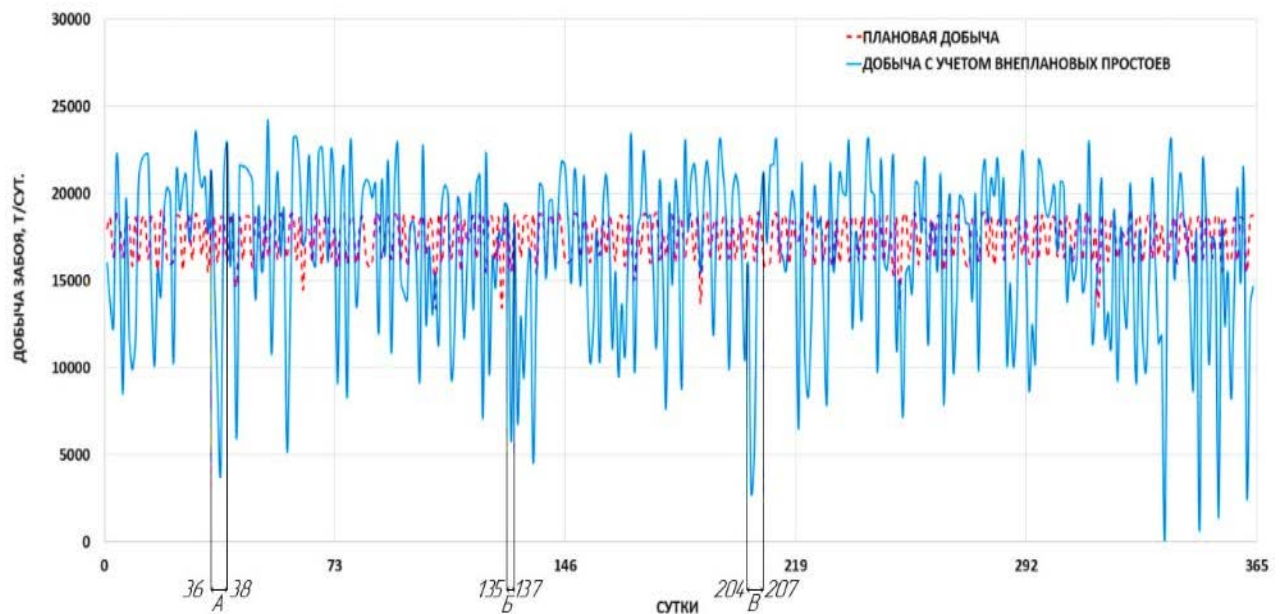


Рисунок 3.1 – Динамика добычи забоя с учетом различных видов простоев (организация работы экскаватора на два подъезда)

Установлено, что организация работы экскаватора на два подъезда не только уменьшит отклонение плановой добычи забоя от добычи с учетом внеплановых простоев на $11,66 \approx 12\%$, но и увеличит добычу забоя в среднем на $5,43\%$.

Таким образом, использование разработанной модели позволяет исследовать влияние внеплановых простоев горных машин на эксплуатационную производительность, оценивать предложения по их минимизации и исключать потери угля еще до начала ведения горных работ.

3.2 Исследование характера влияния периодичности и продолжительности внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК

При исследовании внеплановых простоев, необходимо знать, какой характер имеет влияния продолжительности и периодичности простоя. Для условий ООО СП «Барзасское товарищество» исследуемый ЭАК включал в себя один экскаватор марки Hitachi EX-1900 (вместимость ковша $E_{\text{экс}}=11 \text{ м}^3$) и четыре автосамосвала марки БелАЗ-7513 (грузоподъемность $q_{\text{max}}=130$ тонн). Использовалась тупиковая схема установки на погрузку. После погрузки автосамосвалы транспортировали вскрышную породу, двигаясь со средней технической скоростью $\tilde{V}_{\text{ср.}}=6,1 \text{ м/с}$ на отвал. Дальность транспортирования $S = 2680 \text{ м}$. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращались обратно к экскаватору, двигаясь со средней технической скоростью $\tilde{V}_{\text{ср.}}=6,9 \text{ м/с}$. Плановые простои горных машин были исключены из рассмотрения. Изменялись периодичность и продолжительность внеплановых простоев согласно хронометражным данным. На Рисунках 3.2 – 3.5 представлены результаты исследования по характеру влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК простоев экскаватора, связанного с ремонтом гидравлического оборудования и ремонтом автосамосвалов, связанные с ремонтом ДВС. Период моделирования составил 2,5 года.

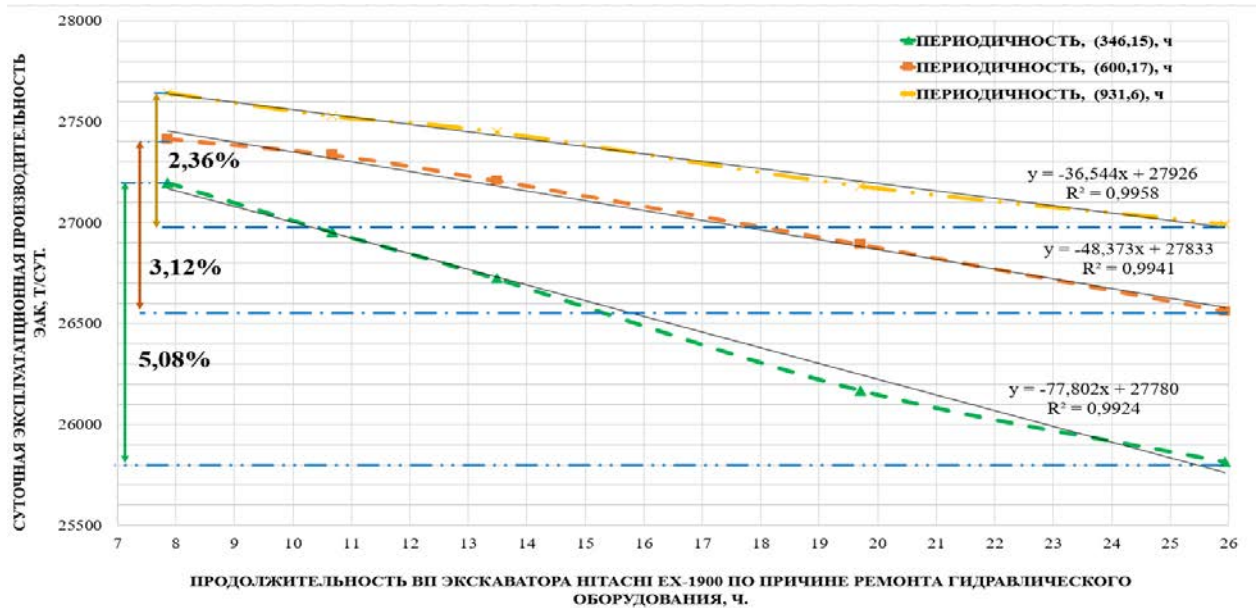


Рисунок 3.2 – Ремонт гидравлического оборудования экскаватора Hitachi EX-1900 (продолжительность)

Из рисунка 3.2. видно, что увеличение продолжительности внепланового простоя экскаватора Hitachi EX-1900 по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 7 до 26 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 2,36-5,08%, при постоянных периодичностях между 346 и 931 часов соответственно.

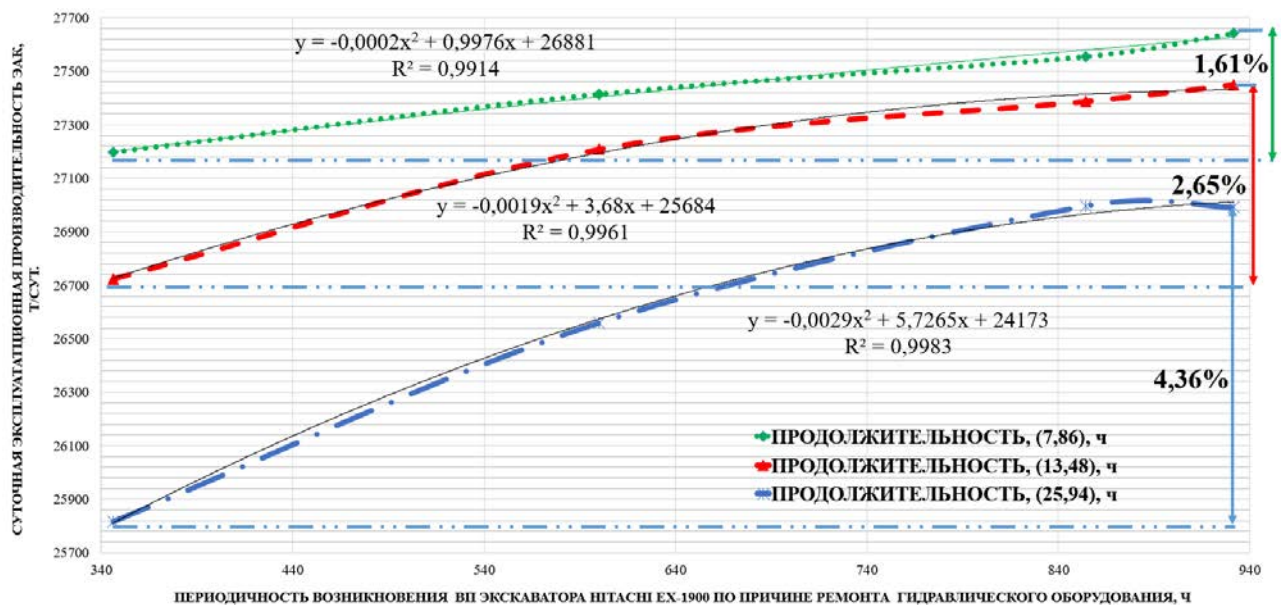


Рисунок 3.3 – Ремонт гидравлического оборудования экскаватора Hitachi EX-1900 (периодичность)

Из Рисунка 3.3 видно, что увеличение периодичности внепланового простоя экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 340 до 936 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 1,61-4,36%, при постоянных продолжительностях между 7,86 и 25,94 часов соответственно.

Из Рисунка 3.4 видно, что увеличение продолжительности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 3 до 392 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,79-25,61%, при постоянных периодичностях между 1623,3 и 19265,6 часов соответственно.

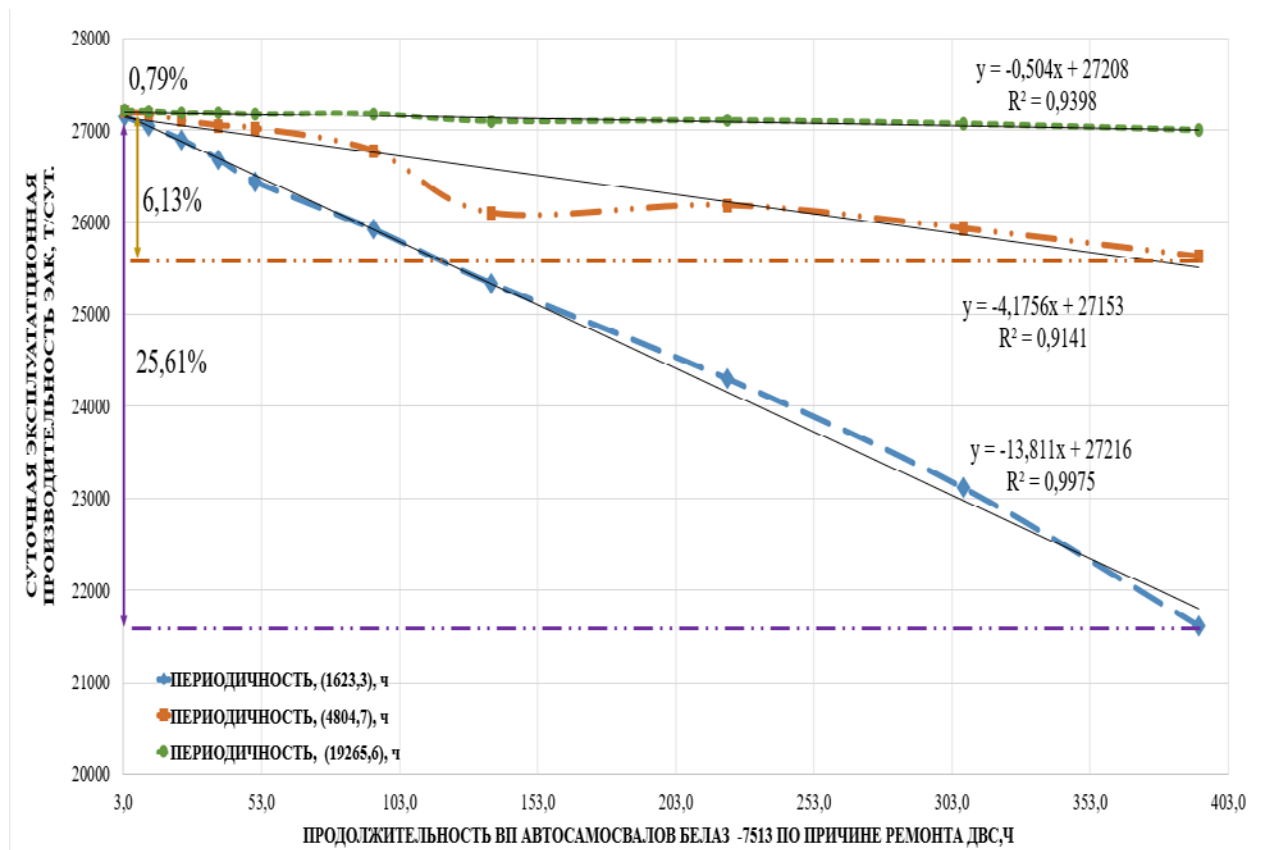


Рисунок 3.4 – Ремонт ДВС автосамосвала БелАЗ-7513 (продолжительность)

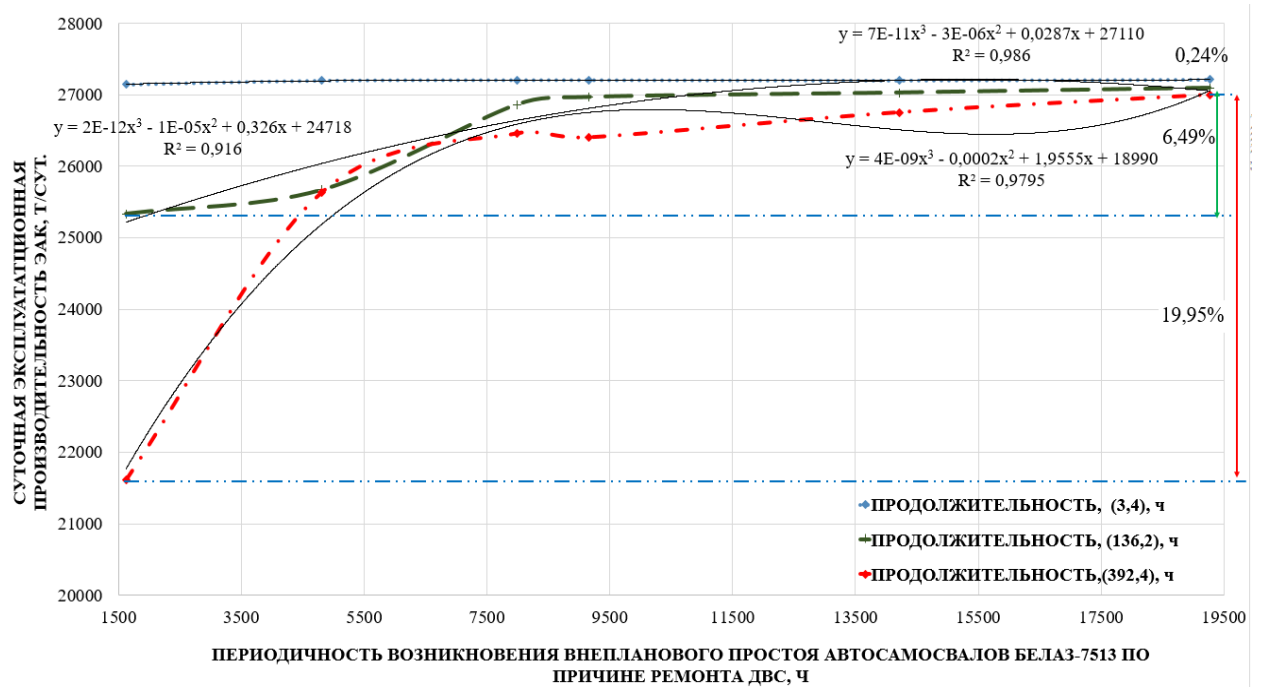


Рисунок 3.5 – Ремонт ДВС автосамосвала БелАЗ-7513 (периодичность)

Из Рисунка 3.5 видно, что увеличение периодичности внеплановых простоев автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 1623 до 19295 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,24-19,95%, при постоянных продолжительностях между 3,4 и 392,4 часов соответственно.

3.3 Разработка критерия оценки влияния периодичности и продолжительности внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК

Учет полного множества внеплановых простоев при оптимизации параметров горных машин процесс достаточно трудоемкий и требует знания вероятностных законов распределения этих простоев с соответствующими параметрами. Также применение мер по минимизации всех возможных простоев с целью увеличения рабочего времени работы автосамосвалов требует значительных вложений. В связи с этим возникает задача выявления из всего множества внеплановых простоев части тех, которые в наибольшей степени влияют на эксплуатационную

производительность ЭАК. Согласно принципу Парето (принцип дисбаланса), лишь меньшинство причин внеплановых простоев (20%) в большинстве (80%) влияют на эксплуатационную производительность ЭАК [90, 91].

Одним из самых распространенных и проработанных формализмов выявления степени влияния факторов на отклик в моделях, учитывающих вероятностные процессы, является дисперсионный анализ (ANOVA) [50, 92]. Так как уровнями каждого фактора (вероятностного простоя) являются периодичность возникновения простоя и его продолжительность, применим двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями, используя программное обеспечение MS Excel. При этом примем, что фактор A_i – математическое ожидание продолжительности i -го вероятностного простоя, [сек]; фактор B_j – математическое ожидание периодичности возникновения j -го вероятностного простоя; отклик Y_{ij} – суточная эксплуатационная производительность ЭАК [т/сут.].

Выборочный коэффициент детерминации каждого из факторов, показывающий степень его влияния, определяется по формуле:

$$\tilde{\rho}_k^2 = \frac{\tilde{\sigma}_k^2}{\tilde{\sigma}_Y^2}, \quad (3.1)$$

где: $\tilde{\sigma}_k^2$ – дисперсия групповых средних по k -ому фактору; $\tilde{\sigma}_Y^2$ – общая выборочная дисперсия.

Для расчета значимости влияния вида вероятностного простоя на эксплуатационную производительность ЭАК предложен критерий:

$$K_i = \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{\rho}_k^2}{N} = \frac{\tilde{\rho}_A^2 + \tilde{\rho}_B^2}{2}, \quad (3.2)$$

где $\tilde{\rho}_A^2$ – выборочный коэффициент детерминации фактора - продолжительность простоя, $\tilde{\rho}_B^2$ – выборочный коэффициент детерминации фактора – периодичность простоя при следующих ограничениях: $\tilde{\rho}_A^2 \neq 0$; $\tilde{\rho}_B^2 \neq 0$.

3.4 Ранжирование степени влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК

В эксперименте, по разработанной в третьей главе аналитико-имитационной модели, имитировалась работа одного ЭАК, действующего в условиях угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество». Исследуемый ЭАК включал в себя один экскаватор марки Hitachi EX-1900 (емкость ковша $E_{\text{экс}} = 11 \text{ м}^3$) и четыре автосамосвала марки БелАЗ-7513 (грузоподъемность $q_{\text{max}} = 130$ тонн). Использовалась тупиковая схема установки на погрузку. После погрузки автосамосвалы транспортировали вскрышную породу, двигаясь со средней технической скоростью $\tilde{V}_{\text{ср.}} = 6,1 \text{ м/с}$ на отвал. Дальность транспортирования $S = 2680 \text{ м}$. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращались обратно к экскаватору, двигаясь со средней технической скоростью $\tilde{V}_{\text{ср.}} = 6,9 \text{ м/с}$. Плановые простои горных машин были исключены из рассмотрения, при этом учитывались внеплановые простои, так как именно эти простои возникали при эксплуатации горных машин в данный период (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Внеплановые простои, учитываемые в эксперименте

Горная машина	Вид простоя
Экскаватор Hitachi EX-1900	- отсутствие автосамосвалов; - ремонт гидравлического оборудования; - ремонт рабочего оборудования; - ремонт ходовой и механической частей; - ремонт электрооборудования.

Автосамосвалы БелАЗ-7513	- ожидание погрузки; - ремонт двигателя внутреннего сгорания; - ремонт системы управления; - ремонт/замена автошин; - ремонт электрооборудования; - ремонт гидросистемы.
--------------------------	---

При проведении экспериментов поочередно изменялись значения математических ожиданий периодичности возникновения и продолжительности конкретного вероятностного простоя у горной машины. На выходе оценивалась суточная эксплуатационная производительность ЭАК [т/сут.]. Период моделирования составил 2,4 года.

Так как длительность процессов и простоев имеет вероятностный характер, то оценка суточной эксплуатационной производительности по одному прогону модели не даст правильных результатов. Для получения достоверного результата необходимо определить количество прогонов модели для получения с принятой доверительной вероятностью 0,95 значения суточной эксплуатационной производительности с принятой точностью ± 10 тонн. Расчет количества прогонов ($N_{прог.}$) определялся с использованием следующей формулы [65]:

$$N_{прог.} = \frac{t_{\alpha}^2 S^2}{\varepsilon^2} + 1, \quad (3.3)$$

где t_{α} – квантиль нормального распределения вероятностей; S^2 – оценка дисперсии случайной величины; ε – точность.

Для определения оценки дисперсии S^2 проведена серия пробных прогонов модели с изменением в каждом прогоне последовательности псевдослучайных чисел в генераторе, встроенном в GPSS Studio. Для этого в модель был введен управляющий оператор RMULT. В результате 50 пробных прогонов модели с помощью встроенного в MS Excel пакета анализа, используя инструмент

«Описательная статистика», определена оценка дисперсии случайной величины – суточной эксплуатационной производительности. Эта оценка составила $S^2 = 4868,2$ тонн.

Квантиль нормального распределения вероятностей t_α определялся по таблице критических точек Стьюдента [41]. При рассчитанном по формуле (3.4) числе степеней свободы:

$$df = k - m - 1, \quad (3.4)$$

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

На основе заданного уровня значимости и определенных степеней свободы ($df = 48$), определено, что $t_\alpha = 2,01$. Подставив значения в формулу (4.4), получено число требуемых прогонов, чтобы при принятой доверительной вероятности получить результат с заданной точностью $N_{прог.} = 197$ раз. Далее в экспериментах осуществлялись 197 прогонов модели и для определения каждого значения суточной эксплуатационной производительности ЭАК находилось среднее значение по формуле:

$$\tilde{Q}_{эак} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{прог.}} Q_i}{N_{прог.}}, \quad (3.5)$$

где i – номер прогона модели; Q_i – значение эксплуатационной производительности ЭАК при i -ом прогоне модели.

В результате анализа получены следующие данные (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты дисперсионного анализа внеплановых простоев
горных машин

Внеплановый простой	Фактор	Степень влияния фактора на показатель эффективности, %
Ожидание погрузки	Продолжительность	21,90
	Периодичность	34,50
Ремонт двигателя внутреннего сгорания автосамосвалов	Продолжительность	26,53
	Периодичность	34,64
Ремонт системы управления автосамосвалов	Продолжительность	36,71
	Периодичность	40,60
Ремонт / замена автошин	Продолжительность	26,17
	Периодичность	52,28
Ремонт электрооборудования автосамосвалов	Продолжительность	27,58
	Периодичность	41,37
Ремонт гидросистемы автосамосвалов	Продолжительность	24,53
	Периодичность	35,28
Отсутствие автосамосвалов	Продолжительность	69,20
	Периодичность	25,24
Ремонт рабочего оборудования экскаватора	Продолжительность	80,05
	Периодичность	12,41
Ремонт гидравлического оборудования экскаватора	Продолжительность	46,23
	Периодичность	45,37
Ремонт ходового и механического оборудования экскаватора	Продолжительность	72,87
	Периодичность	15,09
Ремонт электрооборудования экскаватора	Продолжительность	70,91
	Периодичность	12,90

С использованием разработанного критерия значимости (формула 3.2) проведено ранжирование простоев по убыванию степени влияния на суточную эксплуатационную производительность ЭАК (Таблица 3.4).

Таблица 3.4. – Ранжирование простоев по степени влияния на суточную эксплуатационную производительность ЭАК

Внеплановый простой	Критерий значимости влияния простоя, K_i , %
Отсутствие автосамосвалов	47,22

Ремонт рабочего оборудования экскаватора	46,23
Ремонт гидравлического оборудования экскаватора	45,80
Ремонт ходового и механического оборудования экскаватора	43,98
Ремонт электрооборудования экскаватора	41,91
Ремонт / замена автошин	39,23
Ремонт системы управления автосамосвалом	38,66
Ремонт электрооборудования автосамосвала	34,48
Ремонт двигателя внутреннего сгорания автосамосвала	30,58
Ремонт гидросистемы автосамосвала	29,90
Ожидание погрузки	28,20

Учет только наиболее значимых внеплановых простоев позволит упростить процесс оптимизации параметров горных машин за счет исключения множества простоев, оказывающих меньшее влияние на эксплуатационную производительность ЭАК. Также применение мер по минимизации только наиболее значимых простоев позволит сэкономить средства за счет исключения тех простоев, которые в незначительной степени влияют на эксплуатационную производительность ЭАК.

3.5 Выводы по главе

1) Установлено, что в условиях угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество»:

- организация работы экскаватора на два подъезда с учетом ВП позволит повысить добычу из забоя на 5,43%;
- увеличение продолжительности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 7 до 26 часов, линейно снижает

эксплуатационную производительность ЭАК на 2,36-5,08%, при постоянных периодичностях между 346 и 931 часов соответственно;

- увеличение периодичности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 340 до 936 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 1,61-4,36%, при постоянных продолжительностях между 7,86 и 25,94 часов соответственно;

- увеличение продолжительности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 3 до 392 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,79-25,61%, при постоянных периодичностях между 1623,3 и 19265,6 часов соответственно;

- увеличение периодичности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 1623 до 19295 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,24-19,95%, при постоянных продолжительностях между 3,4 и 392,4 часов соответственно.

2) Разработан критерий оценки влияния ВП на эксплуатационную производительность ЭАК (K_i), который определяется как среднее арифметическое между коэффициентами детерминации факторов периодичности и продолжительности ВП.

3) Произведено ранжирование внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов с использованием разработанного критерия K_i для условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество»: отсутствие автосамосвалов ($K_i \approx 47,22\%$); ремонт рабочего оборудования экскаватора ($K_i \approx 46,23\%$); ремонт гидравлического оборудования экскаватора ($K_i \approx 45,80\%$); ремонт ходового и механического оборудования экскаватора ($K_i \approx 43,98\%$); ремонт электрооборудования экскаватора ($K_i \approx 41,91\%$); ремонт/замена автошин ($K_i \approx 39,23\%$); ремонт системы управления автосамосвала ($K_i \approx 38,66\%$); ремонт электрооборудования автосамосвала ($K_i \approx 34,48\%$); ремонт двигателя внутреннего сгорания ($K_i \approx 30,58\%$); ремонт гидросистемы автосамосвала ($K_i \approx 29,90\%$); ожидание погрузки ($K_i \approx 28,20\%$).

4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО–МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭАК С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ И ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРИРОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИЧИН И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОСТОЕВ

4.1 Определение целевых функций и ограничений при оптимизации параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев

Входными параметрами для комплексной оптимизации являются 27 параметров горнотехнических условий эксплуатации ЭАК (множество R_{gt}), 2 параметра физико-механических свойств горных масс (множество R_{fm}), 8 параметров горных машин (факторы оптимизации) (множество R_{gm}) и 1 параметр ЭАК (фактор оптимизации) (множество R_{EAK}). Целевые функции оптимизации – эксплуатационная производительность ЭАК ($Q_{эак}$) и удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы (C) определяются путем аналитико-имитационного моделирования, поэтому описываются в виде неформализованной зависимости (4.1) и (4.2) от вышеперечисленных параметров.

$$Q_{эак} = f_1(R_{gt}, R_{fm}, R_{gm}, R_{EAK}), \quad (4.1)$$

$$Q_{эак} = f_2(R_{gt}, R_{gm}, R_{EAK}). \quad (4.2)$$

При следующих ограничениях: $h_{pen.} \leq 1,5 H_{ч.мах}$; $V_{мах} \leq 30$; $h_{pen.}$ – высота уступа, [м]; $H_{ч.мах}$ – максимальная высота черпания экскаватора, [м]; $V_{мах}$ – максимально допустимая средняя техническая скорость движения автосамосвалов на участках трассы, [км/ч]; (исходя из требований техники безопасности); $3 \leq N_k \leq 10$; N_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, [шт.]; $45 \leq q_{мах} \leq 130$ (добыча); $30 \leq q_{мах} \leq 450$ (вскрыша); $1 \leq N_{ac} \leq 20$; N_{ac} – количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором, [шт.]; $5 \leq E_{экс} \leq 11$

(добыча); $5 \leq E_{\text{экс}} \leq 35$ (вскрыша); $E_{\text{экс}}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³]; (исходя из рекомендаций других исследователей) [8-11, 15-21].

При оптимизации параметров ЭАК, как правило, применяют частные локальные оптимизационные модели с определением либо производительности ЭАК при ограничении стоимости добычи, либо с определением стоимости при ограничении производительности, на основе которых принимается решение об использовании того или иного парка горных машин с набором характеризующих их параметров [11, 16, 34, 35].

При оптимизации параметров ЭАК с одновременным учетом технологического (эксплуатационная производительность) и экономического (удельные затраты на транспортирование и погрузку горной массы) показателей эффективности, возникает противоречие: один параметр необходимо максимизировать, второй минимизировать. При этом необходимо учесть весомость каждого из показателей эффективности, в зависимости от требований исследователя. Ввиду того, что одновременно оптимизируется более одного параметра, возникает задача многокритериальной оптимизации. При решении такого рода задачи необходимо свести многокритериальную оптимизацию к однокритериальной. Для этого используют различные методы. Результаты обзора представлены в Таблице 4.1 [93-103].

Таблица 4.1 – Обзор методов сведения многокритериальной оптимизации к однокритериальной

Метод	Суть метода	Достоинства	Недостатки
Метод лексико-графической оптимизации	Суть заключается в том, что локальные критерии предварительно ранжируются по важности. Затем ищется наилучшее решение по наиболее важному критерию.	1) Не требуется однородности критериев; 2) Позволяет найти единственное оптимальное решение.	1) При использовании как правило принимается во внимание только первый – важнейший критерий; 2) Субъективность метода.

Метод главного критерия	Суть заключается в выборе доминирующего критерия из рассматриваемых, а остальные используются в качестве ограничений.	1) Простота при проведении расчетов и интерпретации результатов; 2) Малая затрата временных и машинных ресурсов; 3) Позволяет найти единственное оптимальное решение.	1) Не всегда можно определить главный критерий; 2) Возможна потеря эффекта влияния набора нескольких второстепенных критериев; 3) Необходимо обосновать ограничения.
Метод уступок	Суть метода аналогична методу лексикографической оптимизации	1) Простота в реализации; 2) Возможность контролировать ценной какой уступки в одном критерии приобретает выигрыш в другом частном критерии.	1) По причине заранее неизвестной взаимосвязи частных критериев, как правило не удаётся заранее назначить величины уступок; 2) Решение, полученное данным методом может оказаться не оптимальным по Парето; 3) Субъективность метода.

В результате проведенного анализа установлено, что для решения данной задачи наиболее эффективным является метод свертки, так как он:

- наиболее часто применяется для решения практических задач;
- прост в реализации;
- позволяет найти единственное решение.

При использовании метода свертки для поиска единственного решения, объединяющего эксплуатационную производительность и удельные затраты на

транспортирование и погрузку горных пород, необходимо выбрать способ свертки.

Как правило, применяют два вида свертки: аддитивную и мультипликативную [93]. Достоинства и недостатки подходов видов способов сведены в Таблицу 4.2 [96-105].

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ способов свертки

Способ свертки	Достоинства	Недостатки
Аддитивный	1) Часто применяется на практике.	1) Необходимо нормировать показатели; 2) Взаимная компенсация частных критериев; 3) Необходимо обосновать выбор нормирующего делителя.
Мультипликативный	1) Нет необходимости нормировать частные критерии; 2) Часто применяется на практике.	1) Взаимная компенсация частных критериев.

Таким образом, для поиска единственного решения с одновременным учетом противоречивых параметров, выбран мультипликативный способ свертки ввиду указанных достоинств.

На основе мультипликативного способа свертки комплексный критерий оптимизации в агрегированном виде показателей эффективности ЭАК, с выбором параметров экскаваторов и автосамосвалов определяется следующим образом:

$$F = \frac{Q_{\text{эак}}^{\alpha}}{C^{\beta}} \rightarrow \max, \quad (4.3)$$

где $Q_{\text{эак}}$ – суточная эксплуатационная производительность ЭАК, [т./сут.];
 C – удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород, [руб./т.];
 α – весовой коэффициент эксплуатационной производительности;

β – весовой коэффициент удельных затрат на погрузку и транспортирование горных пород. При следующих ограничениях: $\alpha + \beta = 1$; $\alpha \in (0;1)$; $\beta \in (0;1)$; $C \neq 0$.

Эксплуатационная производительность ЭАК и отдельных его элементов определяется с использованием аналитико-имитационной модели. Удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы определяется как сумма затрат на погрузку и транспортирование:

$$C = C_{\text{позр.}} + \sum_{i=1}^N \frac{C_{\text{трасп.}}}{N}, \quad (4.4)$$

где $C_{\text{позр.}}$ – удельные затраты на погрузку горных пород экскаватором в автосамосвалы, [руб./т]; $C_{\text{трасп.}}$ – удельные затраты на транспортирование горных пород автосамосвалами, [руб./т], N – количество автосамосвалов, [шт].

Удельные затраты на погрузку горных пород экскаватором в автосамосвалы определяется согласно [11, 17]:

$$C_{\text{позр.}} = \frac{C_{\text{мсм}}}{Q_{\text{экс.экс.}}}, \quad (4.5)$$

где $C_{\text{мсм}}$ – стоимость машиносмены экскаватора, [руб./смену], $Q_{\text{экс.экс.}}$ – эксплуатационная производительность экскаватора, [т./смену].

Удельные затраты на транспортирование горных пород автосамосвалом определяется согласно [17]:

$$C_{\text{трасп.}} = \frac{C_{\text{мса}}}{Q_{\text{экс.ас.}}}, \quad (4.6)$$

где $C_{мса}$ – стоимость транспортирования одной тонны горной породы, [руб./смену]; $Q_{эсп.ас.}$ – эксплуатационная производительность автосамосвала, [т./смену].

Значение весовых коэффициентов каждого критерия определяется методом ранжирования на базе экспертных оценок [116], который заключается в следующем. Пусть экспертиза проводится группой из L экспертов, которые являются квалифицированными специалистами в той области, где принимается решение. Метод ранжирования основан на том, что каждого эксперта просят расставить частные критерии проектируемого объекта в порядке их важности. Цифрой 1 обозначают наиболее важный частный критерий, цифрой 2 – следующий по важности частный критерий и т.д. Эти ранги преобразовываются таким образом, что ранг 1 – получает оценку m (число частных критериев), ранг 2 – оценку $m-1$ и т. д. до ранга m , которому присваивается оценка 1. Обозначим полученные оценки r_{ik} , где i – это номер i -го эксперта, k – это номер k -го критерия. Тогда результаты опроса экспертов можно свести в Таблицу 4.3.

Таблица 4.3. - Метод ранжирования значений
весовых коэффициентов критериев

Эксперт	Критерии			
	K1	K2	...	Km
1	r_{11}	r_{12}		
2	r_{21}	r_{22}		
...	...	...	...	...
L	r_{L1}	r_{L2}	...	r_{Ln}
$\sum_{j=1}^L r_{i,j}$	r_1	r_2	...	r_m

Тогда весовой коэффициент i -го критерия оптимизации определяется по формуле:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^L r_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_i} = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}, \quad (4.7)$$

где m – количество частных критериев; L – количество экспертов.

Для определения оптимальных параметров ЭАК, действующего в условиях ООО СП «Барзасское товарищество», проведено исследование в опрощенной постановке, когда как факторами являются только параметры автосамосвалов и ЭАК. Модель экскаватора (Hitachi EX-1900) не менялась. Количество автосамосвалов (N_{AC}) изменялось от 1 до 19 шт. Грузоподъемность автосамосвалов изменялась от 90 до 180 тонн. Внеплановые простои экскаваторов и автосамосвалов в ходе эксперимента были учтены. Это позволяет значительно снизить многовариантность оптимизационной задачи и найти её точное решение путём полного перебора, в конечном итоге обнаружить оптимальное значение.

Оптимизация проводилась в следующих горнотехнических условиях: дальность транспортирования: 2610 м; схема подъезда к экскаватору: тупиковая; схема подъезда автосамосвалов к экскаватору: одиночная; средневзвешенный продольный уклон трассы: 53,90%; тип горной породы: вскрышная порода, III категория. Моделирование осуществлялось с использованием разработанной аналитико-имитационной модели. Значения весовых коэффициентов принято 0,5. Период моделирования 6 месяцев. Результаты моделирования представлены на Рисунке 4.1.

На Рисунке 4.1 видно, что вариант сочетаний ЭАК с оптимальными параметрами с учетом внеплановых простоев обеспечивается следующим набором автосамосвалов: грузоподъемностью 90 тонн – 10 шт., грузоподъемностью 160 тонн – 1 шт. и грузоподъемностью 180 тонн – 1 шт.

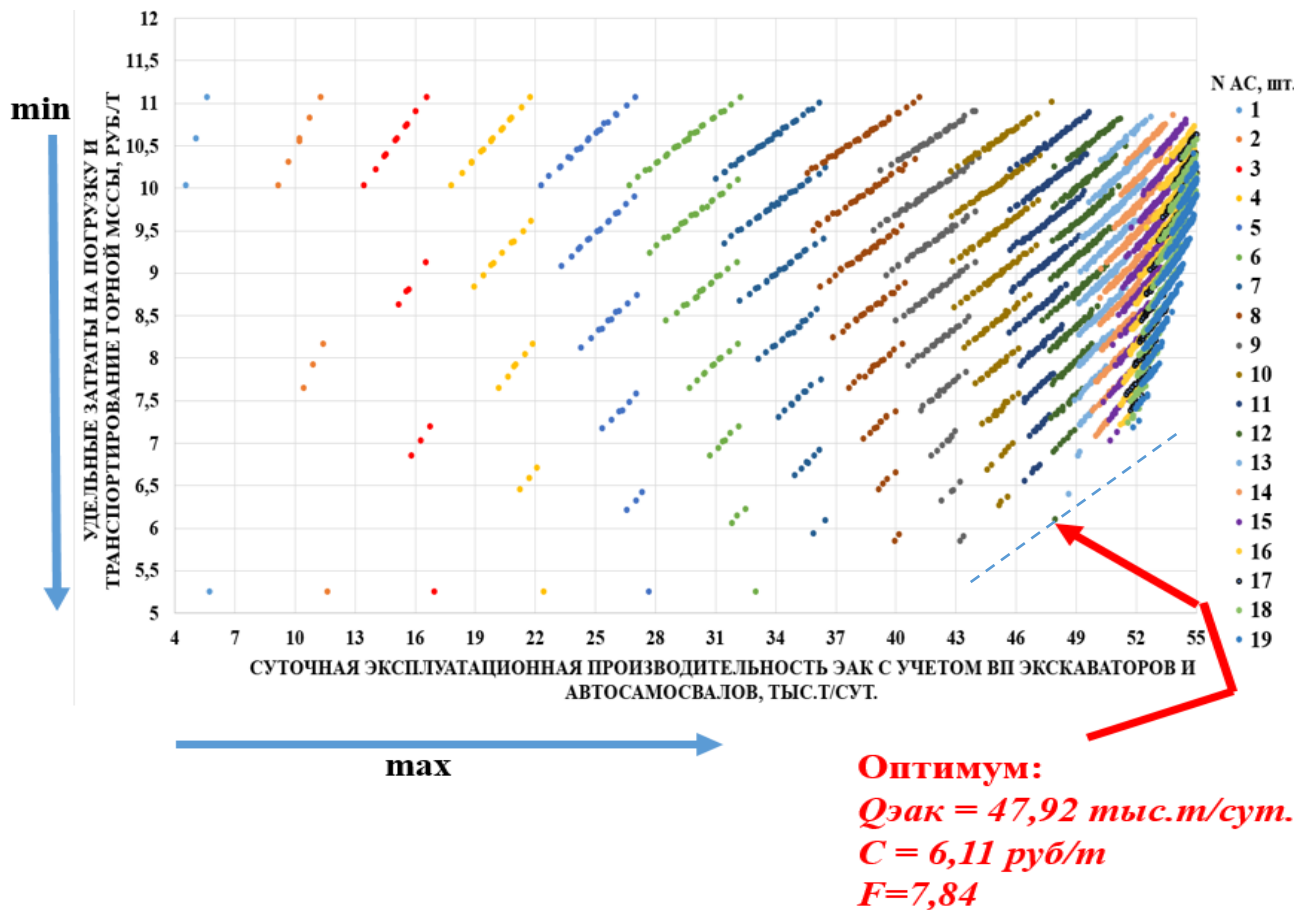


Рисунок 4.1 – Оптимизация параметров ЭАК по максимальной суточной эксплуатационной производительности с учетом внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов и минимальными удельными затратами на погрузку и транспортирование горной массы

Характер целевой функции в сложной аналитико-имитационной модели ЭАК, в которой есть обратные связи и разнородные заявки, позволяет говорить о неприменимости точных методов решения оптимизационных задач [103]. Численные методы на основе алгоритмов эвристического класса позволяют найти оптимальные параметры систем за кратчайшее время с высокой точностью, при этом нет необходимости в полном исследовании области допустимых значений и аналитическом описании целевой функции [102, 103]. Наиболее распространенным и проработанным является использование генетических алгоритмов. Классическая модель генетического алгоритма предложена в 1975 году Джоном Холландом, которая основана на принципах естественного отбора и наследования [103, 106-108]. Несмотря на то, что генетические алгоритмы относятся к

стохастическим методам, они успешно применяются для решения многих оптимизационных задач вне зависимости от числа параметров и в различных областях (экономических, технических и т.п.) [108]. Сложность применения генетического алгоритма заключается в трудности расчета функции полезности. Однако, данную трудность можно обойти путем использования аналитико-имитационной модели, которая будет рассчитывать необходимую функцию. В работах [103, 106-108] доказано, что генетический алгоритм обладает большей временной эффективностью, чем простой метод перебора, а также рядом достоинств в сравнении с другими численными методами, решения оптимизационных задач. Таким образом, для поиска оптимальных параметров ЭАК выбран генетический алгоритм ввиду ранее указанных достоинств. Функция полезности для данного алгоритма будет рассчитываться с использованием аналитико-имитационной модели. Все это позволит определять оптимальные параметры ЭАК за приемлемое время и с высокой точностью.

4.2 Разработка программно-методического обеспечения для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев

Для поиска оптимальных параметров ЭАК с использованием аналитико-имитационной модели разработан программно-методический комплекс, структурная схема которого представлена на Рисунке 4.2.

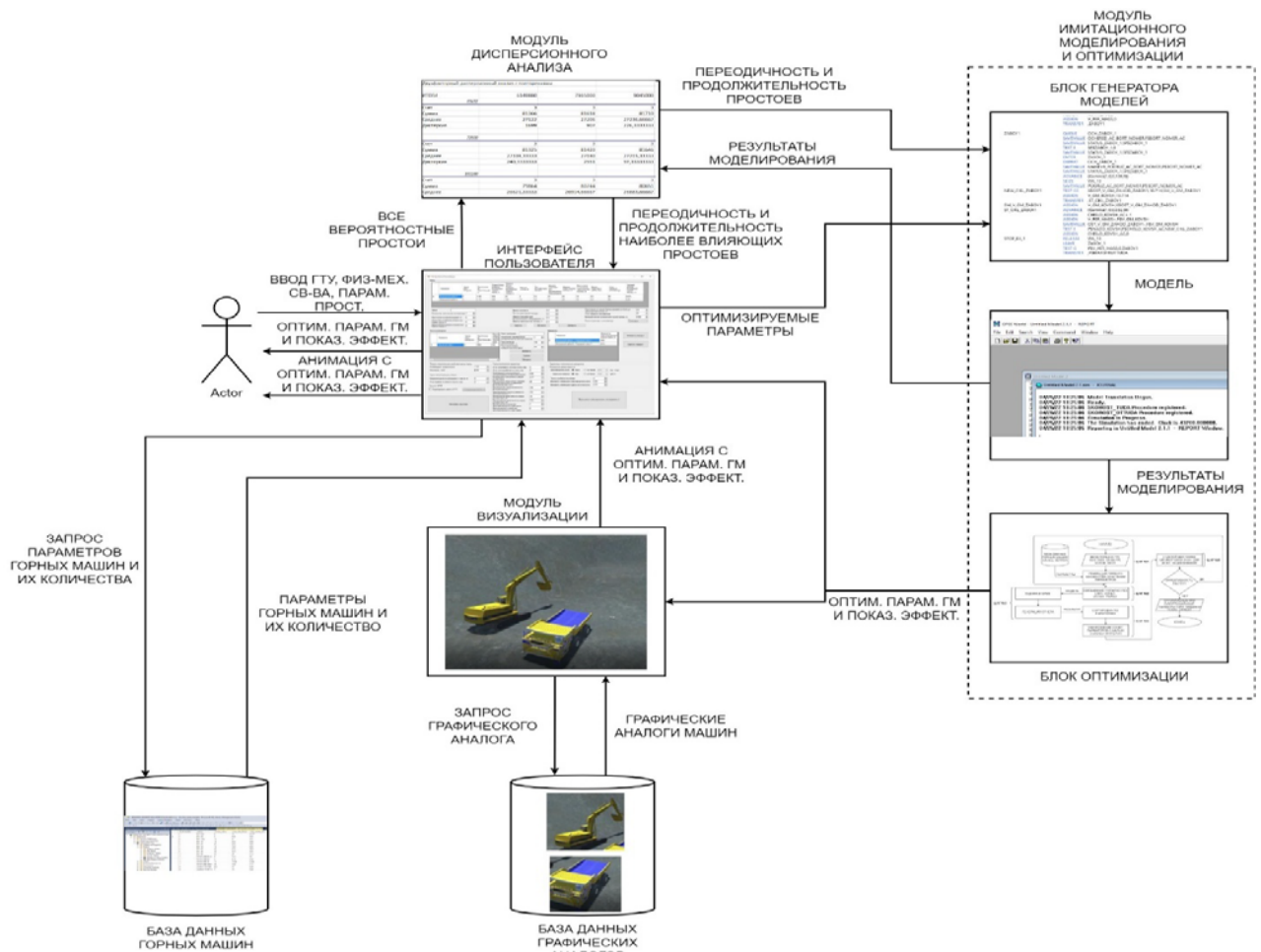


Рисунок 4.2 – Структурная схема программно-методического обеспечения для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев

Программно-методический комплекс включает в себя следующие модули (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Основные модули программно-методического комплекса

Модуль программно-методического комплекса	Назначение
Интерфейс пользователя	- Интерактивное взаимодействие пользователя (Actor) с системой имитационного моделирования.

Модуль визуализации	- Вывод результатов моделирования и отображение взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в соответствии с работой имитационной модели.
Модуль дисперсионного анализа	- Проведение двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями; - Оценка степени влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК для заданных условий эксплуатации, периодичности и продолжительности простоев.
Модуль имитационного моделирования и оптимизации	- Генерация по заданному алгоритму моделей различных вариантов сочетаний параметров экскаваторов и автосамосвалов с возможностью учета случайных факторов взаимодействия горных машин во времени и пространстве; - Планирование и проведение вычислительных экспериментов; - Оценка вариантов сочетаний параметров экскаваторов и автосамосвалов для заданных условий ведения горных работ.

К каждому модулю разработаны индивидуальные требования:

- **«Модуль дисперсионного анализа»** – автоматическое проведение двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями и ранжирование внеплановых простоев по степени влияния на эксплуатационную производительность ЭАК по критерию значимости K_i .

- **«Модуль имитационного моделирования и оптимизации»** – автоматическая генерация аналитико-имитационной модели ЭАК на основе сформированных комплектов горных машин с набором параметров для введенных горно-технических условий эксплуатации и физико-механических свойств пород;

проведение вычислительных экспериментов с созданными моделями; создание отчёта для проведения двухфакторного дисперсионного анализа по проведённому вычислительному эксперименту; создание отчёта о выполненных вычислительных экспериментах с указанием выбранных пользователем показателей эффективности ЭАК; создание файлов для построения анимации по проведённому вычислительному эксперименту.

- **«Модуль визуализации»** – создание анимационной модели с динамически изменяющимися параметрами ведения горных работ на основе проводимых вычислительных экспериментов и графических аналогов горных машин из соответствующей базы данных.

- **«Интерфейс пользователя»** – осуществление диалога с пользователем по вводу исходных данных в систему для оптимизации параметров горных машин в составе ЭАК, вывода результатов дисперсионного анализа со значениями критерия значимости влияния внеплановых простоев K_i на эксплуатационную производительность ЭАК, а также оптимизации в аналитическом и анимационном виде.

- **«База данных горных машин»** – избыточность, не противоречивость, целостность данных. Обеспечение добавления, хранения, удаления и актуализации данных о горных машинах, а также об их характеристиках, графических аналогах, технологических операциях и процессах, в которых они используются, а также об ограничениях на их совместное использование.

В соответствии с обозначенными требованиями разработан программный **«Модуль имитационного моделирования и оптимизации»** в среде Microsoft Visual Studio, отличающийся принципом интеграции дискретно-событийного имитационного моделирования в эвристический алгоритм оптимизации, включающий блоки «Генератор моделей», «Интерпретатор GPSS World», «Блок оптимизации».

Блоки «Генератор моделей» и «Интерпретатор GPSS World», позволяют на основе введенных пользователем горнотехнических условий эксплуатации, а также физико-механических свойств горных пород, периодичности и

продолжительности внеплановых простоев, генерировать аналитико-имитационную модель для отображения взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве, проводить вычислительные эксперименты при помощи ядра моделирования GPSS World с целью определения эксплуатационной производительности.

Кроме того, данные блоки позволяют автоматически выбирать из базы данных подходящие характеристики горных машин, для введенных горнотехнических условий и физико-механических свойств горных пород и проводить вычислительные эксперименты с целью определения для каждого технико-организационного варианта эксплуатационной производительности и удельных затрат на погрузку и транспортирование горной породы.

«Блок оптимизации» позволяет посредством совместного применения генетического алгоритма и комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде, основанном на максимизации технологической производительности и удельных затратах на погрузку и транспортирование горных пород, автоматически определять оптимальные технико-организационные параметры для заданных пользователем горнотехнических условий эксплуатации и физико-механических свойств горных пород.

Работа «Блока оптимизации» строится на принципах эволюционного алгоритма. Инструментом алгоритма является кортеж (цепочка) параметров горнотехнических условий эксплуатации, физико-механических свойств горных пород и параметров горных машин. Состав кортежа определяется структурой горнотехнических условий эксплуатации и физико-механическими свойствами горных пород, заданных пользователем в интерфейсе. Параметры организуются с помощью объектно-ориентированного подхода.

Основной объект кортежа называется «УЗабоя». Он описывает параметры горнотехнические условия эксплуатации вскрышных и добычных работ в отдельном забое и связанной с ним транспортной инфраструктуры. Структура «УЗабоя» представлена на Рисунке 4.3.

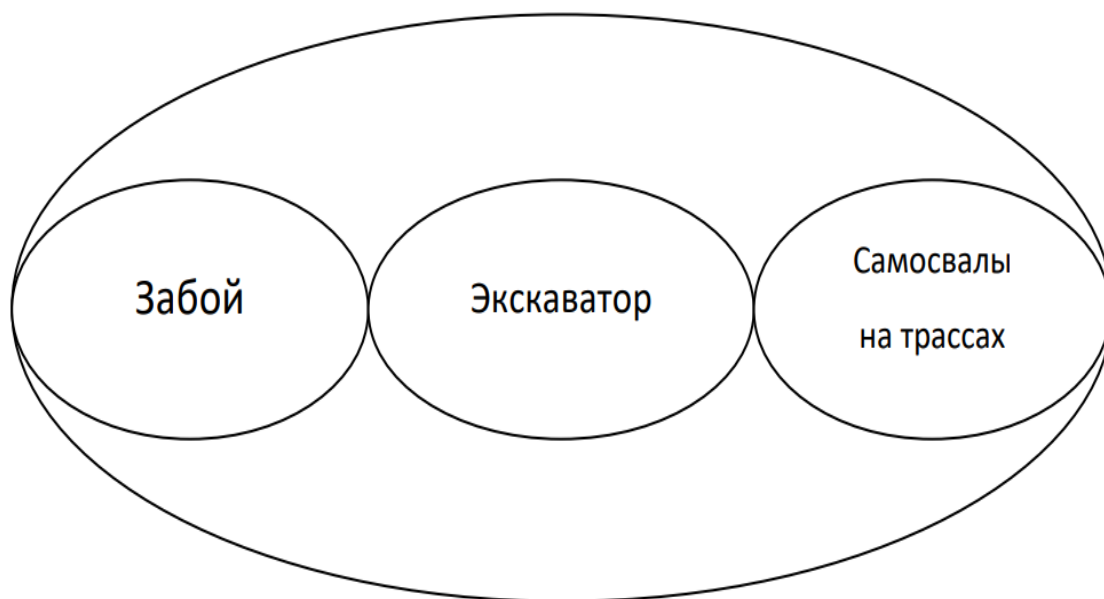


Рисунок 4.3 – Структура объекта «УЗабоя»

Объект «Забой» содержит горнотехнические характеристики забоя, такие, как число мест погрузки, параметры развала и прочие. Объект «Экскаватор» содержит все параметры экскаватора, такие, как вместимость ковша, максимальную высоту и радиус черпания. Объект «Самосвалы на трассах» содержит параметры о пунктах разгрузки, маршрутов до них, а также самосвалов, назначенных на транспортирование и разгрузку горных пород. Структура объекта «Самосвалы на маршрутах» показана на Рисунке 4.4.

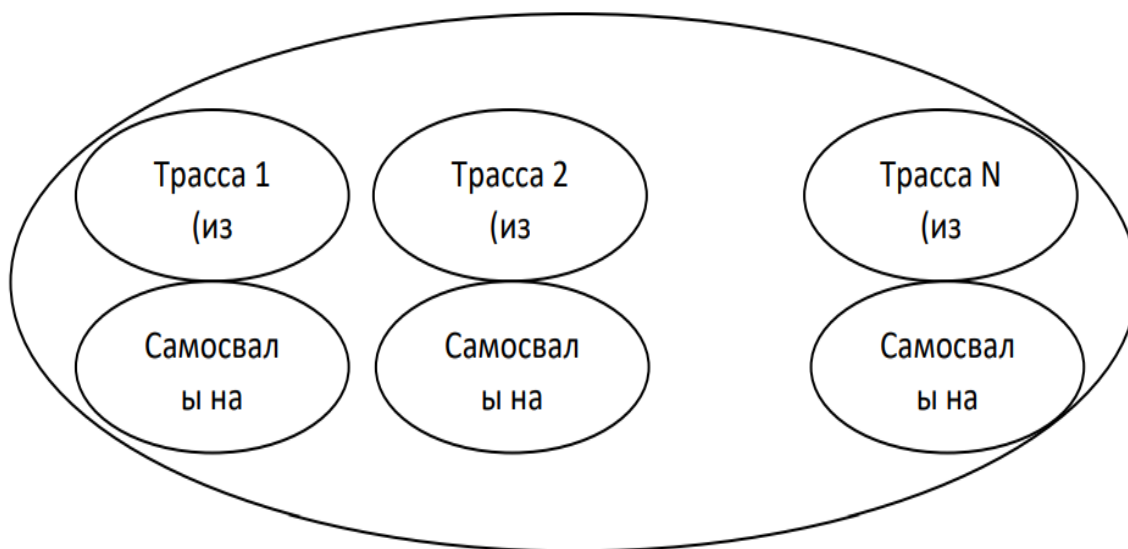
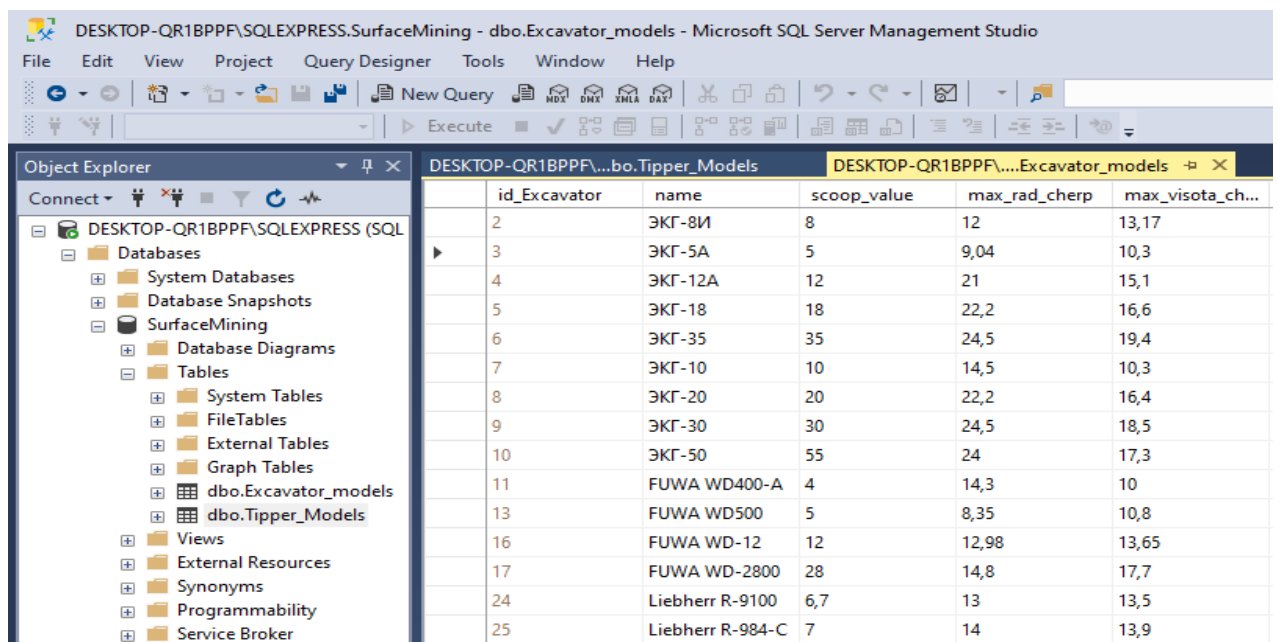


Рисунок 4.4 – Структура объекта «Самосвалы на трассах»

Каждая трасса от забоя до пункта разгрузки разбивается на отдельные участки, определяющиеся длиной, продольным уклоном, типом дорожного покрытия и радиусом кривизны. Это позволит точнее определять время движения самосвалов по трассам до пунктов разгрузки и обратно до экскаваторов.

Информация о самосвалах и экскаваторах, а также их параметрах, находится в созданной SQL реляционной «**Базе данных горных машин**» (Рисунок 4.5), откуда импортируется в систему моделирования с учётом введенных условий эксплуатации. Обозначенная реляционная база данных горных машин, включает 111 единиц имеющихся на рынке экскаваторов, автосамосвалов и содержит их технические характеристики и информацию о условиях применения. Она позволяет автоматически составлять все возможные комплекты горных машин для заданных условий. Пользователь может редактировать базу данных добавляя или изменяя параметры горных машин.



	id_Excavator	name	scoop_value	max_rad_cherp	max_visota_ch...
	2	ЭКГ-8И	8	12	13,17
	3	ЭКГ-5А	5	9,04	10,3
	4	ЭКГ-12А	12	21	15,1
	5	ЭКГ-18	18	22,2	16,6
	6	ЭКГ-35	35	24,5	19,4
	7	ЭКГ-10	10	14,5	10,3
	8	ЭКГ-20	20	22,2	16,4
	9	ЭКГ-30	30	24,5	18,5
	10	ЭКГ-50	55	24	17,3
	11	FUWA WD400-A	4	14,3	10
	13	FUWA WD500	5	8,35	10,8
	16	FUWA WD-12	12	12,98	13,65
	17	FUWA WD-2800	28	14,8	17,7
	24	Liebherr R-9100	6,7	13	13,5
	25	Liebherr R-984-C	7	14	13,9

Рисунок 4.5 – Фрагмент реляционной SQL базы данных горных машин

Алгоритм эвристической оптимизации параметров экскаваторов и автосамосвалов представлен на Рисунке 4.6 [110-114].

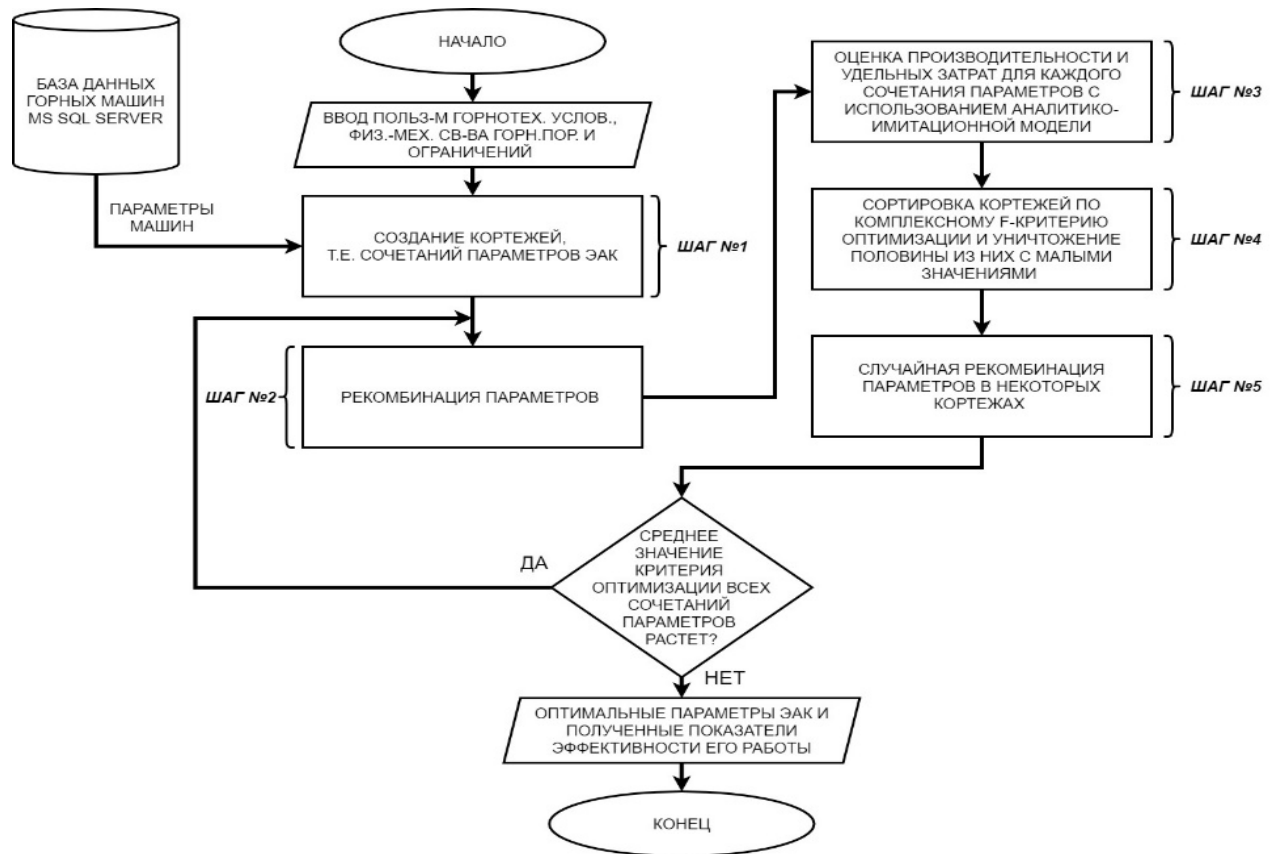


Рисунок 4.6 – Оптимизация параметров ЭАК посредством эволюционного алгоритма

На первом шаге оптимизации создаётся крупное число кортежей параметров технологии с применением экскаваторов и автосамосвалов (более 100 штук). Параметры, заданные пользователем в интерфейсе (такие, как параметры забоя, пунктов разгрузки и трасс, ограничения, свойства горных пород), копируются в созданные кортежи. Техничко-организационные параметры технологии с применением экскаваторов и автосамосвалов для каждого кортежа присваиваются случайным образом, основываясь на базе данных горных машин. Этими параметрами являются модели и количество используемых экскаваторов и автосамосвалов для каждого забоя.

На втором шаге оптимизации происходит рекомбинация параметров. Число кортежей увеличивается в 2 раза, при этом новые кортежи генерируются

как сочетание параметров уже существующих кортежей. Это позволяет реализовать принцип эволюции параметров, заложенный в алгоритме.

На третьем шаге для каждого кортежа параметров технологии с применением экскаваторов и автосамосвалов происходит оценка его суточной производительности и удельных затрат на погрузку и транспортирование. Оценка суточной производительности каждого кортежа параметров происходит с помощью имитационного моделирования в среде GPSS World, что позволяет повысить точность расчёта за счёт учёта вероятностной длительности процессов и динамики открытой технологии.

На четвёртом шаге алгоритма все кортежи сортируются по значению комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде. Половина из них, обладающих наименьшими значениями критерия, удаляются из расчётов.

На пятом шаге алгоритма в некоторых кортежах происходит рекомбинация параметров: некоторым параметрам случайным образом присваиваются новые значения.

Шаги 2-5 повторяются до тех пор, пока среднее значение критерия оптимизации всех кортежей параметров открытой технологии не перестанет расти.

Информация о самосвалах и экскаваторах, а также их параметрах, находится в созданной с помощью SQL Server Management Studio реляционной базе данных Microsoft SQL Server Express, откуда импортируется в систему моделирования с учётом горнотехнических параметров вскрышных и добычных работ.

Разработан **«Модуль визуализации»**, который предназначен для связи анимации с имитационной моделью, в последнюю добавляются команды вывода в текстовый файл специальные строки управления. Далее скрипт, написанный на языке C#, считывает, обрабатывает данные из этого текстового файла и двигает объекты в среде Unity 3D, выводит параметры и строит графики изменения параметров элементов системы (забоев, горных машин, пунктов разгрузки) (Рисунки 4.7, 4.8) [114].

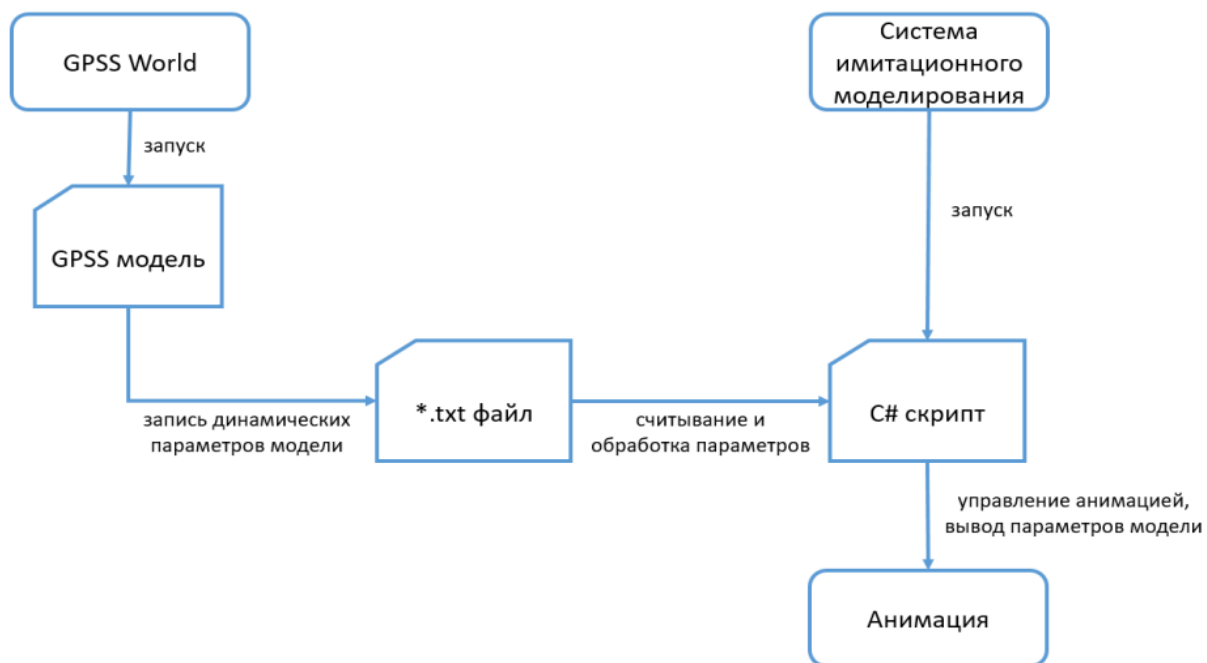


Рисунок 4.7 – Схема связи анимации с аналитико-имитационной моделью в «Модуле визуализации»



Рисунок 4.8 – Скриншот анимации забоя

Разработанный визуально-интерактивный «**Интерфейс пользователя**» в среде Microsoft Visual Studio для интерактивного взаимодействия пользователя с программно-методическим обеспечением аналитико-имитационного моделирования включает 7 специальных форм, выполняющих определенные функции:

1. Стартовая форма - для перехода на главную форму или перехода к редактированию электронной базы данных горных машин (Рисунок 4.9).

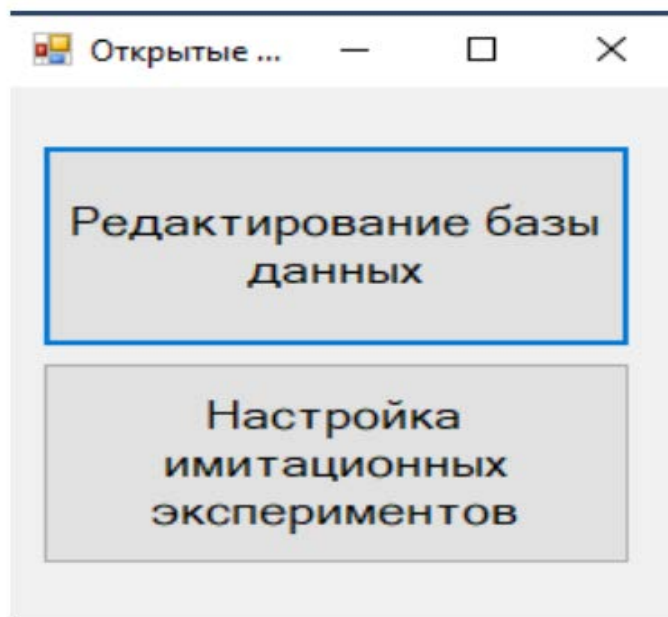


Рисунок 4.9 – Стартовая форма

2. Главная форма – для задания горнотехнических условий эксплуатации, физико-механических свойств горных пород; перехода к форме редактирования параметров маршрутов; добавления, удаления или редактирования количества забоев и пунктов разгрузки; выбора причин внеплановых простоев горных машин (экскаваторов и автосамосвалов); запуска эксперимента (Рисунок 4.10).

Настройка оптимизации

Забой

Название	Число мест погрузки	Расстояние до промплощадки, м	Длина блока развала взорванной горной породы, м	Ширина блока развала взорванной горной породы, м	Высота уступа, м	Тип экскаваторной закладки	Ширина площадки для дополнительного оборудования	Ширина транспортной полосы, м	Расстояние от уступа до транспортной полосы, м	Время подъезда к забой, мин	Угол поворота экскаватора	Средний размер взорванной горной породы, м
Взрывной забой 1	1	4180	1200	50	8	1.5	20	20	20	0.9	90	0.075
Взрывной забой 2	1	4110	1200	100	10	1.5	20	20	20	0.9	90	0.09

Забой: Высота уступа, м: 0.0

Количество мест возле экскаватора: 1 Тип экскаваторной закладки: 0.0

Расстояние до промплощадки, м: 0.0

Длина блока развала взорванной горной породы, м: 0.0

Ширина блока развала взорванной горной породы, м: 0.0

Ширина площадки для дополнительного оборудования, м: 0.0

Ширина транспортной полосы, м: 0.0

Удалить Обновить Добавить

Пункты разгрузки

Название	Число мест разгрузки	Расстояние до промплощадки, м	Расстояние между осями ленточных дорог	Пункт разгрузки
Порядный отвал 1	2	1500	100	1

Пункт разгрузки: 1

Количество одновременно разгружающихся автосамосвалов: 100

Расстояние до промплощадки, м: 4.0

Расстояние между осями ленточных дорог: 4.0

Добавить Удалить Обновить

Масшруты

Название	Дальность транспортирования горных пород, м
Взрывной забой 1 - Порядный отвал 1	2680
Взрывной забой 2 - Порядный отвал 1	2610

Добавить маршрут Удалить маршрут

Физико-механические свойства горных пород

Коэффициент разрыхления: 1.33

Плотность, т/м³: 2.55

Горно-геологические условия

Средняя мощность вскрытого пласта, м: 0

Угол падения угольного пласта, рад: 0

Расчет КГРП

☐ Моделировать работу КГРП

Горнотехнические параметры

Угол устойчивого откоса уступа, рад: 0

Угол откоса рабочего уступа, рад: 0

Коэффициент использования грузоподъемности автосамосвалов: 0.95

Коэффициент наполнения ковша экскаватора: 0.97

Максимально допустимая средняя техническая скорость движения автосамосвалов, км/ч: 22

Минимальная грузоподъемность автосамосвалов, т: 100

Максимальная грузоподъемность автосамосвалов, т: 300

Минимальная вместимость ковша экскаватора, м³: 3.0

Максимальная вместимость ковша экскаватора, м³: 10.0

Минимальное количество автосамосвалов на один забой: 1

Максимальное количество автосамосвалов на один забой: 8

Параметры генетического алгоритма

Показатели эффективности:

Производительность: ☒ макс. ☐ не менее 25.0 тыс. т/сут.

Удельные затраты: ☒ мин. ☐ не более 10.0 руб./т

Число особей в популяции: 2

Весовой коэффициент производительности: 0.50

Весовой коэффициент удельной стоимости: 0.50

Параметры КГРП

Настройка простоев

Послужить к имитационному эксперименту!

Рисунок 4.10 – Главная форма

3. Форма редактирования простоев – для редактирования внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов (Рисунок 4.11).

Редактирование простоев

Простои экскаваторов **Простои автосамосвалов**

Название простоя	Модель экскаватора	Средняя периодичность возникновения, мин.	Среднеквадр. отклонение периодичности возникновения, мин.	Среднее время устранения простоя, мин.	Среднеквадр. отклонение устранения простоя, мин.
Ремонт гидравлического оборудования	ЭКГ-10	41000	16000	900	450
Ремонт рабочего оборудования	ЭКГ-10	55000	10700	1680	1032
Ремонт ходовой	ЭКГ-10	101500	40800	1300	260
Ремонт электрооборудования	ЭКГ-10	188000	66700	2400	2200
Ремонт системы охлаждения	ЭКГ-10	67000	34000	3400	900
Ремонт системы управления	ЭКГ-10	126000	39000	1580	830
Замена плунжеров	ЭКГ-10	97000	45300	1010	250
Ремонт гидравлического оборудования	ЭКГ-12	45000	15000	1050	610
Ремонт рабочего оборудования	ЭКГ-12	48000	9400	1680	1032
Ремонт ходовой	ЭКГ-12	100300	39800	1450	390
Ремонт электрооборудования	ЭКГ-12	203000	89300	3250	1970

Название простоя:

Модель экскаватора: ЭКГ-10

Средняя периодичность возникновения, мин.: 0

Среднеквадратическое отклонение периодичности возникновения, мин.: 0

Среднее время устранения простоя, мин.: 0

Среднеквадратическое отклонение среднего времени устранения простоя, мин.: 0

Добавить простой для модели экскаватора

Удалить выделенные простои

Рисунок 4.11 – Редактирование простоев горных машин

При редактировании простоев необходимо выбрать модель экскаватора или автосамосвала, указать наименование простоя, периодичность его возникновения и продолжительность, а затем нажать кнопку «Простой для модели экскаватора или автосамосвала». Созданный простой выведется в верхнем поле. Удаления простоев происходит кнопкой «Удалить выделенные простои».

4. Форма редактирования маршрутов – для редактирования параметров маршрутов движения автосамосвалов; добавления, удаления или редактирования участков трассы; назначения маршрутов движения автосамосвалов от забоя до пункта разгрузки (Рисунок 4.12).

Настройка параметров маршрута

Участки

Номер	Длина	Поворот	Радиус скругления	Уклон	Покрытие
*					

Длина участка трассы, м: 100

Средневзвешенный продольный уклон, ‰ (от -100 до 100): 0

Дорожное покрытие: Гравийное

Направление: Прямо

Добавить участок трассы

Удалить выделенный участок трассы

Забой: Вскрышной забой 1

Пункт разгрузки: Породный отвал 1

Добавить маршрут

Рисунок 4.12 – Редактирование параметров маршрутов

При редактировании маршрутов вся трасса от забоя до пункта разгрузки разбита на участки, имеющие свои значения длины, уклона, типа покрытия, радиуса кривизны. После ввода всех значений, для добавления участка необходимо нажать кнопку «Добавить участок трассы». Созданный участок выведется в верхнем поле. В случае необходимости удаления участка, необходимо его выделить и нажать кнопку «Удалить выделенный участок трассы». После введения всех участков, необходимо указать забой и пункт разгрузки. После нажать кнопку «Добавить маршрут». После чего на главной форме в разделе «Маршруты» высветиться созданный маршрут (Рисунок 4.13).

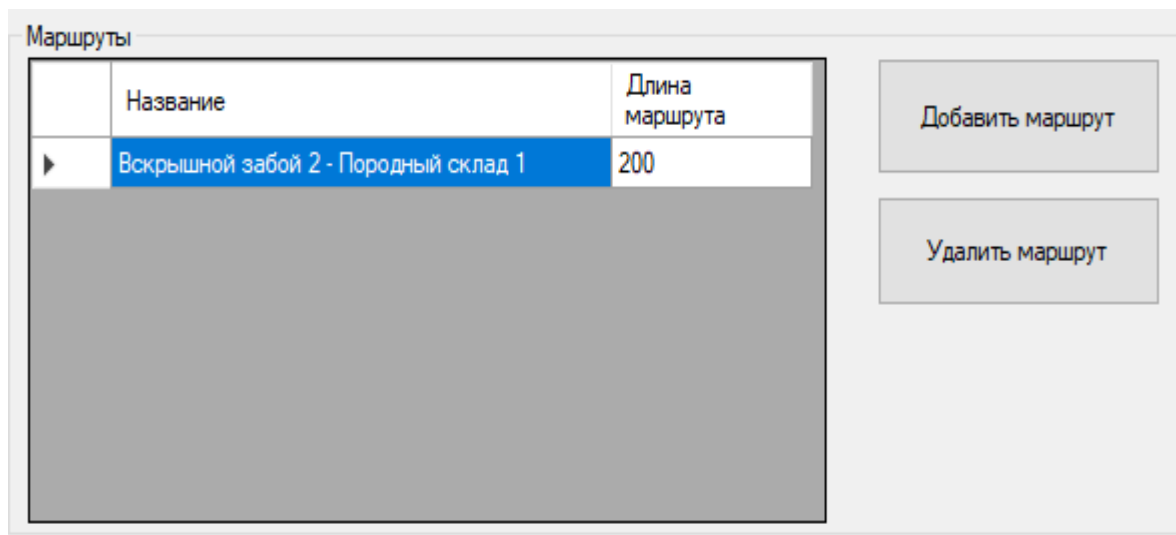


Рисунок 4.13 – Созданный маршрут

5. Форма редактирования параметров горных машин – для добавления, удаления, редактирования значений параметров экскаваторов и автосамосвалов, (Рисунок 4.14).

Редактирование базы данных

Экскаваторы		Самосвалы						
	model	scoopValue	tTsikl	maxRadCherp	maxVisotaCherp	avgSpeed	cost	PPM1
	ЭКГ-10	10	0,33	10	10	10	10	43200
	Komatsu-PC 1250	6	0,49	10	10	10	20	43200
	ЭКГ-5	5	0,57	10	10	10	30	43200
	Hitachi-EX-1900	12	0,65	10	10	10	40	43200
	Komatsu PC 3000	15	0,73	10	10	10	50	43200

Рисунок 4.14 – Редактирование базы данных горных машин

Для редактирования доступны следующие таблицы: «Экскаваторы», «Автосамосвалы». Каждая вкладка модуля поддерживает добавление новой модели горной машины, удаление (с подтверждением) имеющейся в базе модели, обновление характеристик имеющейся в базе горной машины. Для добавления в базу новой горной машины необходимо заполнить все поля ввода в нижней части интерфейса. Например, для добавления экскаватора необходимо кроме модели ввести все значения: вместимость ковша, максимальный радиус и высота черпания и др. Затем нажать на кнопку «Добавить новый экскаватор», после чего база данных дополнится новой записью, а изменения отобразятся в интерфейсе. Удаление горной машины осуществляется выделением соответствующей строки в базе данных и нажатием кнопки удаления. Данная операция требует подтверждения, так как изменения производятся безвозвратно.

6. Форма анимации – для демонстрации результатов оптимизационных экспериментов в виде компьютерной анимации (Рисунок 4.15).



Рисунок 4.15 – Форма представления результатов в виде анимации

После введения всех условий, на главной форме необходимо нажать кнопку «Приступить к имитационному эксперименту» (Рисунок 4.16).

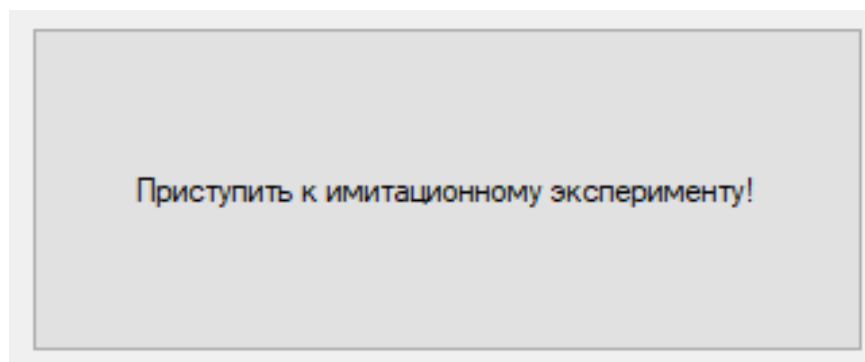


Рисунок 4.16 – Проведение экспериментов

7. Форма результатов – для вывода показателей эффективности (эксплуатационной производительности и удельных затрат на погрузку и транспортирование горной породы) оптимального варианта сочетания параметров горных машин по каждому забою (Рисунок 4.17).

The screenshot shows the FormGenAlg software interface with the following sections:

- Забои (Excavation Points):** Вскрышной забой 1, Вскрышной забой 2
- Экскаваторы (Excavators):** ЭКГ-20
- Трассы (Routes):** Вскрышной забой 1 - Попердный отвал 1
- Самосвалы (Dump Trucks):**
 - БелАЗ-7530
 - БелАЗ-7518
 - БелАЗ-7513
 - БелАЗ-7513
 - Komatsu HD-860E
 - Hitachi EH 4500
 - Caterpillar - 777D
 - Hitachi EH 1700
 - БелАЗ-7545
 - БелАЗ-7545
- Параметры экскаваторов (Excavator Parameters):**
 - Модель: ЭКГ-20
 - Емкость ковша, м³: 20
 - Макс. радиус черпания, м: 22,6
 - Макс. высота черпания, м: 17
 - Коэффициент использования, %: 48,52
 - Время цикла, сек.: 33,66
- Параметры забоя (Excavation Parameters):**
 - Количество заходов экскаватора: 3
- Параметры самосвалов (Dump Truck Parameters):**
 - Модель: БелАЗ-7530
 - Грузоподъемность, т: 220
 - Вес тары, т: 156
 - Минимальный радиус поворота, м: 15
 - Длина, м: 13,4
 - Ширина, м: 5
 - Высота, м: 4,5
 - Среднее время разгрузки, мин.: 0,92
- Параметры технологии (Technology Parameters):**
 - Эксплуатационная производительность, тыс. т/сут.: 120,36
 - Удельные затраты на погрузку и транспортировку горных пород, руб./т: 10,14
- Buttons:** Прогреть анимацию

Рисунок 4.17 – Форма вывода результатов

4.3 Оптимизация параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев на при- мере вскрышных забоев угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество»

Исследовалась работа двух вскрышных забоев с экскаваторами ЭКГ-10 (№44) и Hitachi EX-1900 (№32), от которых вскрышная порода транспортируется автосамосвалами БелАЗ-75131 на внешний отвал №3. Технологические схемы работы действующих экскаваторов представлены на Рисунках 4.18 и 4.19.

A-A

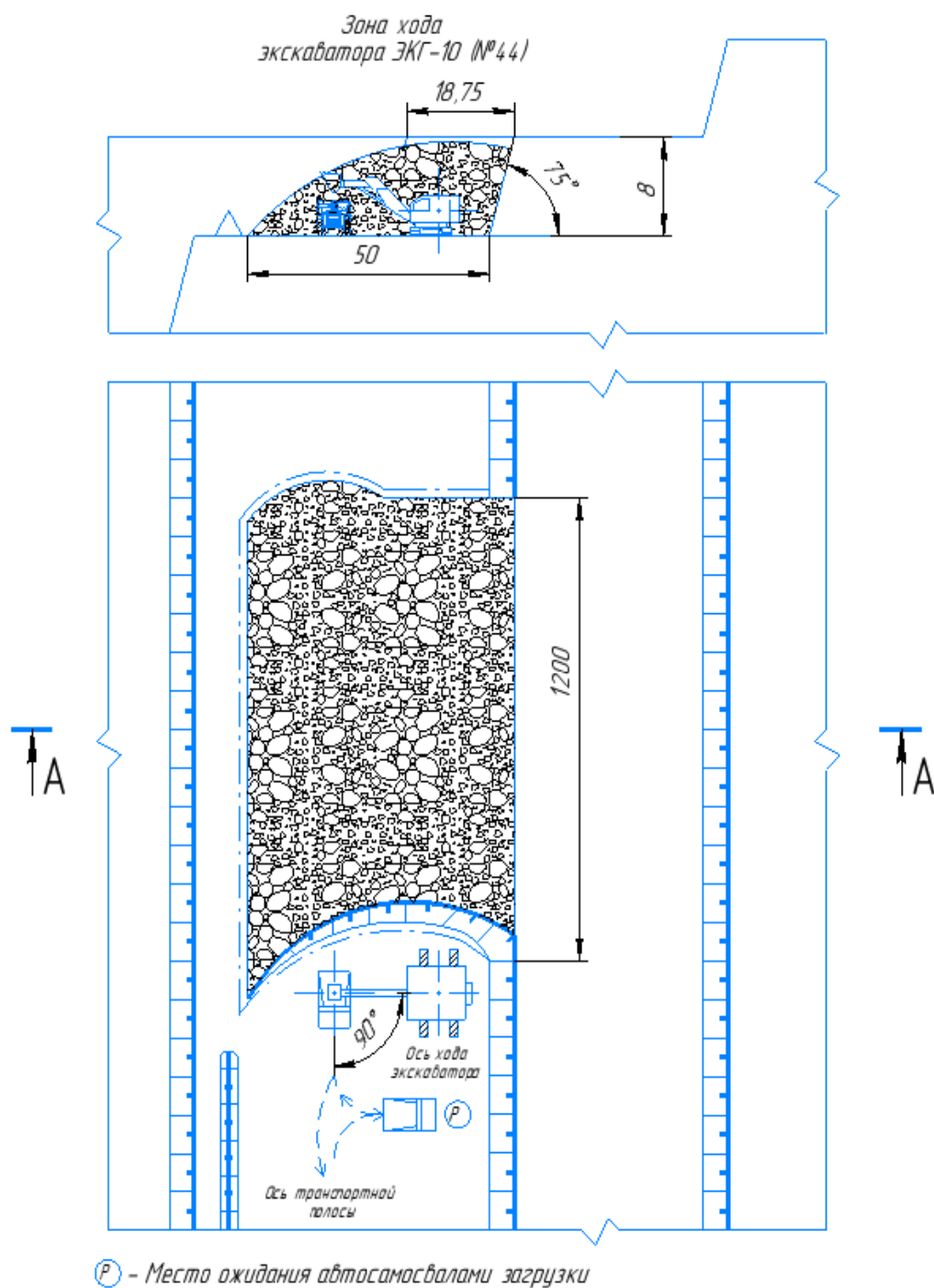


Рисунок 4.18 – Технологическая схема работы ЭКГ-10 при разработке взорванных вскрышных пород продольной заходкой и торцевым забоем с верхним черпанием и погрузкой в автосамосвалы на уровне стояния

A-A

Зона хода
экскаватора Hitachi EX-1900 (№32)

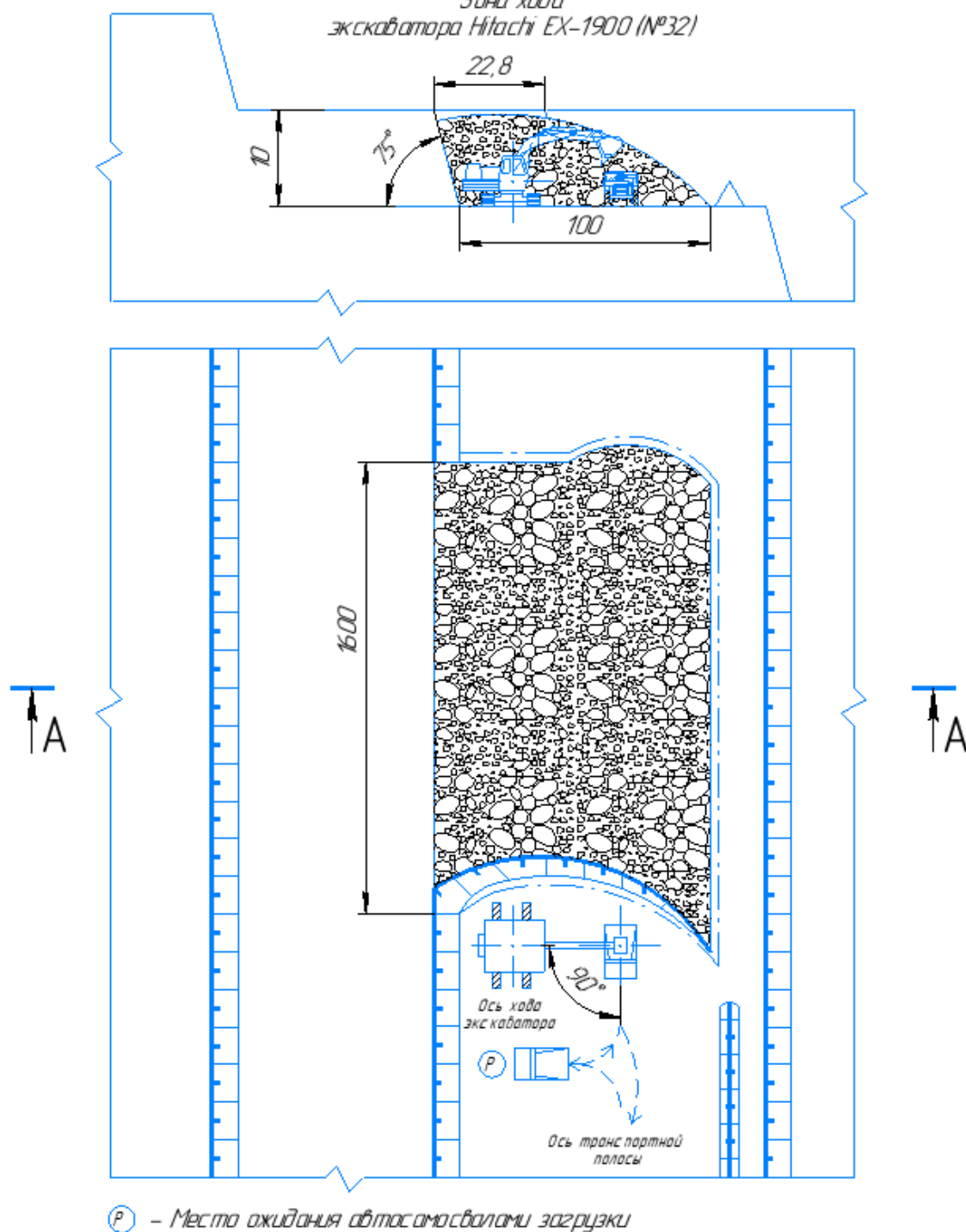


Рисунок 4.19 – Технологическая схема работы Hitachi-EX-1900 при разработке взорванных вскрышных пород продольной заходкой и торцевым забоем с нижним черпанием и погрузкой в автосамосвалы на уровне стояния

С использованием разработанного программно-методического комплекса проведены вычислительные эксперименты по поиску оптимальных параметров экскаваторов и автосамосвалов применительно к условиям угольного разреза Кузбасса ООО СП «Барзасское товарищество».

На первом шаге для проведения исследований в программный комплекс вводились основные горнотехнические условия эксплуатации и физико-механические свойства вскрышной горной породы (Таблица 4.5). Значения коэффициентов наполнения ковша экскаватора и использования грузоподъемности принимались в соответствии с рекомендациями авторов для условий, схожих с условиями ООО СП «Барзасское товарищество» [115].

Таблица 4.5 – Условия эксплуатации машин
на ООО СП «Барзасское товарищество»

Параметр, единица измерения	Значение	
	Забой №44	Забой №32
Дальность транспортирования вскрыши, м	2680	2610
Длина блока развала взорванной горной массы / Высота уступа / Ширина блока развала взорванной горной массы, м	1200/8/50	1600/10/100
Угол откоса уступа, град.	75	
Схема подъезда к экскаватору	Тупиковая	
Средневзвешенный продольный уклон трассы, ‰	15,82	53,90
Схема подъезда автосамосвалов к экскаватору	Одиночная	
Количество одновременно разгружающихся автосамосвалов на внешнем отвале	Два	
Вид участков трассы (забойный / карьерный / траншейный / отвальный)	грунт/ще- бень/грунт/гр унт	грунт/ще- бенка/ще- бень/грунт
Радиус кривизны участков трассы (забойный / карьерный / траншейный / отвальный), м	100/200/ пря- молинейный /200	150/200/200 /75
Длина участков трассы (забойный / карьерный / траншейный / отвальный), м	150/910/1070/ 550	200/370/116 0/880

Коэффициент наполнения ковша экскаватора	0,97	
Расстояние от внешнего отвала до промплощадки, м	1500	
Коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала	0,95	
Угол поворота экскаватора, град.	90	90
Тип экскаваторной заходки	Нормальная	Нормальная
Расстояние от забоя до промплощадки, м	4180	4110
Средний размер взорванной горной массы, м	0,075	0,09
Плотность вскрышной породы, т/м ³	2,55	
Коэффициент разрыхления	1,33	

На втором шаге посредством дисперсионного анализа с использованием комплексного критерия значимости влияния внеплановых простоев (см. раздел 4.2) определены простои экскаваторов и автосамосвалов, в наибольшей степени влияющие на эксплуатационную производительность ЭАК (Таблица 4.6). Эти внеплановые простои по организационным и техническим причинам и учитывались при оптимизации параметров горных машин. Моделировался период 1 год. При этом приняты ограничения, представленные в Таблице 4.7.

Таблица 4.6 – Простои экскаваторов и автосамосвалов в наибольшей степени влияющие на эксплуатационную производительность ЭАК

Вид простоя	Коэффициент значимости K_i , %
Отсутствие автосамосвалов	47,22
Ремонт рабочего оборудования	46,23
Ремонт гидравлического оборудования	45,80
Ремонт электрооборудования	41,91
Ремонт механической и ходовой частей	43,98
Ремонт двигателя внутреннего сгорания	30,58
Ремонт системы управления	38,66

Ремонт электрооборудования	34,48
Ремонт/замена автошин	39,23
Ремонт гидросистемы	29,90
Ожидание погрузки	28,20

Таблица 4.7 – Ограничения при проведении экспериментов

Параметр, единица измерения	Значения
Вместимость ковша, [м ³]	6,5 - 35
Число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, [шт.]	3 - 10
Грузоподъемность автосамосвала, [т];	90 - 240
Количество автосамосвалов на один забой, [шт.]	1 - 20
Максимальные допустимые удельные затраты на транспортирование и погрузку, [руб./т]	12
Минимальная суточная эксплуатационная производительность, [тыс. т/сут.];	80
Весомость эксплуатационной производительности	0,5
Весомость удельных затрат на погрузку и транспортировку горных пород	
Максимальная скорость движения автосамосвалов на всех участках трассы, [км/ч].	22

Результаты поиска оптимальных параметров представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты экспериментов поиска оптимальных параметров с учетом внеплановых простоев горных машин

Параметр	Значение	
	Вскрышной за- бой №44	Вскрышной за- бой №32
Вместимость ковша, [м ³]	27	27
Максимальный радиус черпания, [м]	20,9	21,78
Максимальная высота черпания, [м]	20,6	15,56
Максимальная высота разгрузки, [м]	13,1	9,2
Ширина заходки, [м]	31,35	32,67

Пример модели экскаватора	Hitachi-EX-5500	Caterpillar 7295
Грузоподъёмность автосамосвала, [тонн] (Количество, [шт.])	90 - 91 (5), 130 - 136 (3)	130 - 156,9 (5), 180 - 181 (2), 221 - 240 (3)
Габаритные размеры автосамосвала, [м] (длина/ширина/высота)	9,78 / 5,89 / 5,12 - 11,5 / 7 / 5,90	11,37 / 6,89 / 5,85 - 14,15 / 8,45 / 6,88
Вес тары, [тонн]	70 - 113	100 - 164
Минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]	10 - 16,6	12 - 15,1
Пример модели автосамосвала	БелАЗ-7557, БелАЗ-7513, Caterpillar 777D, Hitachi EH 1600, Caterpillar - 785D	Hitachi EH 3000, БелАЗ- 7518, БелАЗ- 7531, БелАЗ-7513, Komatsu HD- 1500-5, Komatsu HD- 830E
Показатели эффективности		
$Q_{\text{эак}}$, [тыс.т./сут.]	165,49	
C , [руб./т.]	9,72	
F	4,13	

Из Таблицы 4.8 видно, что применение полученных значений параметров обеспечит максимальную эксплуатационную производительность ЭАК с двух забоев 165,49 тыс. тонн/сут. при удельных затратах на погрузку и транспортирование 9,72 руб./т, а значение критерия оптимизации 4.13.

Технологические схемы работы мехлопат, полученных вариантов представлены на Рисунках 4.20 и 4.21.

A-A

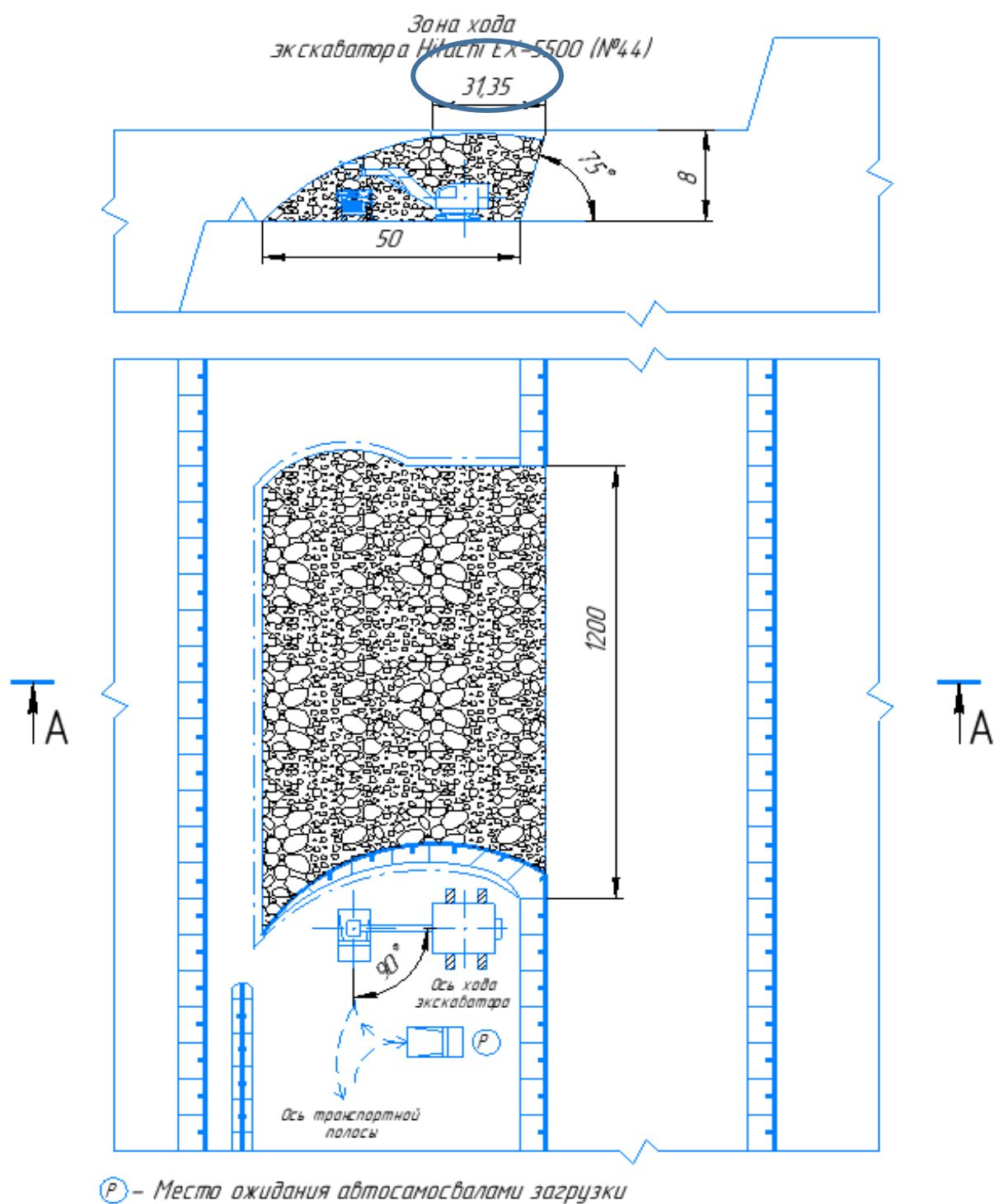


Рисунок 4.20 – Технологическая схема работы мехлопаты при разработке взорванных вскрышных пород продольной заходкой и торцевым забоем с экскаватором Hitachi-EX-5500 (№44) с верхним черпанием и погрузкой в автосамосвалы на уровне стояния (полученный вариант)

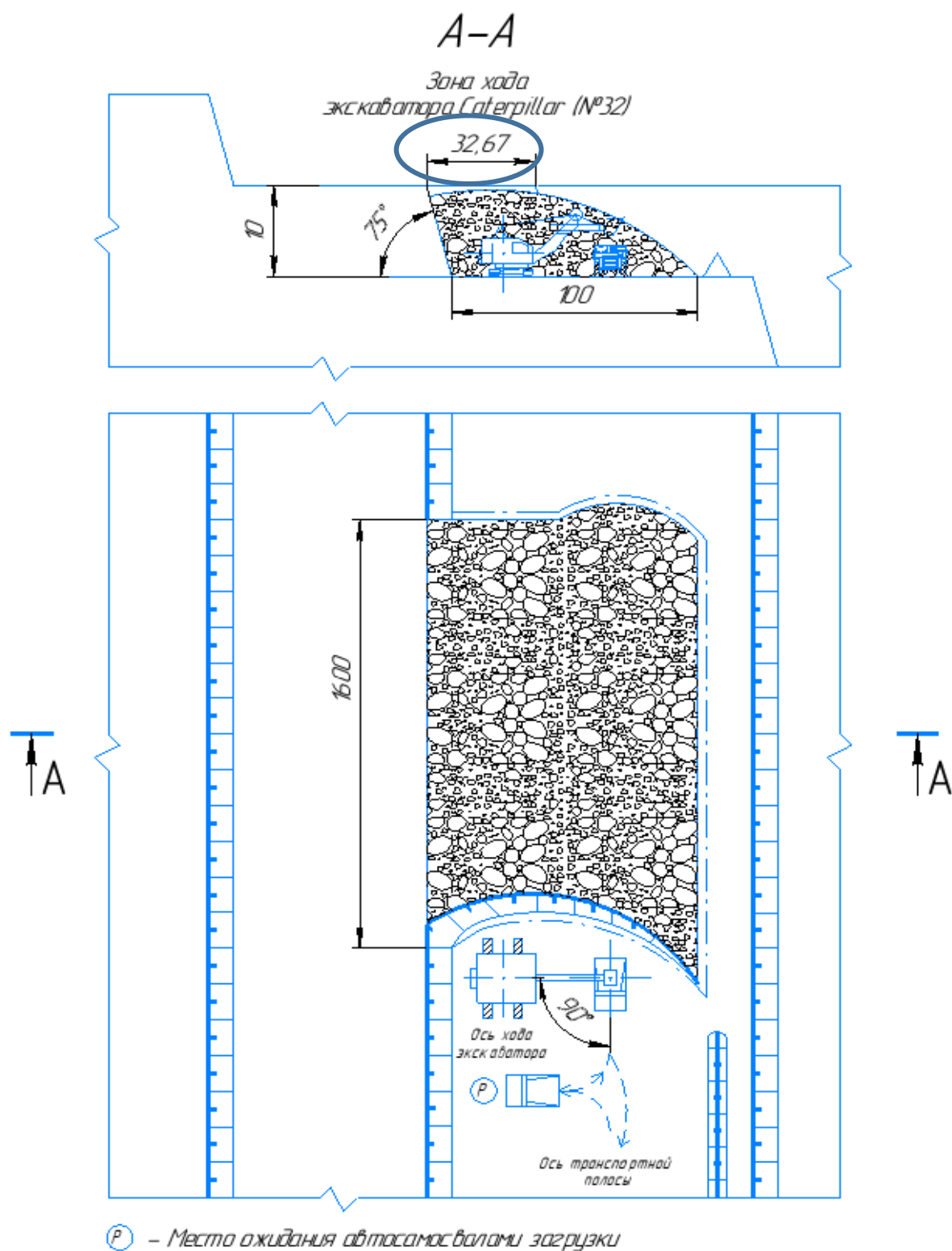


Рисунок 4.21 – Технологическая схема работы мехлопаты при разработке взорванных вскрышных пород продольной заходкой и торцевым забоем с экскаватором Caterpillar 7295 (№32) с верхним черпанием и погрузкой в автосамосвалы на уровне стояния (полученный вариант)

Согласно данным, полученным с диспетчерских отчетов автоколонн разреза ООО СП «Барзасское товарищество», при использовании на вскрышном забое №44 девяти автосамосвалов грузоподъемностью 130 тонн, закрепленных за экскаватором ЭКГ-10, а также двенадцати автосамосвалов грузоподъемностью 130 тонн во вскрышном забое №32, закрепленных за экскаватором Hitachi EX-1900, суммарная суточная производительность с двух забоев составит 96,09 тыс.т./сут. при удельных затратах на погрузку и транспортирование горной породы 10,88 руб./т (Таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Сравнение показателей эффективности участка разреза
ООО СП «Барзасское товарищество»

Параметр, ед. изм.	Диспетчерский отчет (было)	Компьютерная система (рекомендовано)	Эффект, %
$Q_{\text{зак}}$, т/сут.	96,09	165,49	41,8
C , руб./ т	10,88	9,72	10,7
F	2,97	4,13	39,1

Таким образом, применение рекомендуемых значений параметров, полученных при помощи, разработанной компьютерной системы аналитико-имитационного моделирования, позволит увеличить суточную производительность ЭАК на 41,8%, при этом сократив удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород на 10,7%. Значение критерия эффективности ЭАК повысится на 39,1%.

4.4 Выводы по главе

1) Определены целевые функции оптимизации параметров ЭАК, которые устанавливают связь между входными параметрами: 27 параметров горнотехнических условий (множество R_{gt}), 2 параметра физико-механических свойств горных пород (множество R_{fm}), 8 параметров горных машин (множество R_{gm}), 1

параметр ЭАК (множество $R_{\text{ЭАК}}$) и откликом: эксплуатационной производительностью ($Q_{\text{ЭАК}}$), удельными затратами на погрузку и транспортирование горных пород (C).

2) Разработан критерий оптимизации параметров ЭАК (F), который является мультипликативной сверткой частных критериев оптимизации ($Q_{\text{ЭАК}}^{\alpha}$ и C^{β}) в агрегированном виде. Установлено, что оптимальным вариантом параметров ЭАК с учетом ВП есть набор автосамосвалов с различным набором параметров.

3) Разработано программно-методическое обеспечение, при помощи которого для двух вскрышных забоев угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество»:

- определены оптимальные параметры ЭАК, позволяющие повысить точную эксплуатационную производительность ЭАК на 41,8%, а также сократить затраты на погрузку и транспортирование горных пород на 10,7%, повысить значение критерия оптимизации на 39,1%;

- сформированы рекомендации по использованию горных машин для забоя №44: экскаватор Hitachi EX-5500, автосамосвалы БелАЗ-7557 или Caterpillar-777D и БелАЗ-7513 или Caterpillar-785D; для забоя №32: экскаватор Caterpillar 7295, автосамосвалы БелАЗ-7513 или Hitachi EH 3000, БелАЗ-7518 и БелАЗ-7531 или Komatsu HD-830E.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи выбора оптимальных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев горных машин, обеспечивающее повышение эффективности открытых горных работ, что имеет существенное значение для развития угольной отрасли Российской Федерации.

В диссертации решены взаимосвязанные задачи:

1) Результатом решения задачи – «Разработать аналитико-имитационную модель функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев» является:

- Произведена систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов на плановые и внеплановые. Установлено, что периодичность и продолжительность ВП экскаваторов и автосамосвалов соответствует гамма-распределению с ограниченной правосторонней областью.

- Разработана концептуальная модель функционирования ЭАК с применением теории массового обслуживания и выполнена ее программная реализация с помощью языка имитационного моделирования GPSS World, что позволяет оценивать суточную производительность ЭАК и удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы с учетом ВП экскаваторов и автосамосвалов. Максимальная погрешность выходных модельных данных по сравнению с данными диспетчерских отчетов не превышает критического значения в 10%.

- Установлено, что расхождение суточной плановой добычи с добычей при учете ВП составляет в среднем 17,2% при доверительной вероятности 95,0%.

2) Результатом решения задачи – «Определить степень влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК» на примере условий угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество» является:

- Установлено, что организация работы экскаватора на два подъезда с учетом ВП позволит повысить добычу из забоя на 5,43%.

- Установлено, что увеличение продолжительности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 7 до 26 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 2,36-5,08%, при

постоянных периодичностях между 346 и 931 часов соответственно. Увеличение периодичности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 340 до 936 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 1,61-4,36%, при постоянных продолжительностях между 7,86 и 25,94 часов соответственно. Увеличение продолжительности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 3 до 392 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,79-25,61%, при постоянных периодичностях между 1623,3 и 19265,6 часов соответственно. Увеличение периодичности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 1623 до 19295 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,24-19,95%, при постоянных продолжительностях между 3,4 и 392,4 часов соответственно.

- Разработан критерий оценки влияния ВП на эксплуатационную производительность ЭАК (K_i), который определяется как среднее арифметическое между коэффициентами детерминации факторов периодичности и продолжительности внепланового простоя.

- Произведено ранжирование внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов с использованием разработанного критерия K_i для условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество»: отсутствие автосамосвалов ($K_i \approx 47,22\%$); ремонт рабочего оборудования экскаватора ($K_i \approx 46,23\%$); ремонт гидравлического оборудования экскаватора ($K_i \approx 45,80\%$); ремонт ходового и механического оборудования экскаватора ($K_i \approx 43,98\%$); ремонт электрооборудования экскаватора ($K_i \approx 41,91\%$); ремонт/замена автошин ($K_i \approx 39,23\%$); ремонт системы управления автосамосвала ($K_i \approx 38,66\%$); ремонт электрооборудования автосамосвала ($K_i \approx 34,48\%$); ремонт двигателя внутреннего сгорания ($K_i \approx 30,58\%$); ремонт гидросистемы автосамосвала ($K_i \approx 29,90\%$); ожидание погрузки ($K_i \approx 28,20\%$).

3) Результатом решения задачи – «Разработать программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев» является:

- Определены целевые функции оптимизации параметров ЭАК, которые устанавливают связь между входными параметрами: 27 параметров горнотехнических условий (множество R_{gt}), 2 параметра физико-механических свойств горных пород

(множество R_{fm}), 8 параметров горных машин (множество R_{gm}), 1 параметр ЭАК (множество R_{EAK}) и откликом: эксплуатационной производительностью ($Q_{ЭАК}$), удельными затратами на погрузку и транспортирование горной массы (C).

- Разработано программно-методическое обеспечение, позволяющее оценивать эксплуатационную производительность ЭАК, а также удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы и выбирать оптимальные параметры ЭАК посредством имитационного моделирования совместной работы горных машин с учетом их ВП.

- Определены оптимальные параметры ЭАК для условий угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество», позволяющие повысить суточную эксплуатационную производительность ЭАК на 41,8%, а также сократить затраты на погрузку и транспортирование горных пород на 10,7%, и повысить значение критерия оптимизации на 39,1%. Сформированы рекомендации по использованию горных машин для забоя №44: экскаватор Hitachi EX-5500, автосамосвалы БелАЗ-7557 или Caterpillar-777D и БелАЗ-7513 или Caterpillar-785D; для забоя №32: экскаватор Caterpillar 7295, автосамосвалы БелАЗ-7513 или Hitachi EH 3000, БелАЗ-7518 и БелАЗ-7531 или Komatsu HD-830E.

Направление дальнейших исследований заключается в:

1) Расширении функционала программно-методического обеспечения для повышения эффективности выбора оптимальных параметров ЭАК за счет учета параметров буровзрывных работ, а также показателей надежности горных машин, изменяющихся в зависимости от условий их эксплуатации и срока службы.

2) Исследовании и оптимизации параметров ЭАК при автоматизации и роботизации горных машин, в том числе при совместной работе ЭАК и комплекса глубокой разработки пластов (КГРП) при добыче угля открыто-подземным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации: [сайт]. – Режим доступа. URL: <https://minenergo.gov.ru/> (дата обращения: 09.03.2022).
2. Курганов, В.М. Оценка надёжности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов на карьере / В.М. Курганов, М.В. Грязнов, С.В. Колобанов // Записки горного института. – 2020. – Т.241. – С. 10 – 21.
3. Воронов, А.Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06, 05.13.18 / Воронов Артем Юрьевич. КузГТУ. Кемерово, 2015. – 195 с.
4. Воронов, А.Ю. Оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса / А.Ю. Воронов, А.А. Хорешок, Ю.Е. Воронов, А.В. Буянкин, А.Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – №2. – С. 19 – 26.
5. Булес, П. Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России: автореф. ...канд. тех. наук. – МИСиС., Москва., 2016. – 24 с.
6. Квагинидзе, В.С. Диагностика, техническое обслуживание и ремонт карьерного горнотранспортного оборудования в условиях низких температур: дис. ... доктора тех. наук: 05.05.06. / Квагинидзе Валентин Суликоевич. – КузГТУ. – Кемерово, 2003. – 313 с.
7. Колесников, В.Ф. Выбор оптимальной структуры экскаваторно-автомобильного комплекса / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин, А.В. Стрельников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №1. – С. 59 – 61.
8. Хмызников, К.П. Горные машины для открытых горных работ. Карьерные экскаваторы: учеб. пособие / К.П. Хмызников, Ю.И. Лыков. – Санкт-Петербург, СПГГИ им. Г.В. Плеханова, 1999. – 40 с.
9. Томаков, П.И. Технология, механизация и организация открытых горных работ: учебник для вузов / П.И. Томаков, И.К. Наумов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 312 с.
10. Астафьев, С.А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности: дис.

... канд. тех. наук: 25.00.22 / Астафьев Степан Александрович. УГГУ. – Екатеринбург, 2015. – 179 с.

11. Стенин, Д.В. Обоснование влияния ресурса несущих систем и степени загрузки на производительность карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Стенин Дмитрий Владимирович. – КузГТУ. – 125 с.

12. Курехин, Е.В. Процессы открытых горных работ: практикум, методические указания по выполнению курсового проекта, методические указания к самостоятельной работе [Электронный ресурс] для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», образовательная программа «Открытые горные работы», очная, заочной формы обучения / сост.: Е. В. Курехин, С. И. Протасов. – Кемерово: КузГТУ, 2021. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. - Загл. с экрана.

13. Литвин, О.И. Обоснование рациональных технологических параметров производства вскрышных работ гидравлическими лопатами на разрезах Кузбасса: автореф. ... канд. тех. наук: 25.00.22 / Литвин Олег Иванович; «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева» и ООО «Кузбассразрезуголь-Взрывпром». – Кемерово., 2012. – 22 с.

14. Хорешок, А.А. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, С.О. Марков, М.А. Тюленев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – №3. – С. 104-112.

15. Шамсутдинов, М.М. Открытые горные работы: учебное пособие / М.М. Шамсутдинов, Э.В. Лупинин. – Бишкек, 2015. – 182 с.

16. Фурман, А.С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Фурман Андрей Сергеевич. – КузГТУ. – Кемерово, 2018. – 137 с.

17. Дубинкин, Д.М. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, Г.О. Котиев, А.В. Карташов // Техника и технология горного дела. – 2019. – №3. – С. 50-66.

18. Анистратов, Ю.И. Технология открытых горных работ. – М.: Недра, 1995. – 284 с.

19. Анистратов, К.Ю. Разработка метода формирования структуры комплексной механизации горных работ на карьерах: автореф. дис. ... доктора. тех. наук: 25.00.22 / Анистратов Константин Юрьевич. – ООО «Научно-производственная компания ГОРНОЕ ДЕЛО». – Апатиты, 2013. – 42 с.

20. Мартьянов, В.Л. Основы открытой добычи. Производственные процессы открытых горных работ: учеб. пособие / В.Л. Мартьянов, Е.В. Курехин; КузГТУ. – Кемерово, 2019. – 144 с.

21. Квагинидзе, В.С. Автомобильный транспорт на карьерах. Конструкция, эксплуатация, расчет / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий: Учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 408 с.

22. Иващенко, Э.А. Горнотранспортный вскрышной комплекс Зашуланского угольного разреза / Э.А. Иващенко, Ю.М. Овешников, П.Б. Авдеев, Ю.В. Субботин // Горно-информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №3-2. – С. 90 - 98.

23. Дрыгин, М.Ю. Пути повышения производительности экскаваторного парка Кузбасса // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №1. – С. 9-17.

24. Союз горных инженеров: [сайт]. – Режим доступа. URL: <http://www.mining-portal.ru/> (дата обращения: 24.11.2021).

25. Федотенко, В.С. Выбор комплексов горного и транспортного оборудования для разработки высокого вскрышного уступа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №2. – С. 31-36.

26. Кузнецова, А.В. Теория вероятностей: методы и способы решения задач: учебное пособие / А.В. Кузнецова, Е.Н. Грибанов, Е.А. Николаева, Е.В. Гутова. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – 111 с.

27. Кузнецов, И.С. О многовариантности выбора комплекта горных машин и организации работ в забое при открытой добыче угля / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.В. Кузнецова // Сборник ежегодной международной научно-практической конференция ИИТМА КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте – 2020». – С. 207-211.

28. Ушаков, Ю.Ю. Обоснование параметров системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов: дис...канд. тех. наук.: 05.05.06: / Ушаков Юрий Юрьевич. – КузГТУ. – Екатеринбург, 2016. – 139 с.

29. Анистратов, К.Ю. Исследование показателей работы карьерных самосвалов для обоснования структуры парка и норм выработки автотранспорта / К.Ю. Анистратов, Л.В. Борщ-Компониец // Горная промышленность – 2011. – №4 (98). – С. 38-49.

30. Довженок, А.С. Оценка эффективности системы обеспечения работоспособности горного оборудования для принятия управленческих решений / А.С. Довженок, О.А. Лапаева, В.А. Хажиев // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2008. – №5. – С. 300-304.

31. Буялич, Г. Д. Исследование скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов / Г. Д. Буялич, А.С. Фурман // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – №10. – С. 22-24.

32. Вуейкова, О.Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горного карьера: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.22.10 / Вуейкова Ольга Николаевна. – ЮУрГУ (НИУ). – Оренбург, 2013. – 16 с.

33. Захаров, А.Ю. О возможности и перспективах выбора рациональных парков экскаваторно-автомобильного комплекса / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №5. – С. 32-39.

34. Журавлев, А.Г. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования / А.Г. Журавлев, А.В. Скороходов // Проблемы недропользования. – 2015. – №2. – С. 53-60.

35. Журавлев, А.Г. Выбор рациональной грузоподъемности карьерных автосамосвалов для конкретных условий транспортирования // Транспорт Урала. – 2014. – №4 (43). – С. 96-101.

36. Макаров, В.В. Повышение эффективности работы мощных экскаваторно-автомобильных комплексов на базе экспертных систем автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.22 / Макаров Владимир Валерьевич. – УГГУ. – Екатеринбург, 2006. – 24 с.

37. Зыков, П.А. Программа-каталог для подбора оптимальных моделей карьерных экскаваторов и автосамосвалов под заданные горно-геологические и технические условия / П.А. Зыков, К.О. Колупаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №2. – С. 114-117.

38. Воронов, Ю.Е. Разработка модели оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов / Ю.Е. Воронов, П.А. Зыков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №4. – С. 12-15.

39. Voronov Yuri. Functional Quality Criterion of Rock Handling Mechanization at Open-pit Mines / Yuri Voronov, Artyom Voronov // E3S Web of Conferences 21, 03003 (2017). pp. 1-8. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103003

40. Воронов, А.Ю. Оптимизация показателей функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по критерию качества / А.Ю. Воронов, А.А. Хорешок, Ю.Е. Воронов, В.Г. Ромашко, А.Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – №6. – С. 19-24.

41. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие для студентов вузов / В.Е. Гмурман. – 6-е изд., доп. – М.: Высш.шк., 2002. – 405 с.

42. Унгурияну, Т.Н. Программное обеспечение для статистической обработки данных STATA: Введение / Т.Н. Унгурияну, А.М. Гржибовский // Охрана окружающей среды. Экология человека. – №1. – 2014. – С. 60-63.

43. Minitab Inc [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.minitab.com/en-us/> (дата обращения 22.05.2019)

44. Берестнева, О.Г. Прикладная математическая статистика: учебное пособие / О.Г. Берестнева, О.В. Марухина, Г.Е. Шевелев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 188 с.

45. BestHard [Электронный ресурс]. – URL: <https://besthard.ru> (дата обращения 22.05.2019)

46. Ловцов, Д.А. Пакеты прикладных программ для многоаспектного анализа судебной статистической информации / Д.А. Ловцов, М.В. Богданова, Л.С. Паршинцева // Информационная деятельность в юридических науках. Правовая информация, Информационное право, Патентное право. Право промышленной собственности, Авторское право и смежные права, Информационная безопасность. Защита информации. – 2017. – №1. – С. 28-36.

47. MathWorks [Электронный ресурс]. – URL: mathworks.com (дата обращения 22.05.2019)
48. IBM SPSS Statistics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com> (дата обращения 22.05.2019)
49. Петухов, С.В. Исследование электропотребления и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности горных работ предприятий с открытой разработкой угля: автореф. ... канд. тех. наук. – МИСиС, Москва. –2019. – 21 с.
50. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников. – М.ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
51. Лемешко, Б.Ю. Компьютерное моделирование и исследование вероятностных закономерностей / Б.Ю. Лемешко, А.А. Горбунова, С.Б. Лемешко, С.Н. Постопапов, А.П. Рогожников, Е.М. Чимитова // Вестник Томского государственного университета. – 2013. - №1 (22). – С. 74 - 85.
52. Лемешко, Б.Ю. Исследование особенностей и мощности некоторых критериев нормальности / Б.Ю. Лемешко, А.П. Рогожников // Метрология. – 2009. – № 4. – С. 3-24.
53. Лемешко, Б.Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постопапов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с. (серия «Монографии НГТУ»).
54. Зыков, С.В. Критерии отклонения распределения случайных величин от нормального в математическом обеспечении программных систем поддержки измерений в образовании / С.В. Зыков, А.А. Незнанов, О.В. Максименкова // Программные системы: теория и приложения. – 2018. – №4 (39). – С. 219-238.
55. Мицель, А.А. Прикладная математическая статистика: Практические работы. – Томск: ТУСУР. – 2015. – С. 81.
56. Геворгян, Э.М. Идентификация законов распределения времени работы и времени восстановления измельчительного оборудования / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 6-15.
57. Губарь, Л.Н. Теория вероятностей и математическая статистика Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / Л. Н. Губарь, А.

В. Ермоленко. – Сыктывкар: Изд-во СГУ имени Питирима Сорокина, 2015. – 120 с.

58. Лемешко, Б.Ю. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко // Метрология. – 2005. – № 2. – С. 3-23.

59. Кузнецов, И.С. Повышение точности и достоверности идентификации законов распределения хронометражных данных при моделировании экскаваторно-автомобильного комплекса / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.В. Кузнецова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – №3. – С. 113-119.

60. Томашевский, В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова // М.: Бестселлер. – 2003. – 412 с.

61. Стародубов, А.Н. Разработка комплекса программ имитационного моделирования при проектировании автоматизированных производственных систем: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18. / Стародубов Алексей Николаевич. – КузГТУ. Новокузнецк, 2010. – 171 с.

62. Додонов, В.В. Использование элементов теории массового обслуживания для анализа производительности и надежности автоматизированных станочных систем // Известия высших учебных заведений. – 2011. – №12. – С. 70-76.

63. Жарков, М.Л. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.В. Супруновский, М.М. Пavidис // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №3 (51). – С. 4-14.

64. 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.

65. Зиновьев, В.В. Моделирование процессов и систем: учеб. пособие / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев; КузГТУ. – Кемерово, 2016. – 146 с.

66. Зиновьев, В.В. Разработка методов динамического моделирования горноподготовительных работ: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.16, 05.15.02 / Зиновьев Василий Валентинович. – Институт угля и углехимии СО РАН. Кемерово, 1998. – 219 с.

67. Емельянов, А.А. Модели процессов массового обслуживания // Прикладная информатика. – 2008. – №5 (17). – С. 92-130.

68. Романенко, В.А. Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта как системы массового обслуживания с нестационарными потоками и частичной взаимопомощью каналов // Управление техническими системами и технологическими процессами. – 2012. – №36. – С. 209-247.

69. Гусев, П.Ю. Моделирование и идентификация параметров многоканальных многофазных систем с нечеткими правилами дисциплинами обслуживания очереди: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18. / Гусев Павел Юрьевич. – ВГТУ. Воронеж, 2014. – 137 с.

70. Головкин, Н.И. Исследование моделей систем массового обслуживания в информационных сетях: автореф. ... д-ра. тех. наук. – ВГУЭС., Владивосток., 2007. – 39 с.

71. 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.

72. Кирпичников, А.П. Прикладная теория массового обслуживания. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 118 с.

73. Gokalp, E. Robust capacity planning for accident and emergency services // RAIRO – Operations Research. – 2020. – Т 54 (№6). – P. 1757-1773. DOI:10.1051/ro/2019112.

74. Ruuskanen, J. Improving the mean-field fluid model of processor sharing queueing networks for dynamic performance models in cloud computing / J. Ruuskanen, T. Berner, K.-E. Årzén, A. Cervin // Performance Evaluation. – 2021. – №151. P. 23. <https://doi.org/10.1016/j.peva.2021.102231>.

75. Жарков, М.Л. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.В. Супруновский, М.М. Павидис // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения – 2021. – №3 (51). – С. 4-14.

76. Митрофанов, С.В. К вопросу разработки методики организации поточной работы комплексов машин / С.В. Митрофанов, А.В. Богатов, М.Ю. Яблоков // Техника и оборудование для села – 2020. – №7 (277). – С. 12-15.

77. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб:СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

78. Стенин, Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №6. – С. 3-8.

79. Захаров, А.Ю. Основы расчета карьерного транспорта: учеб. пособие; КузГТУ. - Кемерово, 2012. – 111 с.

80. GPSS: [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.minutemansoftware.com> (дата обращения: 27.06.2019)

81. Шрайбер, Т. Моделирование на GPSS. – М.: Машиностроение, 1980. – 593 с.

82. Paredis R., Van Mielro S., Vangheluwe H. Translating process interaction world view models to devs: GPSS to (Python(p))devs // Winter simulation conference (WSC). – 2020. - p. 2221-2232. DOI10.1109/WSC48552.2020.9383952.

83. Абу-Абед, Ф. Н. Имитационная модель оценки производительности ремонтно-диагностического комплекса / Ф. Н. Абу-Абед, Д. В. Мартынов, С. В. Сергиенко, Р. Ю. Кордюков // Программные продукты и системы. – 2015. – №5. – С. 107-116. DOI:10.15827/0236-235X.109.107-116.

84. Власов, С.А. Язык моделирования GPSS World и система автоматизации имитационных исследований: опыт применения и перспективы использования / С.А. Власов, В.В. Девятков, Т.В. Девятков // Труды Четвертой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). – 2009. – С. 11-18.

85. Кудрявцев, Е.В. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Кудрявцев Е. М. – Москва: ДМК Пресс, 2004. – 317 с.

86. Матюшенко, С.И. Основы имитационного моделирования в среде GPSS World: учеб. пособие / С. И. Матюшенко, С. С. Спесивов. – Москва: Изд-во Российского ун-та дружбы, 2006 (М.: ИПК РУДН). – 110 с.

87. 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.

88. Смородин, В.С. Верификация имитационных моделей технологических процессов производства с переменной структурой // Математические машины и системы. – 2007. – №3,4. – С. 162-167.

89. Потапов, В.Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности / В.Д. Потапов, А.Д. Яризов. – М.: Высшая школа, 1981. – 189 с.

90. Грачев, Г.А. Моделирование принципа Парето: [монография] / Г. А. Грачёв; Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Южный федеральный ун-т», Научно-исслед. ин-т физики. - Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального ун-та, 2011. – 223 с.

91. Ambrisko, L. Proactive Maintenance as a Tool of Optimization for Vehicle Fleets, in Terms of Economic and Technical Benefits / L. Ambrisko, K. Teplicka // ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA. – 2021. – Vol. 18. – p.235-249.

92. Борздова, Т. В. Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel : учеб. пособие / Т. В. Борздова. – Минск: ГИУСТ БГУ, 2011. – 75 с.

93. Зак, Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Москва: Экономика, 2014. – 455 с.

94. Бродецкий, Г. Л. Системный анализ в логистике, выбор в условиях неопределённости. – М: Academia. – 2010. – 336 с.

95. Зиновьев, В.В. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса с применением имитационного моделирования / В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов, А.Н. Стародубов // Уголь. – 2021. – №7. – С. 9-12.

96. Белов, В.В. Оригинальная свертка двух критериев для задач выбора наилучшего варианта / В.В. Белов, А.К. Лопатин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №8. – С. 14-19.

97. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация / Штойер Р. : пер. с англ. - М. : Радио и связь, 1992. – 504 с. – (Теория, вычисления и приложения).

98. Корнеев, В.П. Методы оптимизации / Корнеев В.П. – М.: Высшая школа, 2007. – 664 с.
99. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 64 с.
100. Ногин, В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – №4. – С. 73-82.
101. Домашкова, Д.В. Методы решения задач многокритериальной оптимизации: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / Д.В. Домашкова. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 49 с.
102. Кузнецов, И.С. О выборе алгоритма и критерия оптимизации для выбора рационального комплекта горных машин в составе экскаваторно-автомобильного комплекса / И.С. Кузнецов, П.И. Николаев // Сборник материалов XIII Всероссийской, научно - практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово. – 2021. – С. 095030.1-095030.8
103. Хивинцев, М.А. Агрегированная с многоагентным генетическим алгоритмом имитационная модель предприятия дистанционной торговли для решения задачи многокритериальной оптимизации: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18. / Хивинцев Максим Андреевич. НИУ ВШЭ. – Москва, 2015. – 110 с.
104. Mendes, J. B., M.F.S.V. D'Angelo, Maia N. A., Veloso R. R. A Hybrid Multiobjective Evolutionary Algorithm for Truck Dispatching in Open-Pit-Mining // IEEE Latin America Transactions. – 2016. – Т.14. – №3. – p. 1329-1334. DOI:10.1109/TLA.2016.7459617.
105. Wang, H., Tonorio V., Li GQ., Hou J., Hu NL. Optimization of trackless equipment scheduling in underground mines using genetic algorithms // Mining metallurgy & exploration. – 2020. – №5. – p. 1531-1544. DOI:10.1007/s42461-020-00285-8.
106. Курейчик, В.В. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами / В.В. Курейчик, С.И. Родзин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – №4. – С. 16-24.
107. Зиновьев, В.В. Новый подход к обоснованию геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И.

Николаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №5. – С. 37-43.

108. Загороднев, Д.И. Оптимизация материальных потоков в распределенной системе управления машиностроительного предприятия на основе эвристических алгоритмов / Д.И. Загороднев, Л.А. Санакулова, Л.А. Симонова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2010. – №3. – С. 101-107.

109. Коновалов, И.С. Применением генетического алгоритма для решения задачи покрытия множеств / И.С. Коновалов, В.А. Фаткхи, В.Г. Кобак // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – №3 (86). – С. 125-132.

110. Кузнецов, И.С. Компьютерная система имитационного моделирования для оптимизации параметров экскаваторов и автосамосвалов / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // ГИАБ. – 2021. – №6. – С. 304-316.

111. Кузнецов, И.С. Специализированная компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров открыто-подземной геотехнологии / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, П.И. Николаев, А.В. Кузнецова // Труды десятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). – 2021. – С. 243-249.

112. Кузнецов, И.С. Разработка структурной схемы специализированной системы имитационного моделирования открыто-подземной геотехнологии // Ежегодная конференция молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие - 2021» [Электронный ресурс] : сборник трудов конференции 11-13 мая 2021 г. ; отв. ред. А.Е. Майоров - Электронные текстовые дан. - Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2021. – С. 16-21.

113. Кузнецов, И.С. Разработка методики выбора параметров горных машин в составе экскаваторно-автомобильного комплекса // Сборник материалов XIII Всероссийской, научно - практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово. – 2021. - С. 010603.1-010603.5.

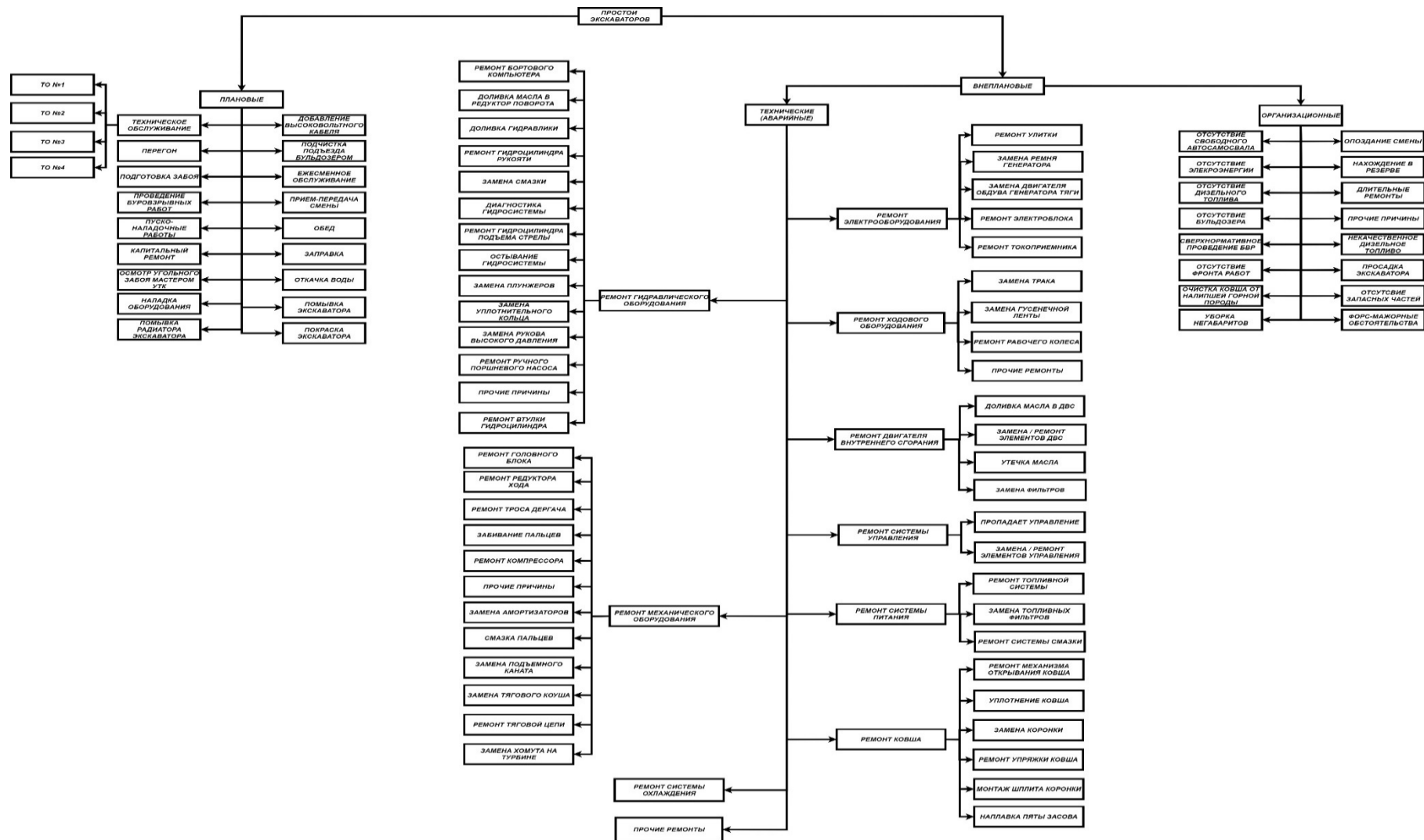
114. Кузнецов, И.С. Анимационное представление работы экскаваторно-автомобильного комплекса / И.С. Кузнецов, В.А. Крамаренко // Сборник

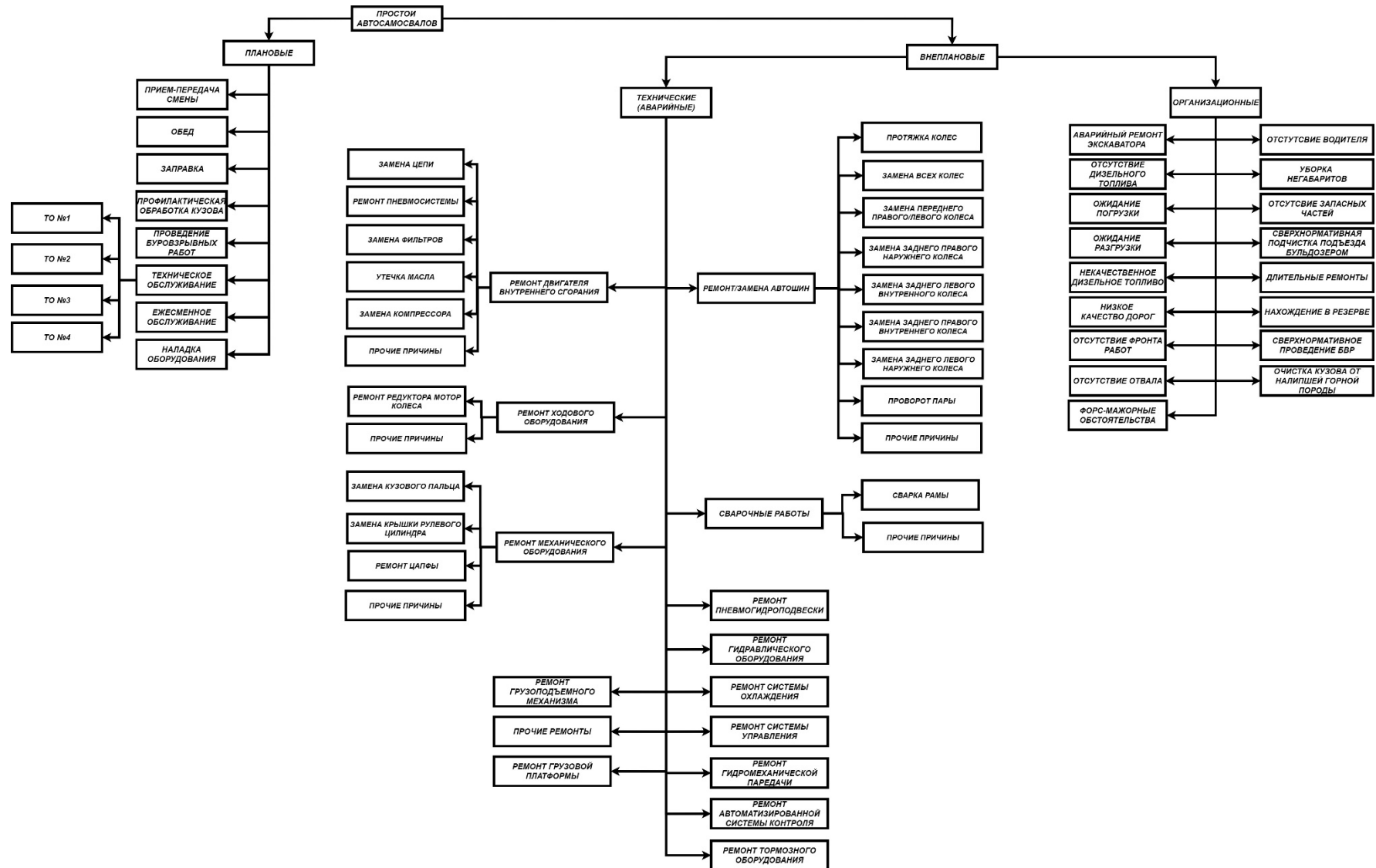
материалов XI Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово. – 2019. – С. 30109.1 - 30109.6

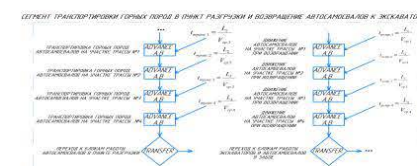
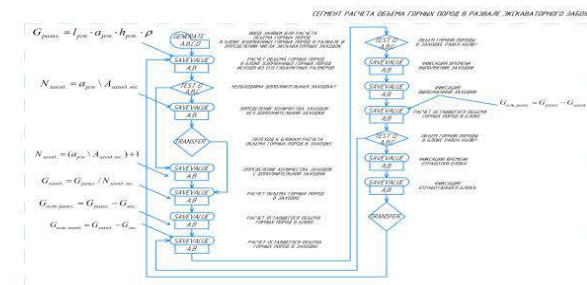
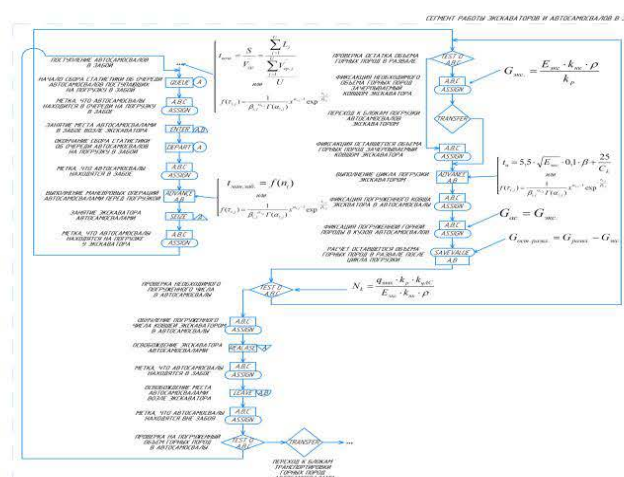
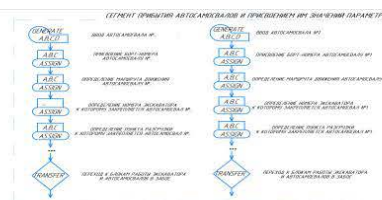
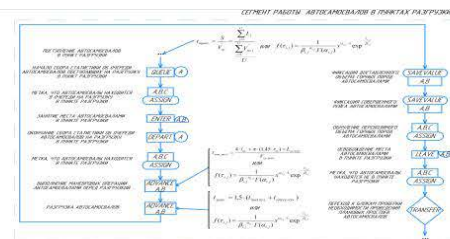
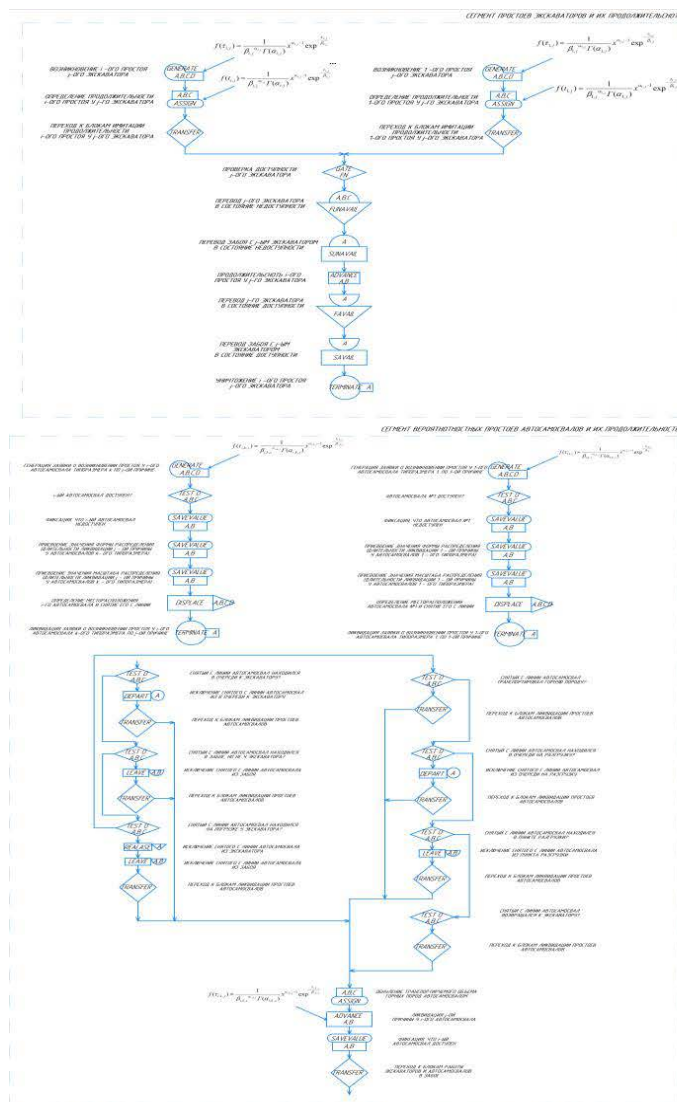
115. Макаров, В. Н. Достижение наивысших рекордных показателей месячной производительности экскаваторов ЭКГ-18 на разрезах ЗАО «Стройсервис» / В.Н. Макаров, К.Ю. Анистратов // Уголь. – 2019. – № 1. – С. 20-26.

116. Макарова, И.Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. – 2015. – №1. – С. 87 – 94.

ПРИЛОЖЕНИЕ А







ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»

Согласовано:

Директор Новационной фирмы
«КУЗБАСС-НИИЮГР», к.т.н.
С.И. Протасов
«14» 06 2022 г.



Утверждаю:

Директор
ФИЦ УУХ СО РАН, к.т.н.
В.Н. Кочетков
«14» 06 2022 г.



МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ

к.т.н. В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов

Кемерово 2022

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661173

**Система имитационного моделирования для
оптимизации параметров карьерных экскаваторно-
автомобильных комплексов с учетом внеплановых
простоев**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и
углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»
(RU)*

Авторы: *Кузнецов Игорь Сергеевич (RU), Зиновьев Василий
Валентинович (RU), Николаев Пётр Игоревич (RU), Стародубов
Алексей Николаевич (RU), Крамаренко Виталий Александрович
(RU)*

Заявка № 2022619692

Дата поступления 31 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 6816930779, 4c4970394edbd24145d5c7
Владимир Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 20.01.2022 по 28.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021663272

**Специализированная компьютерная система
имитационного моделирования для исследования
параметров безлюдной открыто-подземной
геотехнологии**

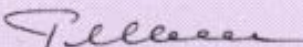
Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и
углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»
(RU)*

Авторы: *Кузнецов Игорь Сергеевич (RU), Зиновьев Василий
Валентинович (RU), Стародубов Алексей Николаевич (RU),
Николаев Пётр Игоревич (RU), Крамаренко Виталий
Александрович (RU)*

Заявка № **2021662261**
Дата поступления **06 августа 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **13 августа 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**