

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Российской Федерации
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачёва»

На правах рукописи

Воронов Артём Юрьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО-
АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ**

05.05.06 – «Горные машины»

05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор А.Ю. Захаров

Кемерово 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ	9
1.1 Характеристика экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса и необходимость рационального распределения карьерных самосвалов	9
1.2 Обзор и анализ существующих методов совершенствования работы экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров	18
1.3 Мировой опыт внедрения систем диспетчеризации на карьерах	41
1.4 Современные требования к системам диспетчеризации карьерного автотранспорта. Цель и задачи исследования	51
2 ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА	57
2.1 Характеристика двухуровневой диспетчерской модели экскаваторно-автомобильного комплекса	57
2.2 Программно-целевая модель для планирования погрузки и перевозок	60
2.3 Формирование групп диспетчеризации в составе экскаваторно-автомобильного комплекса	64
2.4 Определение рациональной структуры парков техники в составе экскаваторно-автомобильного комплекса	70
Выводы	85
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА	87
3.1 Анализ существующих моделей описания функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса	87
3.1.1 Марковская модель погрузочно-транспортной системы карьера	87

3.1.2	Экскаваторно-автомобильные комплексы разрезов как автотранспортные системы массового обслуживания	91
3.2	Алгоритмическое обеспечение распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки	94
3.3	Принципы имитационного моделирования погрузочно-транспортного процесса экскаваторно-автомобильного комплекса	104
3.3.1	Концепция оптимизационных расчётов на имитационной модели экскаваторно-автомобильного комплекса	118
3.3.2	Методика сбора и обработки исходных данных	121
3.3.3	Разработка и программирование имитационной модели экскаваторно-автомобильного комплекса	124
	Выводы	149
4	ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА «КЕДРОВСКИЙ»	150
4.1	Анализ результатов имитационного моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса	150
4.1.1	Определение оптимальной организации работы экскаваторно- автомобильного комплекса и структуры парков горной техники . .	150
4.1.2	Исследование приоритетности экскаваторов (маршрутов)	163
4.2	Разработка рекомендаций по повышению эффективности функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса разреза .	168
4.2.1	Особенности реализации алгоритма оптимального распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки	168
4.2.2	Оценка экономической эффективности мероприятий по внедрению алгоритма оптимального распределения карьерных самосвалов . .	175
	Выводы	180
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	182
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современных условиях основная технологическая задача деятельности любого предприятия открытых горных разработок – выемка, погрузка и вывоз горной массы – выполняется мощными экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК), представляющими собой единую систему в составе горнодобывающего предприятия.

Эффективность работы ЭАК во многом определяется эффективностью взаимодействия элементов этой системы (карьерных экскаваторов и самосвалов), характеризуемой величиной простоев оборудования в течение смены в ожидании работы. Для самосвалов эти простои достигают до 30% рабочего времени.

Основные резервы сокращения простоев погрузочно-транспортного оборудования заключены в повышении эффективности применяемой системы диспетчеризации карьерного автотранспорта в составе ЭАК разреза.

В настоящее время существует ряд таких систем, предлагающих потенциальное увеличение эксплуатационной производительности ЭАК и вытекающей из этого экономии. Однако эффективность работы ЭАК в конкретных условиях зависит от существующих парков погрузочно-транспортной техники, используемой стратегии диспетчеризации карьерного автотранспорта и множества других аспектов, присущих данному предприятию.

Вопросы эффективности совместной работы карьерных экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК на сегодняшний день исследованы недостаточно, поэтому задача исследования и оптимизации функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов посредством совершенствования системы распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки представляется актуальной.

Степень разработанности. Вопросам организации, планирования и моделирования работы карьерного автотранспорта посвящены работы отечественных и зарубежных учёных и специалистов, таких как К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, И.В. Зырянов, Б.Л. Герике, А.Ф. Клебанов, Ю.В. Стенин, О.Н. Вуейкова, М.Е. Ко-

рягин, А.Б. Логов, а также S. Alarie, C. Burt, M. Gamache и многие другие. Анализ исследований показал, что вероятностная природа погрузочно-транспортного процесса ЭАК при решении задачи распределения карьерных самосвалов учитывается в них недостаточно. В предлагаемых диспетчерских критериях затрагивается, как правило, лишь один аспект работы ЭАК (простой только экскаваторов или только самосвалов).

Цель работы заключается в повышении эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов посредством оптимизации распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки.

Идея работы состоит в максимальном учёте стохастического характера погрузочно-транспортных процессов в экскаваторно-автомобильном комплексе и использовании имитационного моделирования для их описания и оптимизации.

Поставленная цель определяет следующие основные **задачи работы**:

1. Провести анализ и сравнительную оценку существующих методов диспетчеризации карьерного автотранспорта для выявления перспективных направлений их совершенствования.

2. Разработать двухуровневую диспетчерскую модель экскаваторно-автомобильного комплекса разреза на основе анализа существующих методов диспетчеризации.

3. Разработать имитационную модель и алгоритм оптимизации распределения самосвалов на нижнем уровне диспетчерской модели, и создать на их базе программный комплекс.

4. Испытать программный комплекс и оценить влияние предложенных решений на эксплуатационную производительность экскаваторно-автомобильного комплекса разреза.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– в критерии принятия решений по распределению самосвалов по пунктам погрузки впервые учтён предложенный в работе параметр приоритетности экскаваторов (маршрутов);

– разработана имитационная программа для численного моделирования процессов в экскаваторно-автомобильных комплексах, отличающаяся тем, что минимизирует потери от простоев оборудования для различного количества работающих самосвалов, а также итерационно формирует набор оптимальных значений параметров приоритетности экскаваторов (маршрутов);

– предложены новые принципы формирования групп диспетчеризации в составе экскаваторно-автомобильного комплекса: расположение экскаваторов на одном участке горных работ, однородность парка работающих с ними самосвалов, вывоз горной массы на один отвал.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная двухуровневая диспетчерская модель ЭАК разреза может использоваться для моделирования и оптимизации различных ситуаций в ЭАК с учётом специфики конкретных предприятий. Внедрение разработанного программного комплекса даёт возможность повысить эксплуатационную производительность ЭАК за счёт снижения простоев оборудования, а также может являться основой создания отечественной автоматизированной системы диспетчеризации (АСД) карьерного автотранспорта как продукта импортозамещения.

Методология и методы исследований: дискретно-событийное имитационное моделирование, методы линейного программирования, теории массового обслуживания, статистической обработки данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для минимизации простоев и повышения эксплуатационной производительности карьерных экскаваторов и самосвалов в критерии принятия решений по распределению самосвалов на нижнем уровне предложенной двухуровневой диспетчерской модели экскаваторно-автомобильного комплекса следует учитывать приоритетность экскаваторов и соответствующих им маршрутов транспортирования горной массы.

2. Имитационная программа для численного моделирования процессов в экскаваторно-автомобильных комплексах, учитывающего совокупность всех влияющих факторов – мощность экскаваторов, соответствие карьерных экскава-

торов и самосвалов друг другу, скоростные характеристики самосвалов, закономерности отказов и восстановления работоспособности оборудования, показатели внешней горной среды, – минимизирует потери от простоев оборудования и формирует набор оптимальных значений параметров приоритетности экскаваторов (маршрутов).

3. Работу экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов целесообразно организовывать по комбинированному открыто-закрытому циклу с разделением действующих карьерных экскаваторов и самосвалов на группы диспетчеризации, формирование которых производится по принципу расположения экскаваторов на одном участке горных работ, однородности парка работающих с ними самосвалов с вывозом горной массы на один отвал.

Достоверность научных результатов подтверждается корректным выбором критериев эффективности, использованием апробированных методов имитационного моделирования, сходимостью результатов моделирования с фактическими показателями работы карьерного автотранспорта на действующем предприятии в одинаковых условиях.

Личный вклад автора заключается в выполнении теоретических и натурных исследований; в разработке имитационной модели ЭАК разреза, алгоритма оптимального распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки и его программной реализации; в подготовке публикаций по теме.

Реализация результатов работы. Основные научные результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь»», а также в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва».

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и одобрены на XIII и XIV Международных научно-практических конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС)» (г. Кемерово, 2010, 2012); XIV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (г. Кемерово, 2012); III Международной научно-практической конференции «Перспек-

тивы развития и безопасность автотранспортного комплекса» (г. Новокузнецк, 2013); VI Всероссийской научно-практической конференции «Россия молодая» (г. Кемерово, 2014).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации баз данных и программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 197 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 126 наименований, содержит 35 рисунков и 27 таблиц.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1 Характеристика экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса и необходимость рационального распределения карьерных самосвалов

Открытый способ разработки твёрдых полезных ископаемых является преобладающим во всём мире, в частности, в России и странах СНГ. Удельный вес открытого способа добычи за последние десятилетия в СНГ достиг высокого уровня (в среднем около 75%) и, по прогнозам, будет долго сохраняться на этом уровне. Высокий удельный вес открытого способа объясняется его преимуществами перед подземным способом: производительность труда выше в 3-4 раза по рудным карьерам и в 10-11 раз по угольным; себестоимость продукции ниже в 3-4 раза; сроки строительства предприятий сокращаются в 2-3 раза [1].

Вскрышные и добычные работы на карьерах выполняются преимущественно экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК) большой единичной мощности, производительностью от 700 до 1400 тыс. м³ в год [2]. Характеристика ЭАК разрезов, входящих в ОАО «УК "Кузбассразрезуголь"», приведена в таблице 1.1. В таблице приведены экскаваторы и карьерные самосвалы, занятые только на вскрышных работах. Добычные и смешанные ЭАК в настоящей работе не рассматриваются. Общий анализ показывает, что ЭАК разрезов характеризуются большим разнообразием парков экскаваторов (от 2 до 11 типоразмеров) и небольшим количеством типоразмеров (однородностью) парков самосвалов (от 1 до 3). В соответствии с этим ЭАК разрезов Кузбасса можно условно разделить на 3 группы:

- сложные, включающие 10 и более типоразмеров экскаваторов и 2-3 типоразмера карьерных самосвалов (разрезы «Краснобродский» и «Талдинский»);
- средней сложности, имеющие около 5 типоразмеров экскаваторов и 2-3 типоразмера карьерных самосвалов (разрезы «Кедровский», «Бачатский» и «Калтанский»);

– простые, состоящие из 1-2 типоразмеров экскаваторов и одного типоразмера карьерных самосвалов (разрез «Моховский»).

Общая производительность ЭАК во многом определяется временем загрузки карьерных самосвалов и характеристиками их движения. Кроме того, количество и типоразмеры карьерных самосвалов и экскаваторов – два важнейших фактора в определении рациональных параметров открытых горных работ (ОГР). Если количество работающих одновременно карьерных самосвалов и экскаваторов в ЭАК не сбалансировано, это может привести к их простоям и снижению их производительности. Если карьерных самосвалов больше, чем требуется, то они будут простаивать у экскаваторов в ожидании погрузки; если меньше – будут простаивать экскаваторы в ожидании работы.

В то же время, даже если количество карьерных экскаваторов и самосвалов в ЭАК сбалансировано, простои могут возникать, если самосвалы распределяются между экскаваторами нерационально, или если с конкретными экскаваторами работают самосвалы разных типоразмеров. Это приводит к существенным потерям рабочего времени машин, снижению их производительности, невыполнению сменной выработки и, как итог, к снижению общей эксплуатационной производительности ЭАК. Вместе с тем, даже небольшое увеличение производительности ЭАК позволит сэкономить значительные средства за счёт сокращения капитальных вложений для приобретения и замены техники. Следовательно, от того, насколько рационально осуществляется распределение карьерных самосвалов по пунктам погрузки, соответствующим маршрутам и пунктам разгрузки, в значительной степени зависит эффективность функционирования ЭАК и горных работ в целом.

Как уже указывалось, одна из главных проблем на ОГР – выбор парков карьерных самосвалов и экскаваторов, которые бы в наибольшей степени соответствовали определённым критериям. Эта проблема решается и на этапе проектирования карьера, и планирования его работы, и в ходе его функционирования, когда может появиться потребность в реконструкции. Решение заключается в эффективном прогнозировании технико-эксплуатационных показателей (ТЭП)

Таблица 1.1 – Характеристика ЭАК разрезов ОАО «УК "Кузбассразрезуголь"»

Разрез «Кедровский»							
Самосвалы		Экскаваторы					
		ЭКГ-10	ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12ус	Liebherr R994 (13 м ³)	ЭКГ-15	P&H-2800 (33 м ³)	
БелАЗ-75131	6	1	2	1	3		
БелАЗ-75306	26					2	
Характеристика ЭАК: 5 типоразмеров экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 33 м ³ ; 2 типоразмера самосвалов – БелАЗ-75131 (130 т, 6 ед.) и БелАЗ-75306 (220 т, 26 ед.)							
Разрез «Моховский»							
Самосвалы		Экскаваторы					
		ЭКГ-10			Liebherr R994 (13 м ³)		
БелАЗ-75131	32	4			2		
Характеристика ЭАК: 2 типоразмера экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 13 м ³ ; 1 типоразмер самосвалов – БелАЗ-75131 (130 т, 32 ед.)							
Разрез «Бачатский»							
Самосвалы		Экскаваторы					
		ЭКГ-10	ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12ус	ЭКГ-15	P&H-2800 (33 м ³)	WK-35 (35 м ³)	P&H-4100 (56 м ³)
БелАЗ-75131	1	2	2	6			
БелАЗ-75302	22						
БелАЗ-75306	38				2	2	
БелАЗ-75600	10						1
БелАЗ-75601	1						
Характеристика ЭАК: 6 типоразмеров экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 56 м ³ ; 3 основных типоразмера самосвалов – БелАЗ-75131 (130 т, 1 ед.); БелАЗ-75302 и БелАЗ-75306 (220 т, 60 ед.); БелАЗ-75600 и БелАЗ-75601 (320 и 360 т, 11 ед.)							

Продолжение таблицы 1.1

Разрез «Краснобродский»															
Самосвалы		Экскаваторы													
		ЭКГ-10	ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12ус	ЭКГ-15	Terex RH120 (16 м ³)	ЭКГ-18, ЭКГ-18Р	Terex RH170 (20 м ³)	Terex RH200 (26 м ³)	Komatsu PC5500 (28 м ³)	ЭКГ-32	P&H- 2800 (33 м ³)	WK-35 (35 м ³)			
БелАЗ-75131	23	5	6	1	2										
БелАЗ-75137	2														
БелАЗ-75302	15							2	1	1	1	1	1	1	
БелАЗ-75306	52														
Характеристика ЭАК: 11 типоразмеров экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 35 м ³ ; 2 основных типоразмера самосвалов – БелАЗ-75131 и БелАЗ-75137 (130 т, 25 ед.); БелАЗ-75302 и БелАЗ-75306 (220 т, 67 ед.)															
Разрез «Галдинский»															
Самосвалы		Экскаваторы													
		ЭКГ-10	CAT-5130 (11 м ³)	ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12ус	Liebherr R994 (13 м ³)	ЭКГ-15	ЭКГ-18Р, ЭКГ-1500Р	Liebherr R9350 (18 м ³)	Hitachi EX3600-6 (22 м ³)	P&H- 2800 (33 м ³)	WK-35 (35 м ³)	P&H- 4100 (56 м ³)			
БелАЗ-75131	33	7	1	3	2	4									
БелАЗ-75137	1														
БелАЗ-75302	13									4	4	1			
БелАЗ-75306	62												1	2	
БелАЗ-75600	9										1				
БелАЗ-75601	1														
Характеристика ЭАК: 11 типоразмеров экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 56 м ³ ; 3 основных типоразмера самосвалов – БелАЗ-75131 и БелАЗ-75137 (130 т, 34 ед.); БелАЗ-75302 и БелАЗ-75306 (220 т, 75 ед.); БелАЗ-75600 и БелАЗ-75601 (320 и 360 т, 10 ед.)															

Окончание таблицы 1.1

Разрез «Калганский»						
Самосвалы		Экскаваторы				
		ЭКГ-10	Terex RH90C (10 м ³)	ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12ус	Liebherr R994 (13 м ³)	ЭКГ-15
БелАЗ-75131	21	8	1	1	1	1
БелАЗ-75137	6					
БелАЗ-75306	11					
Характеристика ЭАК: 6 типоразмеров экскаваторов с ёмкостью ковша от 10 до 18 м ³ ; 2 основных типоразмера самосвалов – БелАЗ-75131 и БелАЗ-75137 (130 т, 27 ед.) и БелАЗ-75306 (220 т, 11 ед.)						

работы ЭАК в конкретных условиях. Поэтому для достижения оптимальности работы предприятий открытой добычи полезных ископаемых очень важно, чтобы целевые установки ТЭП определялись по возможности точно и охватывали все этапы процесса добычи.

Известно, что затраты на транспорт составляют на большинстве карьеров до 50% от общих затрат. Чтобы снизить транспортные расходы, прилагаются значительные усилия: повышение производительности и надёжности функциональных машин, составляющих ЭАК; соблюдение рационального соотношения вместимостей кузовов карьерных самосвалов и ковшей экскаваторов; использование внутрикарьерных дробильных и конвейерных комплексов в сочетании с самосвалами (циклично-поточная технология); применение троллейбусов для сокращения рабочих циклов. Ещё одна концепция будущего – использование карьерных самосвалов без водителей, что позволит сэкономить на найме и содержании водителей, а также исключить человеческий фактор из транспортного процесса [3].

Задача сокращения затрат путём более эффективного использования и самосвалов, и экскаваторов в составе ЭАК является первостепенной задачей диспетчеризации карьерного автотранспорта. Диспетчеризация является динамическим процессом, требующим непрерывного мониторинга маршрутов, типоразмера и местоположения карьерных самосвалов и экскаваторов с целью нахождения рационального распределения. Применяя диспетчеризацию, можно рассчитывать либо на повышение производительности ЭАК с имеющимся парком техники, либо на обеспечение желаемой производительности с меньшим количеством техники. Эта цель достигается путём сокращения простоев и улучшения тем самым использования техники. Карьерные самосвалы производительны лишь тогда, когда перевозят горную массу, а погрузочные машины – когда загружают горную массу в самосвал. Простои характеризуют непроизводительное использование техники и должны быть оптимизированы, то есть сведены к минимуму.

В то же время, рассматривая ЭАК разрезов Кузбасса (таблица 1.1), можно отметить следующее.

Диспетчеризацией карьерного автотранспорта простых ЭАК в настоящее время заниматься нет необходимости, поскольку она не даст вышеуказанного эффекта. Достаточно известными методами оптимизировать численность парка карьерных самосвалов.

Кроме того, сразу рассматривать сложные ЭАК также нерационально. Есть смысл начать с рассмотрения ЭАК средней сложности, которых, во-первых, больше других и, во-вторых, их исследование не так трудоёмко, как сложных ЭАК, хотя методология такого исследования будет, очевидно, той же, что и ЭАК средней сложности. Поэтому в качестве объекта исследований выбраны погрузочно-транспортные процессы и техника ЭАК разреза «Кедровский».

Ознакомление с опытом работы карьеров, отражённом в периодической научной литературе последних лет, выявило отсутствие заметных достижений в области организации производства, в деле сокращения простоев оборудования. Более того, ведущие специалисты в этой области отмечают, что на отечественных карьерах до сих пор используются фактически те же методы организации ОГР, что и 50 лет назад. В результате уровень использования экскаваторов (в том числе и высокопроизводительных импортных) на большинстве карьеров не претерпел изменений и остаётся в пределах 50-60% календарного времени. Утверждается, что в данном вопросе практика значительно отстала от теории организации производства и управления [4, 5]. Кроме того, традиционный способ организации погрузочно-транспортного процесса по «закрытому циклу» (см. п. 1.2) приводит и к значительным простоям карьерных самосвалов.

Классификация простоев технологического автотранспорта, принимаемых к учёту в угледобывающих компаниях, в том числе и в ОАО «УК "Кузбассразрезуголь"», выглядит следующим образом.

Плановые простои – это простои, продолжительность которых определена нормативными документами (например, [6]). Они являются регламентированными величинами, установленными для конкретных условий эксплуатации горного оборудования в составе ЭАК. Их пересмотр возможен только при изменении горнотехнических условий.

Неплановые простои – простои исправных машин в течение смены. Эти машины уже приняты в эксплуатацию на конкретную смену, но по не зависящим от водителя (машиниста) причинам не могут участвовать в работе и, соответственно, выполнять сменное задание.

Структура простоев технологического автотранспорта на разрезе «Кедровский» представлена на рисунке 1.1.

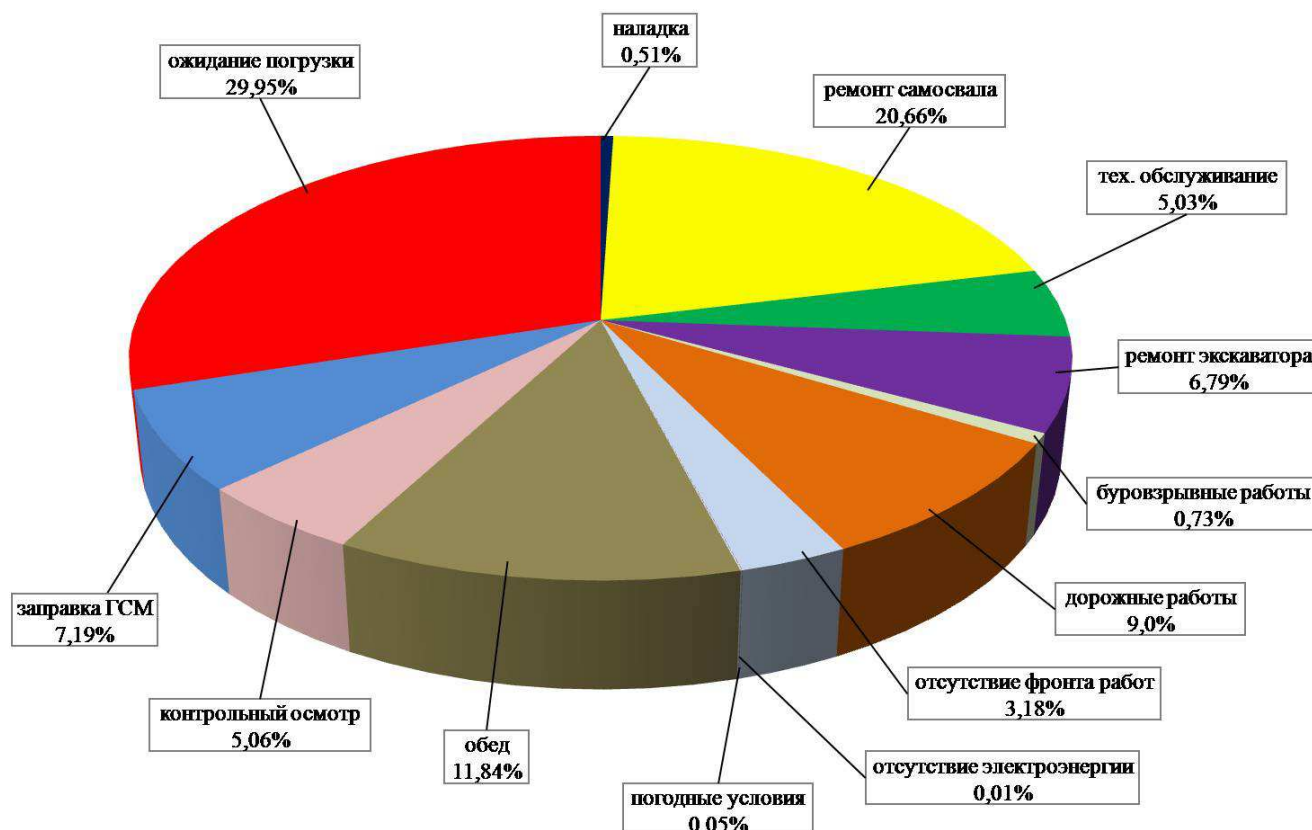


Рисунок 1.1 – Структура простоев технологического автотранспорта на разрезе «Кедровский»

Как видно из диаграммы, приведённой на рисунке 1.1, простои в ожидании погрузки составляют почти треть всех простоев карьерных самосвалов. Это не те простои, которых нельзя избежать, и возникают они исключительно по причине неудовлетворительной организации работы автотранспорта. Если же учитывать и простои, связанные с выходом из строя и дальнейшим восстановлением работоспособности оборудования (ремонт карьерных самосвалов и экскаваторов), то общие простои составят 57,4%.

В целом, тенденции изменения простоев остаются неудовлетворительными. Так, в 2008 г. рост unplanned простоев технологического автотранспорта на разрезе «Кедровский» по сравнению с 2007 г. составил 57,2%, а в пересчёте на один среднесписочный автосамосвал – 58%. Это привело к снижению сменной производительности на 4,8% и 4,9% для моделей БелАЗ-75306 и БелАЗ-75131 соответственно. В результате роста простоев не добыто 57,9 тыс. тонн угля, что привело к недополучению выручки от реализации угля только за 5 месяцев 2008 г. в размере 59,9 млн. рублей [7].

Рост простоев приводит к необходимости закупки дополнительных карьерных самосвалов для выполнения производственной программы. Снижение же простоев даёт реальную возможность сокращения капитальных затрат на приобретение новых машин. Разумеется, от всех простоев в реальных условиях производства избавиться невозможно, но даже при сокращении их части можно выявить скрытые резервы и возможности предприятий открытой угледобычи.

Сложившаяся ситуация говорит о слабости аналитической работы на предприятиях, в частности, в плане выявления причин unplanned простоев карьерной техники. Существующие системы управления горнотранспортными комплексами, к примеру, компании «Mincom» (Австралия), хотя и фиксирует продолжительность и укрупнённые признаки простоев каждого вида карьерного оборудования, но не в состоянии выявить первичные причины простоев [8].

Таким образом, ЭАК является сложной системой, свойства и взаимосвязи которой в большинстве случаев являются стохастическими, поскольку зависят от множества конкретных условий: конфигурации карьера, характера перевозимой горной массы (вскрышных пород или полезного ископаемого), состава парков техники и их состояния, организации работы. Мировая практика показывает, что в последние годы средняя производительность работы карьерного горного оборудования имеет тенденцию к снижению, в том числе и по указанным выше причинам (например, производительность карьерных самосвалов в 2006-2010 гг. снизилась на 41%, даже несмотря на новые технологические достижения [9, 10]).

В связи с этим главной задачей настоящих исследований должно стать установление экономически-целесообразного режима работы карьерного автотранспорта и минимизация простоев задействованных в работе ЭАК экскаваторов и самосвалов, за счёт чего и достигается повышение эксплуатационной производительности ЭАК.

Возможность минимизации простоев может быть достигнута, кроме рационализации парков погрузочно-транспортной техники, путём создания алгоритма оптимального распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки (повышением качества применяемой системы диспетчеризации карьерного автотранспорта в составе ЭАК разреза).

1.2 Обзор и анализ существующих методов совершенствования работы экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров

Создать единый оптимальный алгоритм для решения проблемы диспетчеризации карьерного автотранспорта не представляется возможным, и в каждом конкретном случае решается задача локальной оптимизации работы ЭАК с применением как эвристических (эмпирических), так и математических методов.

Проблема диспетчеризации карьерного автотранспорта заключается в том, что для каждого самосвала, покидающего зону разгрузки, диспетчер должен определить наиболее подходящий пункт погрузки. Обычно таким пунктом является тот, который в наибольшей степени удовлетворяет так называемому «диспетчерскому критерию» [11]. При распределении карьерных самосвалов между погрузочными пунктами используются различные критерии, и их общая цель – либо максимизировать производительность ЭАК, либо минимизировать простои самосвалов или экскаваторов в заданных условиях. В работах [11, 12] даётся подробное описание этих критериев и существующих методов диспетчеризации.

Проблема диспетчеризации карьерного автотранспорта во многом отличается от диспетчерских задач обычного грузового транспорта. Прежде всего, задача диспетчеризации в карьере не так сложна, как проблемы обычных грузовых перевозок и логистики. Каждый раз, когда карьерный самосвал направляется на

тот или иной погрузочный пункт, ему автоматически задаётся определённый маршрут, а значит, проблема маршрутизации карьерных перевозок устраняется сама собой. Кроме того, карьерный самосвал всегда транспортирует только однородный груз, причём объём и масса партии груза, перевозимого карьерным самосвалом, почти всегда равняется вместимости его кузова или грузоподъёмности. Одновременно решается и второй вопрос распределения грузовых транспортных средств (ТС) в течение рабочей смены, а именно: когда направлять карьерный самосвал под очередную погрузку? В карьере самосвал после разгрузки сразу же направляется к экскаватору.

Таким образом, задачу распределения карьерных самосвалов можно рассматривать как упрощённый вариант аналогичной задачи, существующей в других отраслях промышленности. Однако диспетчеризация карьерных самосвалов имеет и некоторые особенности, не характерные для обычных грузовых перевозок. Карьеры являются закрытыми системами, поэтому пункты погрузки и разгрузки остаются на своих местах в течение достаточно длительного времени, обычно превышающего по продолжительности рабочую смену. Кроме того, продолжительности рейсов карьерных самосвалов (10-25 мин) малы по сравнению с продолжительностью смены, а частота возникновения потребности в пунктах погрузки высока (каждые 3-5 мин) [12]. Однако, поскольку система является закрытой, и все потребности хорошо известны, можно с достаточно высокой точностью прогнозировать развитие событий в ближайшей перспективе. Поэтому, хотя рабочие процессы в ЭАК карьера имеют склонность к стохастичности (например, в случае выхода из строя самосвалов или экскаваторов), детерминированная составляющая диспетчеризации в карьере достаточно велика в отличие от диспетчеризации обычных грузовых перевозок, которые имеют стохастическую природу в любой момент времени.

Эффективность работы карьерного автотранспорта зависит от структуры парка техники и расстояния перевозок. Недостаточное количество карьерных самосвалов приводит к значительным простоям экскаваторов (ЭАК недогружен), а их избыток увеличит очереди у погрузочных пунктов (ЭАК перегружен). Авторы

работ [13 – 20] изучали проблему определения оптимальной численности парка оборудования во избежание возникновения подобных ситуаций. Исследования показали, что при аналитическом определении структуры парка оптимальное количество самосвалов обычно оказывается завышенным, поскольку за исходный часто принимается тот факт, что самосвалы всегда работают в одних и тех же пунктах погрузки и разгрузки. А поскольку это далеко не всегда так (всё зависит от выбранного способа диспетчеризации), то для достижения большей точности оценки оптимальной структуры парка потребуется моделирование процессов, протекающих в ЭАК. Отсюда следует, что структура парка горной техники может быть оптимизирована только для выбранного способа диспетчеризации.

Существует два основных подхода к распределению карьерных самосвалов – одноуровневый и мультиуровневый [12]. При одноуровневом подходе самосвалы распределяют между экскаваторами, руководствуясь лишь имеющимся опытом, без учёта каких бы то ни было специфических производственных задач или условий. По сути это эвристический подход, имеющий сугубо эмпирический характер. В системах с мультиуровневым подходом проблема диспетчеризации разбивается обычно на два уровня: на верхнем уровне происходит установление норм выработки для каждого экскаватора, на нижнем – распределение самосвалов между экскаваторами, которое осуществляется так, чтобы свести к минимуму отклонения от задания, установленного на верхнем уровне. Для определения целевых установок (ЦУ) на верхнем уровне обычно используется линейная или нелинейная программно-целевая модель, а на нижнем уровне – эвристический метод, так как диспетчерское решение должно приниматься в реальном времени. Многолетняя практика диспетчеризации на карьерах показывает, что в большинстве случаев на нижнем уровне предпочитают использовать методы приближенные, но позволяющие получить быстрые решения, нежели точные решения оптимальными методами, поскольку точные решения требуют больших затрат времени.

Авторы работы [21] отмечают, что использование мультиуровневого подхода только тогда даёт эффект, когда производственное задание, установленное на верхнем уровне, точно отражает текущее положение дел, поскольку только в этом

случае можно принять оптимальное решение в реальной ситуации. А поскольку условия функционирования ЭАК в карьере не являются статичными и могут достаточно часто и быстро изменяться, то мультиуровневые системы, чтобы быть эффективными, должны вовремя (быстро) реагировать на подобные изменения.

Автоматизированные системы диспетчеризации (АСД) предполагают производить распределение самосвалов между экскаваторами в погрузочно-транспортных комплексах карьеров, применяя самые различные методы, варьируемые от простой эвристики до сложных математических методов. Цель любой процедуры распределения – повысить производительность ЭАК с данным парком техники, или же сократить количество карьерных самосвалов и экскаваторов, требуемых для достижения заданных целей производства при соблюдении множества других практических условий. В эвристических системах диспетчерские решения принимаются обычно после того, как карьерный самосвал достигает пункта разгрузки и становится готовым к выполнению следующего рейса. С помощью специализированной компьютерной программы проверяется текущее состояние техники в карьере, на основании чего карьерный самосвал направляется к наиболее подходящему в данный момент экскаватору. Причём всё зависит, в конечном счёте, от того, какая политика диспетчеризации проводится.

Эвристические процедуры или алгоритмы относительно просты, и в большинстве случаев способны решить задачу, однако они не гарантируют оптимального решения. С помощью эвристики решают в основном текущие проблемы, без учёта задач долгосрочного планирования. Диспетчерские системы, основанные на эвристических принципах, легче внедряются и не требуют больших вычислительных мощностей для принятия решений в реальном времени. Они обеспечивают распределение «одного самосвала за один раз». Каждое текущее решение по распределению принимается независимо от дальнейших распределений. Кроме того, большинство эвристических принципов игнорируют вторичные (сопутствующие) цели работы ЭАК, например обеспечение качества продукции путём уравнивания показателей производства в пунктах погрузки [22, 23].

Под качеством продукции понимается однородное содержание полезного элемента в общей горной массе (характерно для рудных полезных ископаемых), поступающей с карьерными самосвалами на обогатительную фабрику (ОФ). Дело в том, что в разных забоях карьера процентное содержание полезного элемента в горной массе может быть разным. Для ОФ, однако, желательно, чтобы оно всегда было одинаковым, то есть поступающая горная масса должна быть однородной. Поэтому, если качество горной массы на входе в ОФ снижается, то следующий самосвал нужно направлять к тому экскаватору, который работает по более качественной горной массе, и наоборот.

Существующие в настоящее время эвристические критерии диспетчеризации можно разделить на три категории: критерии оптимизации простоев техники, критерии оптимизации производительности самосвалов и критерии оптимизации производительности экскаваторов.

Закрытый цикл. Каждый карьерный самосвал в начале смены закрепляется за конкретным экскаватором и разгрузочным пунктом, и работает на одном и том же маршруте в течение всей смены. Количество самосвалов, приданных определённому экскаватору, полностью зависит от показателей работы данного экскаватора, желаемого уровня его производительности, а также ожидаемого времени рейсов и простоев самосвалов. Самосвалы перераспределяются только в случае изменения условий работы (например, при поломке экскаватора). Ввиду стохастичности технологических операций и характера простоев, с некоторой частотой у отдельных экскаваторов происходит формирование очередей.

Эта стратегия зарекомендовала себя самой неэффективной. Главная причина в том, что техника не может работать по жёсткому алгоритму. В её работу часто вмешиваются непрогнозируемые и субъективные факторы: плохое дробление породы при буровзрывных работах; несоответствие вместимости кузова карьерного самосвала вместимости ковша экскаватора; разное качество различных участков дорог; образование движущихся как единое целое автоколонн из-за невозможности обгона тихоходных самосвалов более быстроходными; различная квалификация водителей и степень изношенности машин; возникновение необходи-

мости в обслуживании и перемещении экскаваторов; непрогнозируемые поломки и др. [24 – 28]. Нельзя забывать и о том, что маршруты транспортирования в результате продвижения экскаваторов в забоях могут удлиняться или укорачиваться; следовательно, увеличиваться или уменьшаться будет и время пробега по этим маршрутам, что также может привести к простоям оборудования.

При закрытом цикле несколько карьерных самосвалов обычно стоят в очереди под погрузку у одного экскаватора, в то время как другой экскаватор может долгое время простаивать ввиду отсутствия самосвалов. Наивысшей эффективности такая система достигает тогда, когда все экскаваторы работают непрерывно: если один самосвал находится под погрузкой, другие самосвалы в его группе либо совершают порожний или гружёный пробег, либо разгружаются. Для этого необходимо равномерно подавать карьерные самосвалы к экскаваторам. Однако обеспечить своевременную подачу самосвалов к экскаваторам достаточно сложно из-за влияния неконтролируемых факторов. Оптимизация в данном случае заключается в определении оптимального количества автотранспорта на данный экскаватор [22, 23, 29].

Стратегия закрытого цикла даёт возможность оценки таких рабочих данных, как время погрузки и простоя экскаваторов, время цикла и простоя карьерных самосвалов, целевые объёмы производства, использование техники и т.д. Данная стратегия может служить исходной базой, по которой можно проверять действенность других принципов распределения; можно её использовать и для проверки работоспособности различных имитационных моделей.

Наиболее отстающий экскаватор. Если экскаваторы имеют плановые значения выработки, применяется простой эвристический принцип – направить порожний карьерный самосвал с диспетчерского пункта (ДП) к экскаватору, хуже всех выполняющему план. Задача – учитывая общую грузоподъёмность самосвалов на маршруте, добиться целевой выработки экскаватора. В работе [30] для определения наиболее отстающего экскаватора применялся следующий критерий:

$$k = \arg \max \left\{ \left(\frac{t_{н.см} \cdot P_{ц}}{T_{см}} \right) - P_{\phi} \right\}, \quad (1.1)$$

где k – номер экскаватора, к которому нужно направить карьерный самосвал;

$t_{н.см}$ – время, прошедшее с начала смены, с;

$T_{см}$ – общая продолжительность смены, с;

$P_{ф}$ – фактическая суммарная выработка экскаватора на данный момент времени, т;

$P_{ц}$ – целевая (запланированная) сменная выработка экскаватора, т.

Критерий, предлагаемый в работе [31], тот же, за исключением того, что $P_{ф}$ учитывает грузоподъемности всех карьерных самосвалов на линии, а не только тех, что уже находятся под погрузкой. Случайные характеристики ЭАК в расчёт не принимаются, и потому его производительность может быть повышена лишь незначительно. Кроме того, некоторые самосвалы могут быть направлены к одному и тому же экскаватору, который недовыполняет план из-за поломки, случившейся ранее в течение смены. Это может привести к образованию очередей у данного экскаватора, в то время как другие будут простаивать. Как следствие, план не выполнит ни «отстающий» экскаватор, ни другие. Таким образом, данный критерий может обеспечить хорошие решения, если игнорировать стохастические свойства системы. Однако на ОГР такие воздействия значительны, и игнорировать их нельзя [22, 23].

Минимальный простой самосвала. Порожный карьерный самосвал в ДП направляется к экскаватору, который даст наименьшее время простоя для самосвала у этого экскаватора. Задача – максимизировать использование как карьерных самосвалов, так и экскаваторов. Однако, если количество самосвалов в системе относительно мало, и они редко простаивают у экскаваторов, этот принцип может привести к недоиспользованию некоторых экскаваторов и, как следствие, к их простоям, так как некоторые экскаваторы в то же самое время могут быть свободными. Это потребует перераспределения карьерных самосвалов, а значит, первичные диспетчерские решения существенно теряют свою значимость. Такая политика рекомендуется для карьеров, где нет целевых значений производительности для экскаваторов. Критерий выглядит следующим образом:

$$k = \arg \min_i \{ \max[(T_r^a - T_r^c), 0] \}, \quad (1.2)$$

где T_r^a – время готовности экскаватора к загрузке самосвала, с;

T_r^c – время готовности самосвала к загрузке экскаватором, с.

Если разность $(T_r^a - T_r^c)$ положительна, то она соответствует времени простоя карьерного самосвала у данного экскаватора. T_r^c определяется как прогнозируемое время пробега самосвала от диспетчерского пункта до экскаватора и находится суммированием текущего времени ($t_{н.см}$) и среднего времени пробега самосвала от ДП до экскаватора. T_r^a определяется как прогнозируемое время окончания загрузки экскаватором всех самосвалов в очереди, включая тот, что ещё загружается, и те, что находятся на пути к данному экскаватору, но ещё не прибыли. Таким образом, для каждого экскаватора следует определить время прибытия самосвалов. Используя эти моменты прибытия, можно построить график работы для каждого экскаватора; он обеспечит наилучшую оценку T_r^a для каждого нового карьерного самосвала в ДП. T_r^a необходимо обновлять каждый раз, как самосвал достигает ДП, прибывает к экскаватору или отбывает от него после погрузки. Так как в момент принятия диспетчерского решения будущие временные параметры ещё не известны, используются данные для уже произошедших событий. А поскольку и они разные, то рекомендуется использовать средние величины, а это уже снижает точность и качество диспетчерских решений.

Когда карьерный самосвал прибывает к экскаватору, возможны две ситуации: экскаватор простаивает, и сразу же начинает загружать самосвал; либо экскаватор занят, заставляя самосвалы ожидать в очереди. Когда время ожидания равно нулю, это означает, что самосвал занял позицию и готов к погрузке в тот самый момент, когда экскаватор закончит погрузку предыдущего самосвала. Положительное время ожидания означает, что самосвал прибыл к экскаватору, всё ещё загружающему другой самосвал.

При таком способе распределения диспетчер оценивает время готовности данного карьерного самосвала к погрузке, а также время готовности каждого экскаватора к загрузке этого самосвала после его прибытия. Затем диспетчер опреде-

ляет экскаватор с наименьшим временем простоя для данного самосвала, после чего самосвал направляется к этому экскаватору [22, 23].

Минимальный простой экскаватора. Порожний карьерный самосвал в ДП направляется к экскаватору, который уже простаивает в ожидании самосвала или должен попасть в простой следующим. Задача – полнее использовать экскаваторы за счёт минимизации их простоев. Одно из преимуществ критерия заключается в том, что он позволяет более равномерно распределить выработку экскаваторов и даёт результаты для них, близкие к целевым. Однако это приводит к снижению общей производительности ЭАК из-за увеличенного времени цикла карьерного самосвала, когда он направляется, например, к самому дальнему экскаватору. Критерий принятия решений следующий:

$$k = \arg \min_i \{T_r^c - T_r^э\}. \quad (1.3)$$

Необходимо отметить, что в данном критерии не рассматривается время пробега до каждого экскаватора. Если $(T_r^c - T_r^э) > 0$, то это означает простой экскаватора в ожидании самосвала. Такая стратегия рекомендуется для карьеров, имеющих строгие требования к качеству продукции – даже если это не оптимизирует производительность, что для разрезов не является актуальным [22, 23].

Максимальная мгновенная производительность самосвала. Порожний карьерный самосвал направляется к экскаватору, который даст максимальное значение мгновенной производительности (т/мин) – отношения грузоподъёмности самосвала к ожидаемой продолжительности рейса. Очевидно, что при этом мгновенная производительность самосвала тем больше, чем меньше время его рейса, поэтому применение данного критерия может привести к образованию очередей у ближайших к ДП экскаваторов [11].

Минимальный рабочий цикл самосвала. Является частным случаем предыдущего критерия – при условии однородного состава парка карьерных самосвалов. Порожний самосвал в ДП направляется к экскаватору, который может дать минимальное ожидаемое значение продолжительности рабочего цикла для данного самосвала. Цель – максимизировать количество циклов самосвала за сме-

ну. Время цикла карьерного самосвала является суммой среднего времени пробега от пункта разгрузки до экскаватора, к которому самосвал направляют; времени простоя у экскаватора после прибытия; среднего времени погрузки; среднего времени пробега от экскаватора до пункта разгрузки; среднего времени разгрузки.

Очевидно, что результирующий эффект от применения данного критерия тем выше, чем больше самосвалов направлено к экскаваторам, расположенным ближе к ДП. Однако это может привести к тому, что все карьерные самосвалы будут направляться (особенно вначале) к ближайшему к ДП экскаватору; другие экскаваторы при этом могут простаивать [22, 23].

Минимальное насыщение экскаватора. Порожний карьерный самосвал в ДП направляется к экскаватору, имеющему наименьшую степень насыщения среди доступных экскаваторов. Степень насыщения представляет собой отношение количества распределённых самосвалов к желаемому количеству самосвалов, которые должны быть распределены между имеющимися экскаваторами. Желаемое количество (параметр насыщения) представляет собой условное число самосвалов, определяемое как отношение среднего времени пробега карьерного самосвала от ДП до экскаватора к среднему времени загрузки самосвала:

$$k = \arg \min_i \left\{ \frac{T_{\Gamma}^{\text{э}} - t_{\text{н.см}}}{t_i^{\text{проб}}} \right\}, \quad (1.4)$$

где $t_i^{\text{проб}}$ – среднее время пробега от ДП до i -го экскаватора, с.

Этот критерий позволяет равномерно использовать все экскаваторы в ЭАК, и в то же время сохранять баланс между потребностями в самосвалах. Карьерные самосвалы направляются к экскаваторам через равные интервалы времени, с соблюдением рационального соотношения вместимости кузова самосвала и вместимости ковша экскаватора. Данный принцип целесообразно применять тогда, когда парк имеющихся карьерных самосвалов примерно соответствует количеству обслуживающих их экскаваторов [22, 23].

Экскаватор, загружающий первым. Порожний карьерный самосвал в ДП направляют к тому экскаватору, где (как ожидается) он будет загружен в бли-

жайшее время. Критерий обеспечивает тенденцию к сокращению очередей и простоев самосвалов, но может привести к несбалансированной работе экскаваторов, так как способствует отправке самосвалов к ближайшим экскаваторам. В недогруженных системах, когда самосвалов мало, это может существенно снизить производительность. Критерий принятия решений следующий:

$$k = \arg \min_i \{ \max(T_i^c, T_i^э) \}. \quad (1.5)$$

Значительное влияние на результаты распределения здесь оказывают расстояния между ДП и экскаваторами. Чем меньше расстояние, тем предпочтительнее экскаватор для распределения [22, 23].

Экскаватор с наибольшим простоем. Порожний карьерный самосвал направляется к экскаватору, который дольше других простаивает в ожидании работы. Задача – сбалансировать производительность экскаваторов [22, 23]:

$$k = \arg \max \{ \max_i [(T_i^c - T_i^э), 0] \}. \quad (1.6)$$

Адаптивный принцип. Это комбинированный критерий, рассматривающий процедуру диспетчеризации с использованием нормализованных значений степени использования техники. Нормализованное использование карьерных самосвалов определяется как отношение разности текущего и среднего использования самосвалов к стандартному отклонению функции их использования. Нормализованное использование экскаваторов определяется аналогично. Критерий выглядит следующим образом:

$$U_{\text{станд}}^c = \frac{U_{\text{тек}}^c - U_{\text{ср}}^c}{\Delta U_c}; \quad U_{\text{станд}}^э = \frac{U_{\text{тек}}^э - U_{\text{ср}}^э}{\Delta U_э}. \quad (1.7)$$

Этот адаптивный принцип позволяет добиться равновесия между двумя динамическими показателями производительности системы (то есть степенями использования карьерных самосвалов и экскаваторов) [22, 23].

Диспетчеризация по эвристическим алгоритмам, имея целью повышение производительности работы ЭАК путём сокращения простоев техники, обеспечивает простейший подход к проблеме распределения карьерных самосвалов в тече-

ние смены. Такие системы достаточно легко внедряются и не требуют больших вычислительных мощностей для принятия решений в реальном времени. Конкретные значения критериев полностью определяются текущим состоянием системы, так что нет необходимости в получении дополнительных данных. Поэтому их вполне можно использовать и в очень крупных и сложных горнодобывающих системах.

Всё это является несомненным преимуществом эвристических подходов. Однако есть и существенные недостатки. Существующие эвристические принципы слишком слабы, чтобы одновременно обеспечивать достижение многочисленных целей работы (а именно такие ситуации чаще всего возникают на практике). Кроме того, эти принципы, ввиду своего сугубо детерминированного характера, обеспечивают распределение карьерного автотранспорта только по схеме «один самосвал за один раз». Исследование более сложных схем невозможно. Как следствие, нет возможности планирования работы ЭАК хотя бы в среднесрочной, не говоря уже о долгосрочной, перспективе.

Каждый конкретный карьерный самосвал в ДП направляется к тому экскаватору, у которого он в настоящий момент более всего необходим. Однако всеобщее оптимальное решение должно учитывать все экскаваторы и все самосвалы в каждый момент времени, поэтому имеющихся небольших информационных и компьютерных ресурсов может не хватить.

И, наконец, каждый карьер по-своему уникален, а это значит, что в каждом конкретном случае каждый критерий нужно оценивать отдельно, в зависимости от решаемых задач. Поскольку какой-либо один критерий не может быть эффективным во всех ситуациях, в каждом конкретном случае для подбора наиболее подходящего диспетчерского критерия необходимо проводить специальные исследования.

Наряду с вышеупомянутыми подходами (одноуровневым и мультиуровневым) необходимо рассмотреть и три основных стратегии распределения карьерных самосвалов: «*1 самосвал и N экскаваторов*», «*M самосвалов и 1 экскаватор*», «*M самосвалов и N экскаваторов*» [12].

Стратегию «1 самосвал и N экскаваторов» можно описать следующим образом. Вначале водитель карьерного самосвала запрашивает новое распределение. Принимая, что самосвал может быть направлен к N экскаваторам, система оценивает возможные издержки или выгоды от направления самосвала к каждому из этих экскаваторов по выбранному критерию. После оценки самосвал направляют к экскаватору, обладающему наибольшим потенциалом – минимумом затрат либо максимумом выгоды. Этот процесс повторяется каждый раз, когда водитель самосвала запрашивает новое распределение. В данной стратегии не принимается во внимание воздействие любого решения по текущему распределению на последующие распределения.

Данная стратегия является старейшей, наиболее распространённой и обычно реализуется через одноуровневый подход. Описания таких методов диспетчеризации можно найти, например, в работах [32 – 48]. В этих методах используется широкий круг критериев, однако цель преследуется одна – достижение максимальной производительности. Из приведённых работ следует, что по какому бы критерию ни работала система, недостатки всегда будут. Так, критерий минимума простоев карьерных самосвалов нецелесообразно использовать в недогруженных самосвалами системах. По этому критерию карьерный самосвал направляют к экскаватору, обеспечивающему наименьшее для него ожидаемое время простоя. Поскольку вероятность образования очередей в недогруженных системах мала, самосвал можно с равным успехом направить к любому из имеющихся экскаваторов. Аналогично, критерий минимума простоев экскаваторов бессмысленно использовать в перегруженных системах. Такое распределение также не даст эффекта, так как низка вероятность простоев экскаваторов. Авторы работы [11] отмечают, что сложно выбрать один из критериев диспетчеризации, который доминировал бы над остальными. Всё, в конечном итоге, зависит от текущего состояния системы.

Большая часть недостатков является следствием узкого, несистемного взгляда на проблему диспетчеризации карьерного автотранспорта, поскольку в расчёт принимается лишь «один самосвал за один раз». Каждый из критериев, как

правило, затрагивает только один аспект, например, простой самосвалов. Поэтому все методы диспетчеризации в стратегии «*1 самосвал и N экскаваторов*» являются недалекновидными. Например, следует осторожно использовать критерий максимума производительности, поскольку для различных состояний системы могут быть получены различные результаты, и вместо максимальной производительности вполне можно получить низкую. А поскольку нет способа выбора наилучшего из существующих критериев, то при выборе приходится применять некоторые эвристические принципы.

В частности, поскольку вышеперечисленные методы не могут гарантировать одинакового развития событий во всех ситуациях, предлагается использовать такой диспетчерский критерий, который бы наилучшим образом удовлетворял потребностям системы в текущей смене и который пересматривался бы всякий раз, как только в конфигурации системы происходит какое-либо важное изменение [39, 46]. Например, для выполнения плана перевозок между каждым экскаватором и разгрузочным пунктом, который оптимизирован по линейной программной модели, выбирается такой критерий, при котором результаты имитационного моделирования совпадают с оптимальным планом производства [21]. Или же когда вместо одного критерия (например, максимума общей производительности), приходится учитывать дополнительные требования (например, к качеству горной массы). А когда главным является требование по качеству, даже в ущерб производительности, то этот критерий уже не может использоваться.

Диспетчерские методы, использующие стратегию «*1 самосвал и N экскаваторов*» при мультиуровневом подходе, описаны в работах [49, 50, 51]. Во всех случаях на верхнем уровне оптимизации используется линейное программирование для определения оптимального количества карьерных самосвалов, которые должны быть приданы каждому маршруту между каждым экскаватором и отвалом, а также между каждым отвалом и экскаватором – в целях минимизации транспортных расходов. Поскольку данные методы предполагают минимизацию эксплуатационных затрат, а не максимизацию общей производительности, для каждого экскаватора определяется минимальная норма выработки (с помощью

линейного программирования), для обеспечения которой находятся оптимальные интервалы подачи самосвалов от данного пункта разгрузки. На нижнем уровне решается задача распределения самосвалов с целью соблюдения этих графиков. Принцип, объединяющий все эти методы, заключается в том, что если удаётся добиться выполнения оптимальных временных графиков, полученных на верхнем уровне, то можно достичь и требуемой производительности при минимальных расходах.

В работах [49, 50, 51] предполагается, что парк карьерных самосвалов является однородным, в то время как большинство карьеров имеют разномарочный подвижной состав. Чтобы получить однородный парк (для верхнего уровня), нужно определять средневзвешенный самосвал. Однако тогда нет гарантии, что требуемая производительность экскаваторов будет достигнута, поскольку распределение на нижнем уровне будет осуществляться лишь на основе графиков работы средневзвешенных самосвалов без учёта их реальных типоразмеров.

Поскольку информация, полученная на верхнем уровне, позволяет давать указания по распределению самосвалов на нижнем уровне, то стратегия «*1 самосвал и N экскаваторов*» при мультиуровневом подходе теоретически должна быть более эффективной, чем та же стратегия при одноуровневом подходе. Этого можно ожидать потому, что операции верхнего уровня позволяют более глобально смотреть на проблемы нижнего уровня. Однако, поскольку на нижнем уровне происходит распределение только «одного самосвала за один раз», то добавление верхнего уровня мало что даёт для того, чтобы избежать недостатков одноуровневых методов [11].

В стратегии «*M самосвалов и 1 экскаватор*» диспетчерские решения принимаются по принципу «для одного экскаватора за один раз». Для этого вначале экскаваторы ранжируются по показателю невыполнения производственного плана. Затем карьерные самосвалы поочерёдно направляются к тем экскаваторам, работа с которыми снизит величину невыполнения.

В литературе удалось найти лишь один пример использования данной стратегии – в системе DISPATCH компании «Modular Mining Systems». Детальный об-

зор способов применения и особенностей этой системы сделан в работах [52, 53]. Несмотря на то, что система является коммерческой, а значит, все детали её диспетчерского метода не разглашаются, авторы работ [54, 55] описали некоторые наиболее значительные технические детали системы.

Распределение карьерных самосвалов в системе DISPATCH основано на мультиуровневом подходе. На верхнем уровне для определения оптимальных грузопотоков (тонн/ч) на кратчайших маршрутах между каждым экскаватором и каждым пунктом разгрузки используется линейное программирование. Для поддержания требуемой интенсивности потоков на маршрутах данный модуль верхнего уровня вызывается всякий раз, когда значительно изменяются показатели работы экскаваторов, добавляется или убирается любая техника, меняется время пробега по любому нормально действующему маршруту, и т.д. Иначе говоря, обновление верхнего уровня осуществляется в случае любого изменения, либо через определённый интервал времени, предварительно установленный управляющим персоналом.

Распределение карьерных самосвалов происходит на нижнем уровне; цель – приблизиться к величинам потоков, определённым на верхнем уровне. Для этого на начальной стадии процесса принятия диспетчерского решения формируют два списка: один для маршрутов, другой для самосвалов. Список маршрутов формируется по «потребному времени», которое показывает, насколько текущая выработка на маршруте отстаёт от целевой выработки, полученной на верхнем уровне. Маршрут с наибольшим «потребным временем» будет первым в списке. Список самосвалов включает в себя все карьерные самосвалы, в данный момент разгружающиеся, либо находящиеся на пути к пункту разгрузки. Самосвалы распределяются между экскаваторами путём направления «лучшего самосвала» по маршруту с наибольшим «потребным временем». «Лучшим самосвалом» является тот, который минимизирует «потерянные тонны» – показатель непроизводительности, учитывающий суммарные простои карьерных экскаваторов и самосвалов, дополнительное время пробега, который самосвал должен выполнить для достижения любого экскаватора кроме ближайшего, а также требуемые интенсивности

потоков, определённые на верхнем уровне. Затем «лучший самосвал» убирается из списка самосвалов; маршрут с наибольшим «потребным временем» перемещается в конец списка маршрутов, а маршрут со вторым по величине «потребным временем» становится первым. Этот процесс повторяется до тех пор, пока в списке самосвалов не останется машин. Процесс принятия диспетчерского решения заканчивается отправлением указаний карьерному самосвалу, требующему первоочередного распределения; все остальные самосвалы пока не рассматриваются, так как их распределение будет зависеть от предыдущего диспетчерского решения.

Таким образом, на нижнем уровне текущее распределение самосвалов зависит от предыдущих распределений. То есть, когда самосвал направляется к экскаватору с известной повторяемостью, то при расчёте «потерянных тонн» должны учитываться все самосвалы, распределённые до этого. Однако о влиянии текущего распределения на последующие часто забывают.

Авторы работ [54, 55] доказывают, что метод, с помощью которого на нижнем уровне системы DISPATCH принимаются диспетчерские решения, не основан на принципах динамического программирования, хотя его пытаются рассматривать именно так. Динамическое программирование – это метод, созданный для точного решения некоторых комбинаторных задач и который можно охарактеризовать как «последовательность решений от конца к началу». Сначала рассматривается последнее решение (стадия) в их общей последовательности и находится наилучшее действие для всех возможных ситуаций (состояний), которые могут возникнуть на данной стадии. Цель – обеспечить оптимальную последовательность решений, которые должны быть приняты с текущей до последней стадии при всех состояниях на текущей стадии. Затем переходят к предыдущей стадии в общей последовательности и определяют оптимальную последовательность решений при всех возможных ситуациях на данной стадии с учётом того, что для последующей стадии оптимальное решение уже известно. Этот процесс повторяется вплоть до первой стадии, и уже тогда появляется возможность определения общей оптимальной последовательности решений, поскольку на первой стадии

возможна лишь одна ситуация [56]. Если же вначале находится наилучшее решение для первоначальной ситуации, а затем все последующие решения принимаются с учётом предыдущих оптимальных решений, то это не соответствует принципам динамического программирования, поскольку в этом случае учитывается только одна из возможных последовательностей решений, с которыми имеет дело динамическое программирование. Все остальные возможные последовательности решений заранее отсекаются. Это не позволяет на нижнем уровне распределять карьерные самосвалы, исходя из глобального видения проблемы диспетчеризации. В результате на нижнем уровне системы DISPATCH не удаётся избежать эвристики.

В стратегии « M самосвалов и N экскаваторов» происходит одновременное распределение M самосвалов между N экскаваторами, что достигается обычно с помощью комбинаторных методов оптимизации. Данная стратегия позволяет принимать диспетчерские решения, исходя из глобального взгляда на проблему, так как соответствующие алгоритмы учитывают взаимодействие между различными аспектами проблемы.

Такая проблема формулируется либо как *задача распределения*, либо как *транспортная задача* (классические задачи в исследовании операций). Первая формулировка состоит в распределении карьерных самосвалов по принципу «один к одному», то есть каждый экскаватор получит лишь один самосвал, а каждый самосвал может быть направлен лишь к одному экскаватору. Отсюда следует, что M должно быть больше либо равно N . Во второй формулировке рассматривается задача доставки некоторого количества товара от группы поставщиков к группе получателей. Цель – минимизировать общие транспортные расходы, реализуя все мощности поставщиков и одновременно удовлетворяя все потребности получателей. В данном случае поставщиками будут M самосвалов, а получателями – N экскаваторов. Единицей товара будет один карьерный самосвал. Каждый поставщик предлагает одну единицу товара, а каждый получатель нуждается в некотором количестве таких единиц, так что общее число единиц, требующихся получателям, равно M [56].

Ввиду комбинаторной природы данной стратегии величины M и N не должны быть слишком большими, иначе проблема может стать не решаемой в разумные сроки. Кроме того, каждое из распределений, осуществляемых с помощью стратегий « 1 самосвал и N экскаваторов» и « M самосвалов и 1 экскаватор», находится среди огромного числа других возможностей, предоставляемых стратегией « M самосвалов и N экскаваторов». Это означает, что настоящая стратегия должна обеспечить (по крайней мере, теоретически) более эффективное распределение, нежели две предыдущие.

В работах [57, 58] предлагается одноуровневая система, которая позволяет принимать решения по распределению карьерных самосвалов, максимизируя производительность с помощью минимизации «потерянных тонн», появляющихся из-за простоев экскаваторов. Задача распределения решается сначала с учётом всех самосвалов и экскаваторов. Исходя из полученного оптимального решения, сохраняются только распределённые самосвалы с минимальным временем загрузки. Это даёт гарантию того, что простои у экскаваторов будут минимальными. Чтобы предсказать развитие событий в будущем, нужно просто повторить операцию до конца смены. Для задач реального времени повторы осуществляются до тех пор, пока каждый самосвал не получит хотя бы одну загрузку в будущем, и возобновляются, если самосвал не имеет ни одной потенциальной загрузки. Если имеются какие-либо дополнительные условия, и хотя бы одно из этих условий не выполняется при принятии диспетчерского решения, то решение на данном этапе отбрасывают. Задача распределения корректируется и решается заново. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не появится решение, удовлетворяющее всем условиям. Данный метод предложен в работе [57] и детально описан в работе [11]. Дополнительное математическое обоснование даётся в работе [58].

Авторы работы [11] констатируют, что данный метод не позволяет кратковременно смягчить исходные для диспетчерского решения условия, что было бы желательно, если бы это смягчение способно было увеличить производительность без нарушения имеющихся ограничений в течение достаточно длительного периода времени. Кроме того, нельзя гарантировать, что каждое решение принима-

ется на основе точных данных из карьера, так как предварительные решения отбрасываются и пересматриваются только тогда, когда один из карьерных самосвалов уже не имеет предполагаемого распределения. В том случае, когда между двумя пересмотрами будущих решений происходят некоторые непредвиденные события, предварительные распределения самосвалов вообще могут по этой причине стать неприемлемыми. В работе [58] уточняется, что предлагаемый метод соответствует принципам динамического программирования. По причинам, указанным в работах [54, 55], это не так, поскольку автор выстраивает свою оптимальную последовательность решений без рассмотрения всех возможностей.

Мультиуровневый подход для стратегии «*M самосвалов и N экскаваторов*» предлагается в работах [59, 60]. В них рассматривается не только метод диспетчеризации карьерных самосвалов, но и модуль распределения для экскаваторов. Для нас интерес представляет только задача диспетчеризации, поэтому принимаем, что местоположения экскаваторов известны.

Поскольку местоположения экскаваторов и количество доступных в течение смены карьерных самосвалов известны, предлагается для определения оптимальной производительности, выражающейся в «самосвалах за единицу времени» (между каждым экскаватором и каждым отвалом), расчёты производить по нелинейной программной модели. Этот показатель устанавливается для того, чтобы максимизировать общую производительность. То есть, оптимальное решение нелинейной модели будет таким, что экскаваторы будут обслуживаться на уровне, наиболее близком к их максимальным мощностям, все доступные самосвалы будут использоваться, а все дополнительные условия будут строго соблюдаться. Использование самосвалов включает в себя время простоев самосвалов, определяемое методами теории массового обслуживания. Авторы доказывают, что использование на верхнем уровне именно нелинейной модели является предпочтительным, потому что, во-первых, время ожидания самосвала у экскаватора не является линейной функцией, и, во-вторых, нелинейная модель может дать более сбалансированное решение, нежели линейная, так как последняя даёт экстремальные решения. Так, для двух экскаваторов (с неизменным местоположением) ли-

нейная модель может рекомендовать, что использовать следует лишь один экскаватор на полную мощность, а другой оставить без работы, в то время как нелинейная модель заставит использовать оба экскаватора на половину их мощностей.

На нижнем уровне происходит распределение карьерных самосвалов между экскаваторами, а для принятия каждого диспетчерского решения решается задача распределения; при этом рассматривается не только тот самосвал, который требует немедленного распределения, но и 10-15 самосвалов, которые будут распределены в ближайшем будущем. Как и в системе DISPATCH, происходит распределение лишь того самосвала, который требует немедленного распределения. Остальные не рассматриваются до тех пор, пока каждый из них в последующих решениях не попадёт в этот ранг. Такой способ распределения карьерных самосвалов на нижнем уровне получил название алгоритма «скользящего временного горизонта» [60].

Однако данный метод не учитывает возможности направления к экскаватору более чем одного самосвала, даже если очевидно, что следует направить два самосвала к одному экскаватору и ни одного – к другому. Это оправдывает необходимость применения «скользящего временного горизонта» на нижнем уровне, поскольку он обеспечивает корректирующий механизм для соблюдения ограничений распределительной формулировки. Другой существенный недостаток – то, что парк карьерных самосвалов предполагается однородным. Поскольку этот случай похож на тот, что описан в [50, 51], то все недостатки этих работ присущи и работе [60].

Ещё один мультиуровневый подход к стратегии «*M самосвалов и N экскаваторов*» предлагается в работах [61, 62]. Математическая модель для решения задач верхнего уровня представлена в работе [62]. Для максимизации производительности строится программно-целевая модель (ПЦМ), определяющая оптимальный объём горной массы для перевозки между каждым экскаватором и каждым пунктом разгрузки в течение смены. ПЦМ есть не что иное, как линейная целевая функция с ограничениями. Такие модели очень полезны в тех случаях, когда невозможно найти реальное решение, удовлетворяющее всем условиям зада-

чи. Поэтому приходится искать решение, которое нарушает либо минимальное количество условий, либо наименее важные из них. В данном случае программно-целевая модель формулируется так, чтобы экскаваторы работали на уровне, наиболее близком к их максимальной мощности, а имеющиеся ограничения соблюдались бы как можно строже.

Нижний уровень описан в работе [61]. Диспетчеризация осуществляется путём решения транспортной задачи. Как упоминалось ранее, в данной задаче каждый «поставщик» является карьерным самосвалом, который нужно распределить в ближайшем будущем, а каждый «получатель» представляет собой экскаватор. Потребность получателей выражается количеством самосвалов, требуемых для достижения экскаватором плана выработки, определяемого на верхнем уровне. В данном случае однородность (или неоднородность) парка не является критичной. Стоимость отправки самосвала к экскаватору выражается в виде ожидаемого времени простоя, который станет результатом этой отправки. Цель – устранить снижение выработки всех «нуждающихся» экскаваторов путём минимизации суммарных простоев.

Используя эту модель, можно получить более широкий взгляд на проблему (в сравнении с задачей распределения), так как к экскаватору может быть направлено более одного самосвала, а количество одновременно распределяемых карьерных самосвалов может быть больше количества экскаваторов. Тем не менее, и в этой формулировке кроется серьёзный недостаток. При использовании транспортной модели необходимо, чтобы затраты на доставку единицы товара от поставщика к получателю были неизменны и не зависели от единиц, прибывающих от других поставщиков. Однако время простоя самосвала у экскаватора (цена отправки) зависит от направления других самосвалов к этому экскаватору, особенно если система перегружена. Калькуляция затрат, проводимая авторами работы [61], способна выявить лишь те простои, которые соответствуют самосвалам, находящимся на пути (или уже прибывшим) к экскаватору. А поскольку учесть дополнительные простои, возникающие в результате будущих отправок нескольких самосвалов к тому же экскаватору, нет возможности, то распределения будут ос-

новываться на недооценённых (заниженных) величинах простоев. Тем не менее, метод, предлагаемый в работах [61, 62], по-прежнему представляет интерес.

Ещё один метод оптимизации работы карьерной погрузочно-транспортной техники представлен в работе [63]. На верхнем уровне диспетчерской системы использовалась модель, основанная на методах теории массового обслуживания – для определения оптимального количества карьерных самосвалов, работающих с каждым экскаватором в системе. На нижнем уровне с помощью линейной программной модели находились оптимальные распределения самосвалов между экскаваторами, минимизирующие затраты как на погрузку, так и на транспортирование. Испытания данной методики дали интересные результаты, но парк карьерных самосвалов предполагался однородным, что является безусловным недостатком.

Весьма оригинальный мультиуровневый метод был предложен в работе [64]. ЭАК карьера сравнивается с колонией насекомых, обладающих способностью к самоорганизации (например, муравьёв). На верхнем уровне с помощью алгоритма оптимизации устанавливается потребность для каждого экскаватора, представляющая собой интенсивность, с которой экскаватор «нуждается» в самосвале (с учётом производственных условий и ограничений). Карьерный самосвал должен отвечать на эту потребность (положительно или отрицательно) – в зависимости от своего статуса (гружёный/порожний), местоположения (определяемого с помощью средств спутниковой навигации), грузоподъёмности, а также дорожных условий. Ответ самосвала на потребность экскаватора определяется так называемой «функцией отклика», на основании значения которой принимается решение о текущем распределении самосвала.

Данный метод, как и остальные, имеет свои недостатки. Во-первых, исследование, проведённое в работе [64], имеет детерминированный характер и не учитывает вероятностную природу погрузочно-транспортных процессов в ЭАК. Во-вторых, данная модель недостаточно гибка, так как полностью зависит от скорости обновления данных о состоянии системы. В случае серьёзных непредвиденных изменений в ЭАК возможно принятие неоптимальных решений.

В целом, можно отметить, что в рассмотренных работах недостаточно учитывается вероятностная природа погрузочно-транспортных процессов в карьерных ЭАК. В предлагаемых диспетчерских критериях, как правило, затрагивается лишь один аспект работы ЭАК (например, простои одних только самосвалов). Кроме того, предложенные методы не дают возможности предсказать, к чему приведёт использование той или иной стратегии диспетчеризации. Такую возможность может дать только моделирование процессов, протекающих в ЭАК.

1.3 Мировой опыт внедрения систем диспетчеризации на карьерах

Потребность в разработке систем управления горнотранспортными комплексами (ГТК) существовала всегда, но более-менее чёткое их обозначение произошло в начале 60-х годов XX века. На современном этапе развития горного производства широко используются автоматизированные системы управления ГТК (АСУ ГТК), основанные на технологиях спутниковой и радионавигации. Широкое применение таких систем обусловлено их высокой эффективностью, поскольку достигается повышение производительности техники на 15-25%, при этом срок окупаемости составляет от нескольких месяцев до полутора лет [65].

Принято разделять АСУ ГТК на три основных подтипа.

1. Системы с ручным режимом, предоставляющие всю необходимую информацию о технологических параметрах производимых работ и техническом состоянии объектов, на основе которой решение принимает диспетчер или соответствующий персонал.

2. Системы с режимом советчика, снимающие информацию с датчиков и обрабатывающие её для выдачи диспетчеру одного оптимального или нескольких решений на выбор.

3. Системы с диалоговым режимом, имеющие те же возможности, что и системы второго типа, но работающие на принципе заранее заданных критериев (условий), которые диспетчер может в реальном времени изменять в зависимости от обстановки.

Развитие АСУ ГТК на карьерах происходило на протяжении последних 40-45 лет. Ранние отечественные системы работали в «режиме советчика» по закрытому циклу («Карат»). Позже появились системы, работающие в «диалоговом режиме» («Карат-М»), «ручном режиме» («Кварцит»), а также системы, реализующие не только информационные, но и управляющие функции («Комплекс-АТ», «Гермес», «Авто» и некоторые другие).

Основные принципы работы современных АСУ ГТК можно проиллюстрировать на примере отечественной системы «КАРЬЕР», разработанной ООО «ВИСТ-Групп».

АСУ «КАРЬЕР» разработана с целью повышения качества оперативного управления работой большегрузных карьерных самосвалов. Это достигается благодаря непрерывному обеспечению диспетчерского и управленческого персонала полной информацией о текущем положении и техническом состоянии находящихся в рабочей зоне самосвалов (для этого последние оснащены бортовыми комплектами оборудования): количество сделанных рейсов, масса перевезённой горной массы, расход топлива и др.

Для определения в реальном времени положения (а также направления движения, скорости и вида работы) мобильного объекта в системе «КАРЬЕР» используется спутниковое определение координат с применением приёмников Глобальной системы позиционирования (GPS).

Первоначально применение системы ограничивалось решением задач мониторинга большегрузных автосамосвалов БелАЗ, но со времени первых внедрений произошло существенное развитие системы как по составу горной техники, вовлекаемой в её работу, так и по перечню решаемых задач. На сегодняшний день система «КАРЬЕР» является полнофункциональной АСУ ГТК и эффективным инструментом оптимизации бизнес-процессов предприятия.

Программно-аппаратный комплекс системы состоит из диспетчерского центра (ДЦ), имеющего радиооборудование, серверы и программное обеспечение, и бортового оборудования, устанавливаемого на машины.

Данные о местоположении и состоянии машины собираются и накапливаются в её бортовом контроллере. На основе этой информации он определяет первичные события, происходящие с карьерным самосвалом (погрузка, разгрузка, заправка, остановка и т.д.). Информация о событиях вместе с оперативной информацией автоматически передается в ДЦ.

В ДЦ информация бортовых контроллеров обрабатывается, архивируется и визуализируется на экранах диспетчера и других специалистов в виде условных значков, наложенных на актуальный план горных работ предприятия. Данные с контроллеров дополняются новой информацией (например, для самосвала определяются экскаватор, пункт разгрузки, вид горной массы и др.), а также фиксируются вторичные события (например, простой без уважительной причины). В результате обработки и анализа накопленных данных автоматически составляются отчётные документы о работе предприятия, его участков, отдельных машин, персонала.

Основной акцент в развитии программного обеспечения системы «КАРЬЕР» делается на решение задач оперативного управления работой карьера. Для этого в состав системы добавлены модуль оптимизации и автоматического диспетчерирования, а также поддержка технологических бизнес-процессов.

Наибольший интерес в АСУ «КАРЬЕР» представляет модуль оптимизации и автоматического диспетчерирования *SmartTruck*. Целью его работы является вычисление оптимального распределения карьерных самосвалов по экскаваторам и пунктам разгрузки в соответствии с заданными критериями оптимизации, в частности, для обеспечения нужного процентного содержания полезных компонентов при шихтовке.

Система предоставляет возможность использования большого количества критериев (алгоритмов) оптимизации (например, выполнение задания по количеству руды, общая производительность экскаваторов). Значимость и осмысленность каждого критерия определяется в зависимости от решаемых на предприятии задач. Каждому критерию сопоставляется его «вес», то есть числовой коэффициент

ент, отражающий его значимость. Таким образом, критерии можно применять по отдельности и в совокупности.

Особенностью модуля оптимизации является его гибкость. Можно легко добавлять новые критерии, учитывать новые факторы, изменять приоритеты критериев в зависимости от текущих целей. Новые критерии могут быть самые произвольные, например, использование самосвалов с большим пробегом на маршрутах с малым перепадом высот.

На предварительной стадии необходимо снабдить модуль всей требуемой информацией: указать длины маршрутов транспортирования, максимальную производительность экскаваторов, имеющееся в наличии количество карьерных самосвалов; выбрать один или несколько критериев оптимизации; указать свои предпочтения при выборе экскаваторов при распределении самосвалов, и т.д.

В начале смены модуль запускается и определяет, к какому экскаватору и пункту разгрузки должен направляться каждый самосвал. Также возможна выдача сменного задания с помощью модуля выдачи сменного задания.

Модуль оптимизации запускается автоматически после каждой разгрузки каждого карьерного самосвала, то есть тогда, когда возникает необходимость в распределении. Возможны следующие варианты дальнейших действий:

- модуль самостоятельно отправляет указания о новом маршруте;
- модуль информирует диспетчера о распределении и ждёт согласия диспетчера. В этом случае модуль может предоставить «доводы» в пользу принятого решения, а диспетчер может внести свои коррективы.

Диспетчер должен в течение смены вносить данные о произошедших изменениях, которые могут повлиять на распределение самосвалов, таких как поломки (или окончание ремонта) экскаваторов и самосвалов, изменения в процентном содержании руды при перемещениях экскаваторов, и т.д.

Внедрение системы «КАРЬЕР» позволяет повысить эффективность использования горной техники: резко сокращаются простои самосвалов и экскаваторов, фактически исключаются недогрузки и перегрузы, за счёт оптимизации скоростного режима уменьшается износ двигателей, шин и других узлов. Тем не менее,

окончившаяся неудачей попытка организовать работу автотранспорта на разрезе «Черниговец» по открытому циклу показывает, что система и, в частности, модуль оптимизации в её составе нуждаются в серьёзной доработке [1, 66 – 80].

Комплексная АСУ производством горнодобывающих предприятий «Теллус», разработанная специалистами ЗАО НПО «Союзтехноком», была впервые введена в эксплуатацию в 2004 г. в филиале ОАО «УК "Кузбассразрезуголь"» «Кедровский угольный разрез» для учёта и контроля работы парка карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 55-220 т.

Система обеспечивает в режиме онлайн автоматический контроль использования самосвалов, регистрацию простоев, сигнализацию несанкционированного слива топлива, оценку качества технологических дорог и погрузочно-разгрузочных площадок на маршрутах следования.

В течение рабочей смены в режиме реального времени фиксируются перемещения карьерных самосвалов с грузом и без груза, погрузка, разгрузка, простои с указанием причин, возникновение неисправностей. В автоматическом режиме регистрируется рабочее время водителя, пробег самосвала и моточасы наработки двигателя, взвешивается перевозимый груз, измеряется расход топлива, осуществляется приём-сдача рабочих смен, формируются сменные отчёты в принятой на предприятии системе учёта. Таким образом, в результате складывается полная картина использования самосвалов и эффективности работы автотранспорта.

Экономический расчёт по итогам трёхлетней эксплуатации системы показал существенное повышение производственных показателей, снижение сменного расхода топлива вследствие уменьшения его нецелевого использования, увеличение грузооборота за счёт точного измерения пройденного пути и количества перевезённого груза [1, 80 – 83]. Проблемы диспетчеризации карьерного автотранспорта она, однако, не решает.

Можно выделить также несколько интересных систем управления горно-транспортными комплексами, появившихся в мире за последние 30 лет.

Автоматизированная система АДИС (Казахстан) предназначена для карьеров, осуществляющих основной технологический процесс с применением экска-

ваторно-автомобильного и экскаваторно-железнодорожного комплекса. Задачи системы и принципы её работы сходны с вышеописанными российскими системами [84].

Система, внедрённая на меднорудном карьере недалеко от города Тусон (США). Для фиксации маршрута движения карьерных самосвалов применялись контрольные точки, из которых информация поступала на контрольный пункт. Туда же с экскаваторов поступала информация о начале и окончании погрузки. Применялась голосовая радиосвязь, однако адрес пункта следования передавался водителю на цифровое табло. Особенности системы:

- оптимизация путём решения задач линейного программирования; постановка их изменялась в соответствии с календарным планом, погодными условиями и числом задействованных мобильных объектов;

- работа в диалоговом режиме: сначала вводились новые исходные данные, затем ЭВМ решала задачу оптимизации, после чего оптимальное распределение транспортных средств передавалось водителям по радиосвязи.

Таким образом, применялся открытый цикл. Практика показала, что при этом производительность повышается на 20% и более [66].

Система компании «*Quebec Cartier Mining*» (Канада) имела центральный вычислительный центр, управляющий как карьерными самосвалами, движущимися по заданным маршрутам, так и группами оборудования ОФ, а также дробильным отделением и процессами обогащения железной руды [66, 85].

Запоминающее устройство компьютерной системы *RAN* фирмы «*Pincot, Allen and Holt Inc.*» (США) способно хранить статистические сведения, касающиеся 30 погрузочных машин, 30 разгрузочных пунктов, 120 карьерных самосвалов различной грузоподъёмности, 30 автоматических заправочных станций и 5 крупных рудных складов. Система предоставляет непосредственную связь между компьютером и работающим горным оборудованием. В результате выдаются точные, полученные в реальном времени сведения о грузопотоках, времени движения каждого самосвала и т.д. Всё это способствует лучшему использованию оборудова-

ния, благодаря чему на 25% возросла производительность карьера и значительно снизились капитальные и эксплуатационные расходы [66, 85].

Система автоматического управления автосамосвалом (САУА) компании «Unit Rig Equipment» характерна отсутствием водителя в кабине. Система имеет в своём составе дорожное оборудование: подземный кабель с глубиной заложения 0,45 м и блоки управления. По кабелю подаются сигналы, управляющие скоростью, направлением движения, разгрузкой карьерных самосвалов, звуковыми сигналами и т.п. Определяется расстояние между самосвалами. Местонахождение каждого из них отображается на центральном табло.

Экономичность системы проверялась на меднорудном карьере, где работали 10 экскаваторов и 54 самосвала. Время использования экскаваторов увеличилось на 7%, коэффициент использования самосвалов – на 25%. Совместное использование систем АУА и диспетчеризации позволило уменьшить парк самосвалов и сократить эксплуатационные расходы на 25% [66].

Автоматизированная система *DISPATCH* (см. п. 1.2) впервые была внедрена в 1980 г. на карьере «Тугоне» (США), затем многократно модернизировалась и действует по настоящее время. *DISPATCH* – наиболее известная, мощная и проработанная крупномасштабная система управления карьером, контролирующая взаимодействие карьерных самосвалов и экскаваторов.

Система создана на основе компьютерной программы реального времени и состоит из двух отдельных функций, делающих возможной связь каждого с каждым через общую базу данных. В первой части идёт работа с операциями в реальном времени, во второй части формируется «диспетчерский журнал». Эту модель можно использовать и для опосредованной, и для непосредственной диспетчеризации. Система даёт отчёты о перемещениях, авариях и изменениях в работе экскаваторов, простоях карьерных самосвалов и дробилок, а также об изменениях состава горной массы. Диспетчер, как правило, осуществляет общее руководство – путём простого мониторинга распределений, проводимых компьютером.

Водитель карьерного самосвала в начале смены запрашивает инструкции, а система показывает, когда самосвал прибывает к экскаватору и когда загружается.

Машинисты экскаваторов предоставляют информацию о типах загружаемого материала, задержках и поломках. DISPATCH распределяет карьерные самосвалы для минимизации очередей у экскаваторов и простоев экскаваторов, используя динамическое программное распределение.

Система использует спутниковую навигацию (GPS). Текущие координаты, скорости и состояние карьерных самосвалов, координаты, состояние и показатели работы экскаваторов определяются тогда же, когда определяется распорядок работы самосвалов. Координаты самосвалов отслеживаются либо с помощью датчиков местоположения, либо из информации, вводимой водителями в контрольные приборы. Есть сведения о приростах производительности на 10-15% на карьерах, использующих систему DISPATCH [1, 22, 66, 85 – 88].

С 1983 года свою АСУ ГТК выпускает компания «*Wenco International Mining Systems*» (Канада). Её современная модификация использует GPS, осуществляя мониторинг состояния и диспетчеризацию мобильных объектов. Система автоматически и с высокой точностью фиксирует все составляющие погрузочно-транспортного цикла в реальном времени. Записываются данные о производительности, для каждой погрузки ведется учёт места погрузки, номера экскаватора, номера самосвала, табельных номеров операторов, количества погруженной горной массы, качества сырья, пункта разгрузки. Учитываются простои по различным причинам: заправка топливом, пересмена, обеденный перерыв и т.д.

Вся информация о работе мобильных объектов отображается в реальном времени в диспетчерском центре и офисе карьера. Руководитель и диспетчер могут отслеживать все события в карьере, и либо самостоятельно принимать решения на основе получаемой информации, либо поручить оптимизацию процесса производства системе. Система способна распределять карьерные самосвалы по закрытому, открытому и комбинированному циклам.

Различные модификации системы «Wenco» внедрены на многих горнодобывающих предприятиях, например, на рудниках «Кумтор» (Киргизия), «Syn crude» (Канада) и на двух карьерах АК «АЛРОСА» (Россия) [1, 66, 89 – 93].

Одной из новейших является система «*MineStar FleetCommander*» компании «Caterpillar». В 2009 году на золотом прииске «Gold Quarry» (США) введена в эксплуатацию модернизированная версия «FleetCommander 3.0».

Ключевой функцией «модуля распределения» данной системы является маршрутизация карьерных самосвалов в соответствии с задачами производства. Эти задачи могут включать в себя определение количественных и качественных характеристик перевозимой горной массы. Это позволяет предприятию контролировать тип и качество производимой руды, в соответствии с установленным планом. Износ шин отслеживается с помощью функции ТКВЧ/ТМВЧ (тонно-километры в час/тонно-мили в час). Все эти возможности позволяют максимизировать производительность, снизить износ техники и повысить качество выпускаемой руды.

Модуль «поддержки в принятии решений» помогает управленческому персоналу оценивать воздействия, которые могут изменить специфические параметры, установленные производственным планом в конкретной смене. Корректировка задач, смена приоритетов, простои техники, а также возможные проблемы и помехи – всё это может быть смоделировано с быстрым выводом результатов. Путём оценки влияния факторов «что если» на потенциальные изменения в ближайшем будущем система «FleetCommander» обеспечивает эффективные решения для оптимизации производительности.

Каждое возможное распределение карьерных самосвалов проверяется на соответствие локальным целям. На управление карьерным автотранспортом влияют и многие другие факторы. «Модуль распределения» предлагает следующие возможности для облегчения процесса управления:

- совместимость с разными карьерными самосвалами, экскаваторами, отвалами и типами горной массы;
- определение избытка либо недостатка самосвалов в системе;
- обеспечение направления самосвалов в подходящую зону парковки во время плановых перерывов в работе водителей;
- направление самосвалов в нужные пункты для пересмены водителей;

- мониторинг уровня топлива в топливных баках самосвалов и направление последних к заправочной станции по мере надобности;
- мониторинг состава руды для достижения целевого уровня качества;
- функция ТКВЧ/ТМВЧ снижает износ шин и затраты на них, выбирая маршруты, которые позволяют поддерживать шины в рабочем состоянии. Для каждого активного автосамосвала определяется среднее значение ТКВЧ/ТМВЧ с отображением соответствующих индикаторов на мониторах центра управления производством.

Обновлённая версия «FleetCommander 3.0» может использовать не только американскую систему спутниковой навигации GPS, но и российскую ГЛОНАСС. Это является положительным свойством, так как в некоторых труднодоступных точках карьеров сигнал GPS может быть недоступен. Одновременное использование двух спутниковых систем обеспечивает непрерывность спутникового сигнала в любой момент времени [94, 95].

Система «*Terralite XPS*» фирмы «Novariant» создана для глубоких карьеров или карьеров со сложным ландшафтом, в которых приём сигналов GPS может быть затруднён. Принцип её действия схож с вышеописанными системами, с той разницей, что «*Terralite XPS*» имеет базовую приёмопередающую станцию и сеть мобильных ретрансляторов (*terralites*), расположенных по периметру карьера. Таким образом, обеспечивается непрерывность сигнала GPS даже в самых труднодоступных точках карьера [96, 97, 98].

В настоящее время и российские, и зарубежные учёные ведут работу над созданием «интеллектуальных карьеров», то есть систем автоматизированной и роботизированной добычи полезных ископаемых, обеспечивающих такую степень автоматизации горнотранспортного оборудования, при которой горная техника частично или полностью работает без водителей и операторов. Данный подход позволяет решить проблемы подбора высококвалифицированного персонала при разработке месторождений в условиях Крайнего Севера, а также в пустынных и горных регионах с недостаточно развитой социальной инфраструктурой. Кроме того, появится возможность снизить расходы на рабочую силу [99, 100, 101].

В заключение следует отметить, что автоматизированные системы диспетчеризации карьерного автотранспорта зарубежных фирм («Wenco», «Modular» и др.) являются сложными и дорогими и предназначены для карьеров со сложным управлением (например, крупных рудных карьеров, где помимо диспетчерской задачи решается ряд других задач – к примеру, контроля качества руды). Их приобретение и внедрение требует значительных затрат, и позволить себе это могут лишь очень крупные и высокодоходные предприятия, где прибыль от повышения эффективности управления будет значительной.

Для карьеров с простым управлением (например, разрезов) приобретение зарубежных АСД будет экономически не оправдано, а отечественные АСД, ввиду своего несовершенства, скорее всего, не дадут желаемого эффекта. Некоторые отечественные системы (например, «КАРЬЕР» фирмы «ВИСТ-Групп») имеют функцию распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки, однако, как показывает опыт их использования, стабильных результатов пока нет.

Поэтому для карьеров с простым управлением (в частности, для разрезов) есть смысл разрабатывать свои диспетчерские системы, которые будут использовать принципы работы импортных систем, а по стоимости смогут конкурировать с отечественными аналогами. Это является тем более важным в условиях проводимой сегодня в Российской Федерации политики импортозамещения.

1.4 Современные требования к системам диспетчеризации карьерного автотранспорта. Цель и задачи исследований

Исходя из описания различных подходов и стратегий, а также их потенциальных возможностей, можно выделить некоторые условия, которые в будущем должны выполняться в любой качественной системе диспетчеризации карьерного автотранспорта.

Во-первых, такая система должна быть основана на мультиуровневом подходе, поскольку этот подход имеет серьезные преимущества перед одноуровневым. Они состоят, главным образом, в использовании системы предписаний, которая предоставляет диспетчерской системе гораздо более высокий уровень обес-

печенности информацией, повышающий качество диспетчеризации. Эти предписания определяются на верхнем уровне мультиуровневых систем с помощью математических программ. На эту «директиву» затем ссылаются при принятии оперативных диспетчерских решений. Математическая программа, применяемая на верхнем уровне, может учитывать факторы, которыми трудно оперировать в одноуровневых системах: требования к составу горной массы в пунктах разгрузки, коэффициенты вскрыши, минимальные и максимальные ограничения выработки экскаваторов и др. Для конкретных условий производства можно определить несколько целевых предписаний: минимизировать затраты, максимизировать производительность или даже величину прибыли, если доступны соответствующие данные.

Чтобы быть эффективными, мультиуровневые системы должны быстро реагировать на какие-либо серьёзные изменения в состоянии системы. Сегодня это стало возможным с помощью новых технологий сбора данных, а также эффективности новейших версий программного обеспечения для математического программирования. Из этого следует, что проблема сложности быстрой адаптации мультиуровневых систем к постоянным изменениям в карьере теряет свою актуальность. В идеале обновляемые предписания должны отражать не только текущее состояние системы, но и принимать в расчёт события, которые могут наступить и изменят, таким образом, условия работы в ближайшем будущем.

Далее необходимо определить стратегию, с помощью которой следует осуществлять диспетчеризацию на нижнем уровне. Оказывается, что с непрерывным повышением мощности компьютеров, а также постоянным совершенствованием методов решения задач в исследовании операций, становится возможным усиление комбинаторности проблемы диспетчеризации карьерного автотранспорта с целью интеграции последовательных диспетчерских решений. Вместо принятия того факта, что карьерные самосвалы ведут себя сугубо индивидуально, то есть каждый самосвал направляется в пункт своего назначения, игнорируя эффект будущих распределений, нужно признать, что самосвалы способны работать и сообща. Только стратегия «*M самосвалов и N экскаваторов*» может это обеспечить,

так как все возможности распределения для карьерных самосвалов, рассматриваемых в данной задаче, принимаются в расчёт. Тем не менее, необходимо избегать недостатков, присущих распределительной или транспортной формулировке задачи диспетчеризации. Вернее, нужно рассматривать более общие математические формулировки, чтобы учесть возможные взаимодействия между карьерными самосвалами, прибывающими из разных пунктов, особенно в отношении времени простоя самосвалов, которое может значительно изменяться от одного возможного распределения к другому.

Поскольку карьеры являются динамическими системами, то информация постоянно изменяется и должна часто обновляться. Для эффективной работы системы требуется, чтобы информация о её состоянии была доступна в реальном времени. Как ранее упоминалось, необходимые технологии уже существуют. Данные технологии в основном построены на использовании GPS с встраиванием мониторов «жизненных показателей» и компьютеров в состав бортового оборудования мобильной техники. Такое внедрение позволяет использовать GPS более широко, чем просто для определения местоположения карьерных самосвалов и экскаваторов в реальном времени. С помощью спутниковой навигации можно, к примеру, определить скорость самосвала и убедиться в том, что каждый самосвал движется к пункту своего назначения по правильному маршруту. Таким образом, появляется возможность генерировать и динамически обновлять статистические данные о времени различных пробегов, которое должно соблюдаться с максимальной строгостью в течение всей смены, чтобы получать качественные предписания от диспетчерской системы. Наконец, можно отслеживать отклонения в статистических данных по времени пробегов, чтобы определять ухудшение дорожных условий на некоторых участках; исходя из всего этого, можно планировать проведение работ по ремонту дорог.

Основная задача бортовых мониторов «жизненных показателей» карьерных самосвалов – определение потенциальных механических неполадок. Так, чтобы снизить негативное влияние поломок самосвалов на производительность, можно немедленно отправить самосвал на ремонт или запланировать это на более позд-

ний срок (в зависимости от серьёзности неисправности). Но можно использовать информацию с мониторов «жизненных показателей» и для задач диспетчерской системы, чтобы повысить качество принимаемых в ней решений. С помощью этих мониторов можно определять массу каждой загрузки и генерировать статистические данные по времени погрузки и разгрузки карьерных самосвалов, так как мониторы технического состояния могут содержать информацию о том, когда экскаватор начинает загрузку самосвала, когда самосвал начинает движение или разгрузку. Таким же образом можно уточнять статистические данные по времени пробегов, поскольку текущая скорость самосвала всегда известна. Более того, проводя мониторинг температурного режима в двигателе и тормозной системе, можно, например, определить благоприятные и неблагоприятные условия эксплуатации, которые могут влиять на различные статистические данные, получаемые из карьера.

Всё это возможно только благодаря информации от работающих карьерных самосвалов. Но можно пойти дальше, если принять к рассмотрению информацию, исходящую от экскаваторов. К примеру, используя мониторы технического состояния экскаваторов в сочетании с GPS и геологической моделью забоя, можно определить тип горной массы, с которой работает экскаватор. Поэтому становится возможным получать информацию о качестве каждой загрузки. Располагая этой информацией, а также зная количество горной массы, погруженной в самосвалы, можно тщательно контролировать горную массу, направляемую в пункты переработки, и, таким образом, интегрировать требования к составу горной массы в диспетчерские решения.

Поскольку технологии сбора данных уже существуют и позволяют создавать достаточно сложные системы диспетчеризации, то есть возможность начать разработку систем, удовлетворяющих описанным выше требованиям.

Наиболее важным элементом системы диспетчеризации карьера, непосредственно влияющим на качество её функционирования, является стратегия, с помощью которой осуществляется оперативная диспетчеризация карьерного автотранспорта на нижнем уровне мультиуровневой системы. Ввиду того, что погру-

зочно-транспортные процессы, протекающие в ЭАК карьеров, имеют ярко выраженную стохастическую природу, применения аналитических методов решения задачи диспетчеризации (в её распределительной или транспортной формулировке) следует избегать, поскольку они более характерны для описания детерминированных процессов. Большие возможности для решения таких задач даёт имитационное моделирование.

Резюмируя сказанное выше, можно сделать следующие выводы.

1. Эксплуатационная производительность ЭАК современных разрезов во многом зависит от эффективности использования карьерных экскаваторов и самосвалов, определяемой величиной их простоев в течение смены в ожидании работы. Для самосвалов эти простои достигают сегодня до 30% рабочего времени.

2. Основные резервы сокращения простоев погрузочно-транспортного оборудования заключены в повышении эффективности применяемой системы диспетчеризации карьерного автотранспорта в составе ЭАК разреза. Создать единый оптимальный алгоритм распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки не представляется возможным, и в каждом конкретном случае решается задача локальной оптимизации работы ЭАК с применением математических и эвристических методов.

3. Предполагаемая диспетчерская модель ЭАК разреза должна быть двухуровневой. На верхнем уровне устанавливается оптимальный план погрузки и перевозок, который является целевой установкой (ЦУ) для нижнего уровня. На нижнем уровне должен применяться алгоритм оптимального распределения карьерных самосвалов по выбранному критерию для достижения ЦУ верхнего уровня. В качестве критерия принятия решений по распределению может быть выбран комплексный критерий, учитывающий интегральные простои карьерного погрузочно-транспортного оборудования, а также разную приоритетность экскаваторов и соответствующих им маршрутов транспортирования горной массы.

4. Доступность информации о состоянии диспетчерской системы в реальном времени, требуемая для эффективной её работы, достигается использованием средств спутниковой навигации с выводом информации на бортовые мониторы

«жизненных показателей». Всё это является основой создания отечественных систем диспетчеризации карьерного автотранспорта как продукта импортозамещения.

В связи с этим, целью настоящей работы является повышение эксплуатационной производительности ЭАК разрезов посредством оптимизации распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки. Идея работы состоит в максимальном учёте стохастического характера погрузочно-транспортных процессов в ЭАК и использовании имитационного моделирования для их описания и оптимизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ и сравнительную оценку существующих методов диспетчеризации карьерного автотранспорта для выявления перспективных направлений их совершенствования (уже решена в настоящей главе);

- разработать двухуровневую диспетчерскую модель ЭАК разреза на основе анализа существующих методов диспетчеризации;

- разработать имитационную модель и алгоритм оптимизации распределения самосвалов на нижнем уровне диспетчерской модели, и создать на их базе программный комплекс;

- испытать программный комплекс и оценить влияние предложенных решений на эксплуатационную производительность ЭАК разреза.

2 ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА

2.1 Характеристика двухуровневой диспетчерской модели экскаваторно-автомобильного комплекса

В ЭАК разрезов наибольшее внимание уделяется повышению их эксплуатационной производительности или сокращению простоев погрузочно-транспортного горного оборудования. От способности диспетчерского алгоритма максимизировать производительность или сократить простои горного оборудования в ЭАК в реальном масштабе времени во многом зависит и эффективность двухуровневой диспетчерской модели.

Схема разрабатываемой двухуровневой диспетчерской модели ЭАК разреза представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема двухуровневой диспетчерской модели ЭАК разреза

Как видно из схемы, двухуровневая диспетчерская модель состоит из двух частей. Первая часть (верхний уровень) модели представляет собой программно-целевую модель (ПЦМ, обычно линейную) для определения целевых показателей

производительности (выработки) и является основой краткосрочного прогнозирования и планирования работы ЭАК разреза. Во второй части (на нижнем уровне) системы диспетчеризации с использованием математического программирования или эвристических методов строится алгоритм диспетчеризации для распределения карьерных самосвалов между экскаваторами в реальном масштабе времени на основе оптимального решения, полученного на верхнем уровне. Следовательно, способность диспетчерской модели к максимизации производительности (или сокращению простоев) зависит, во-первых, от эффективности принятой программно-целевой модели и, во-вторых, от эффективности диспетчерского алгоритма. Кроме того, диспетчерская система должна обладать гибкостью, то есть способностью быстро реагировать на такие изменения в работе ЭАК, как, например, выход из строя карьерных экскаваторов или самосвалов.

При решении задачи максимизации эксплуатационной производительности ЭАК на верхнем уровне должны быть установлены целевые показатели работы ЭАК в виде плановых значений выработки для каждого экскаватора, на основании которых, а также существующей транспортной системы карьера, количества и местоположения пунктов складирования горной массы (отвалов) определяются оптимальные грузопотоки между экскаваторами и отвалами. Эти оптимальные грузопотоки на маршрутах, полученные в результате решения ПЦМ на верхнем уровне, используются в качестве целевых показателей, служащих основанием для определения «нуждающихся» экскаваторов. При этом «нуждающиеся» экскаваторы определяются либо по величине накопленной выработки каждого маршрута, либо по величине отклонения накопленной выработки каждого экскаватора от плана. Большое отклонение от плана будет означать, что экскаватор используется неэффективно. Следовательно, цель работы ЭАК на верхнем уровне – минимизировать отклонение от плана.

Таким образом, на верхнем уровне на основании плана экскавации горной массы, которую необходимо погрузить и вывезти, формируется парк погрузочной техники (экскаваторов) и соответствующий ему парк карьерных самосвалов. Плановые объёмы горной массы, подлежащей погрузке и транспортированию в отва-

лы, разделяются между погрузочными пунктами, очевидно, по номинальной производительности экскаваторов, размещаемых в этих пунктах. Решается транспортная задача: зная расстояния от каждого экскаватора до каждого отвала, можно установить – какие объёмы горной массы должны быть перевезены от каждого экскаватора на каждый отвал. Основным критерий маршрутизации – минимальный пробег. Вывоз на разные отвалы необходим во избежание возникновения заторовых ситуаций для автосамосвалов, а также ввиду возможной ограниченной вместимости отвалов.

Этот план погрузки и вывоза является основанием для выбора способа диспетчеризации. Одна из главных целей, которую необходимо достичь на нижнем уровне, – максимальное выполнение каждым экскаватором своего плана; иными словами – максимальная эффективность использования экскаватора, являющегося основной (ведущей) машиной в составе ЭАК. Для этого в диспетчерской модели предусмотрена обратная связь. Обратной связью между нижним и верхним уровнем является проверка после каждого распределения выполнения плана погрузки каждым экскаватором. Экскаватор, который недовыполняет план в наибольшей степени, используется неэффективно, и вероятность того, что следующий самосвал будет направлен именно к этому экскаватору, возрастает. Подробно обратная связь описана в п. 3.2.

Какой бы способ диспетчеризации ни был выбран, необходимо рассмотреть следующие варианты (режимы работы ЭАК):

- соотношение парков карьерных экскаваторов и самосвалов различное (однородные, однородно-смешанные, смешанные);
- ЭАК работает по закрытому циклу, когда каждый карьерный самосвал закреплён за конкретным экскаватором и перезакрепляется только в случае выхода экскаватора из строя. Критерий закрепления и перезакрепления – соответствие вместимостей кузовов самосвалов и ковшей экскаваторов;
- ЭАК работает по открытому циклу, когда порожний карьерный самосвал направляется к свободному или наименее загруженному экскаватору вне зависимости от соответствия ёмкостей кузовов и ковшей;

– ЭАК работает по комбинированному циклу, когда порожние карьерные самосвалы направляются к свободному или наименее загруженному, но подходящему по указанному соотношению, экскаватору, для чего создаются соответствующие «группы диспетчеризации».

Критерием эффективности (оптимизации) может быть минимум суммарных простоев карьерных экскаваторов и самосвалов с учётом их «весов». «Весом» может служить, например, недополученная выручка от реализации угля, не добытого из-за простоев оборудования.

Следует рассмотреть также следующие варианты структуры парков карьерных экскаваторов и самосвалов:

- парк экскаваторов соответствует парку самосвалов;
- система недогружена, то есть наличный парк карьерных самосвалов не может обеспечить своевременный вывоз горной массы (самосвалов недостаточно);
- система перегружена, то есть наличный парк экскаваторов не может обеспечить работой весь парк карьерных самосвалов (самосвалов – излишек).

2.2 Программно-целевая модель для планирования погрузки и перевозок

Общий план погрузки и перевозок для разреза на рабочую смену, задаваемый для верхнего уровня двухуровневой системы диспетчеризации, ограничен максимально возможной сменной производительностью (выработкой) действующего экскаваторного парка предприятия, определяющей и эксплуатационную производительность ЭАК в целом.

Суммарную сменную производительность (выработку) экскаваторного парка ЭАК разреза можно определить по формуле (т):

$$\sum_j Q_j = 3600 \frac{\rho_{\Pi} \cdot E_{Kj}^3 \cdot k_{\text{нк}}}{t_{\text{ц}j}^3 \cdot k_{\text{р}}} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{\text{упр}} \cdot k_{\text{кл}} \cdot n_j \cdot T_{\text{см}} \cdot k_{\text{ЭАК}}^{\text{ЭАК}}, \quad (2.1)$$

где ρ_{Π} – плотность горной массы в целике, т/м³;

E_{Kj}^3 – геометрический объём ковша экскаватора j -й модели, м³;

$t_{цj}^э$ – продолжительность цикла экскаватора j -й модели, с;

$k_{нк}$ – коэффициент наполнения ковша;

k_p – коэффициент разрыхления горной массы;

$k_{п}$ – коэффициент потерь погружаемой горной массы ($k_{п} = 0,98...0,99$ [102]);

$k_{упр}$ – коэффициент управления, учитывающий несоответствие паспортных и фактических параметров забоя, квалификацию машиниста и т.д. ($k_{упр} = 0,92...0,98$ [102]);

$k_{кл}$ – коэффициент влияния климата (для летнего периода можно принять $k_{кл} = 1$);

n_j – количество экскаваторов j -й модели в составе действующего парка экскаваторов;

$T_{см}$ – продолжительность рабочей смены, ч;

$k_{эп}^{ЭАК}$ – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК (на этапе проектирования принимается в пределах $0,75...0,85$ или определяется по фактическим данным предприятия).

Продолжительность рабочей смены принимается равной: для максимальной выработки $T_{см max} = 12$ ч, что соответствует номинальной продолжительности смены; для минимальной – $T_{см min} = 9$ ч (по данным разреза), поскольку в ней учтены все возможные регламентированные перерывы в работе экскаваторов. Второе значение актуально только при установлении норм сменной выработки; во всех остальных расчётах принималось $T_{см min} = 10$ ч, поскольку это значение ближе к фактическому времени работы горного оборудования в течение смены.

Коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК $k_{эп}^{ЭАК}$ представляет собой отношение времени чистой работы карьерных экскаваторов и самосвалов (без учёта тех простоев, которые не представляется возможным учесть) к продолжительности смены с учётом всех регламентированных и неплановых простоев. Поскольку регламентированные простои учтены в $T_{см min}$, коэффициент $k_{эп}^{ЭАК}$ после преобразований может быть представлен как:

$$k_{\text{ЭП}}^{\text{ЭАК}} = 1 - \frac{\sum_1^{N_c} t_{\text{пр}}^c + \sum_1^{N_{\text{э}}} t_{\text{пр}}^{\text{э}}}{T_{\text{см}} (N_c + N_{\text{э}})}, \quad (2.2)$$

где $\sum_1^{N_{\text{э}}} t_{\text{пр}}^{\text{э}}$, $\sum_1^{N_c} t_{\text{пр}}^c$ – суммарные простои в работе всех $N_{\text{э}}$ экскаваторов и N_c самосвалов в течение рабочей смены соответственно, ч.

Если в разрезе действует одновременно несколько (n_k) отвалов, вместимость их ограничивается технологическими причинами, а значит, должна задаваться заранее. Следовательно, в течение смены на все действующие отвалы должно быть вывезено (т):

$$\sum_{k=1}^{n_k} Q_k = \sum_j Q_j, \quad (2.3)$$

где Q_k – вместимость k -го отвала, т.

Следовательно, суммарная выработка $\sum_j Q_j$ с вывозом горной массы на n_k отвалов и будет составлять сменный план погрузки и перевозок для разреза.

Если обозначить через q_{ik} количество тонн горной массы, вывозимое от экскаватора i на отвал k , тогда линейная программно-целевая модель будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{mn_j} \sum_{k=1}^{n_k} l_{ik} \cdot q_{ik} \rightarrow \min; \quad (2.4) \\ \sum_{i=1}^{mn_j} q_{ik} = Q_k, k = 1, 2, \dots, n_k; \quad (2.5) \\ \sum_{k=1}^{n_k} q_{ik} = \sum_j Q_j, i = 1, 2, \dots, n_j; \quad (2.6) \\ q_{ik} \geq 0, i = 1, 2, \dots, mn_j; k = 1, 2, \dots, n_k, \quad (2.7) \end{array} \right.$$

где l_{ik} – расстояние транспортирования от i -го экскаватора до k -го отвала и обратно, выступающее в качестве транспортных издержек, км; m – число моделей экскаваторов.

Линейная программно-целевая модель (2.4) проверялась применительно к действующему разрезу «Кедровский», являющемуся филиалом ОАО «УК "Кузбассразрезуголь"» (далее – разрез «Кедровский»). Действующие на данном предприятии парк карьерных экскаваторов и самосвалов, а также их важнейшие характеристики приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Состав и характеристика действующего экскаваторного парка

Параметры	Участок №1		Участок №3					
	Р&Н-2800 №28195	ЭКГ-15 №49	ЭКГ-12ус №12	ЭКГ-15 №42	Р-994 №18061	Р&Н2800 №152	ЭКГ-12ус №9	ЭКГ-10 №285
Вместимость ковша E_R^3 , м ³	33	15	12,5	15	13,5	33	12,5	10
Время цикла $t_{цj}^3$, с	32	28	30	28	25	32	30	30

Таблица 2.2 – Состав и характеристика действующего парка карьерных самосвалов

Показатель	БелАЗ-75131	БелАЗ-75306
Грузоподъемность q , т	130	220
Масса самосвала q_T , т	100	146
Вместимость кузова с «шапкой» 2:1, м ³	71,17	129,8
Максимальная скорость движения v_{max} , км/ч	40	42
Количество, ед.	6	26

Согласно отчётам АСД разреза «Кедровский» горные работы с использованием автотранспорта ведутся на участках №1 и №3.

На участке №3 работает 6 экскаваторов (ЭКГ-15 №42, ЭКГ-12ус №12, Р&Н-2800 №152, ЭКГ-12ус №9, Р-994 №18061 и ЭКГ-10 №285), от которых горная масса вывозится на два отвала: «Центральный» и «Южный». Во избежание образования заторов при движении карьерных самосвалов грузопотоки должны быть рассредоточены таким образом, чтобы на каждый из указанных отвалов вывозилось равное количество горной массы.

По факту отвал «Южный» практически не используется из-за проблем организационного характера. Экскаваторы Р-994 №18061 и ЭКГ-10 №285 помимо вскрыши грузят и уголь, а поскольку нас интересуют только перевозки вскрыши, их пока можно не рассматривать. Из этого следует вывод, что задачу распределения вывоза на отвалы для этого участка решать не обязательно: вся горная масса от экскаваторов ЭКГ-15 №42, ЭКГ-12ус №12, Р&Н-2800 №152 и ЭКГ-12ус №9 будет вывозиться на один «Центральный» отвал.

На участке №1 работают 2 экскаватора: Р&Н-2800 №28195 и ЭКГ-15 №49, которые располагаются ближе к отвалу «Северный». Для данного участка опреде-

лять оптимальные маршруты также нет необходимости, потому что они очевидны. Следовательно, задачу по установлению оптимальных маршрутов и грузопотоков в данном частном случае решать не нужно. В противном случае решается транспортная задача по оптимальному распределению грузопотоков между соответствующими пунктами погрузки и разгрузки (с разделением на участки).

Максимальная и минимальная сменная выработка для каждого экскаватора определялась по формуле (2.1). Оптимальный план погрузки и вывоза горной массы на разрезе «Кедровский» приведён в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оптимальный план погрузки и перевозок горной массы, тыс. т

Отвалы	Экскаваторы						Сумма, тыс. т
	Участок №1		Участок №3				
	Р&Н-2800 №28195	ЭКГ-15 №49	ЭКГ-15 №42	ЭКГ-12ус №12	Р&Н-2800 №152	ЭКГ-12ус №9	
Северный, №1	37,4 49,8	19,4 25,9					56,8 / 75,7
Центральный, №3			19,4 25,9	15,1 20,1	37,4 49,8	15,1 20,1	87,0 / 115,9
Сумма, тыс. т	37,4 49,8	19,4 25,9	19,4 25,9	15,1 20,1	37,4 49,8	15,1 20,1	143,8 / 191,6

Примечание. В числителе – минимальная сменная выработка, соответствующая $T_{см\ min} = 9$ ч; в знаменателе – максимальная сменная выработка, соответствующая $T_{см\ max} = 12$ ч.

2.3 Формирование групп диспетчеризации в составе экскаваторно-автомобильного комплекса

Организация работы ЭАК по закрытому циклу (с закреплением карьерных самосвалов за экскаваторами) зачастую приводит к образованию очередей у отдельных экскаваторов, и, как следствие, к увеличенным простоям погрузочно-транспортного оборудования.

Однако и организация перевозок по открытому циклу (без закрепления карьерных самосвалов за экскаваторами) ввиду неоднородности парков экскаваторов и самосвалов может не принести ожидаемой выгоды. Поэтому имеет смысл рассмотреть комбинированный (открыто-закрытый) цикл, при котором формиру-

ются группы диспетчеризации (ГД) из конкретных карьерных экскаваторов и самосвалов, которые будут работать вместе. Внутри этих групп распределение машин осуществляется по открытому циклу. ГД формируются исходя из соответствия вместимостей кузовов имеющихся в наличии карьерных самосвалов и ковшей имеющихся экскаваторов друг другу. Традиционные методики определения оптимального состава парков техники (например, из отношения времени рейса ко времени погрузки) здесь могут не работать по причине возможного недостатка самосвалов.

Аналитическая методика формирования ГД следующая. На первом этапе определяется суммарная вместимость всех ковшей всех подлежащих рассмотрению экскаваторов по формуле

$$\sum E_{\text{к}}^{\text{э}} = \sum_1^a \sum_j E_{\text{к}j}^{\text{э}} \cdot n_j, \quad (2.8)$$

где a – количество действующих участков разреза, на котором применяется автотранспорт;

$E_{\text{к}j}^{\text{э}}$ – вместимость ковша экскаватора j -го типоразмера, м^3 ;

n_j – количество работающих экскаваторов j -го типоразмера.

Затем рассчитывается общая вместимость кузовов всех работающих самосвалов (м^3):

$$\sum V_{\text{к}}^{\text{с}} = \sum_i V_{\text{к}i}^{\text{с}} \cdot n_i, \quad (2.9)$$

где $V_{\text{к}i}^{\text{с}}$ – вместимость кузова самосвала i -го типоразмера (с «шапкой»), м^3 ;

n_i – количество работающих карьерных самосвалов i -го типоразмера.

Тогда на 1 м^3 геометрической вместимости ковша экскаватора теоретически приходится

$$n_{ij} = \frac{\sum_i V_{\text{к}i}^{\text{с}} \cdot n_i}{\sum_1^a \sum_j E_{\text{к}j}^{\text{э}} \cdot n_j} \quad (2.10)$$

вместимости кузова карьерного самосвала.

Умножая полученное значение поочерёдно на вместимость ковша каждого экскаватора, получаем величину, отражающую часть общей вместимости кузовов, приходящуюся на данный экскаватор (м^3):

$$E_{j_1} = n_{ij} \cdot E_{\text{к}j_1}^3, \quad (2.11)$$

что при вместимости кузова соответствующего карьерного самосвала требует

$$N_{\text{с}i_1} = \frac{E_{j_1}}{V_{\text{к}i_1}^c} \quad (2.12)$$

самосвалов i -го типоразмера. Получаемое дробное значение $N_{\text{с}i_1}$ округляется до целого.

После того как определено, какое количество самосвалов каждого типоразмера приходится на каждый экскаватор, проводится первичное распределение карьерных самосвалов между экскаваторами. Экскаваторам большего типоразмера придаются и самосвалы большего типоразмера, учитывая также расположение экскаваторов на участках горных работ.

Транспортный поток карьерных самосвалов обладает тремя основными свойствами [1].

1. *Неопределённость.* Управление самосвалами (активное) возлагается на водителя и частично на систему, которую образуют самосвалы (пассивное). Карьерный автотранспортный поток не имеет графика движения, поэтому в течение смены он функционирует как самонастраивающаяся система. Различия в скоростных характеристиках карьерных самосвалов (различные модели машин, различная степень их изношенности) приводит к снижению средней скорости транспортного потока и, соответственно, к снижению его производительности.

2. *Конечность.* Размеры самосвалов и сетей карьерных автодорог соизмеримы, поэтому на отдельных участках дорог возможно возникновение помех движению и заторовых ситуаций. Взаимодействие самосвалов между собой как элементов транспортной системы разреза определяется скоростной характеристикой единичного самосвала. При этом скорости отдельных машин являются конеч-

ной величиной и могут изменяться во времени. Автотранспортным потокам свойственно уменьшение скорости движения самосвалов с ростом их числа в разрезе.

3. *Зависимость расстояния от времени.* Изменения положения карьерного самосвала в пространстве и времени, рассматриваемые как стохастические процессы, не являются идентичными, так как скорость движения самосвалов не остаётся постоянной.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать следующее требование: использовать на отдельных маршрутах (или в отдельных группах диспетчеризации) однотипные по скоростным качествам самосвалы. При использовании в разрезе самосвалов с одинаковыми скоростными характеристиками задача упрощается, так как разница в их скоростях возможна лишь из-за различной их изношенности (а также различной квалификации водителей) и, скорее всего, не выйдет из допустимых пределов. Кроме того, в работе [103] установлено, что при работе с отдельными экскаваторами карьерных самосвалов одного типоразмера их простои в ожидании погрузки существенно уменьшаются. Таким образом, в группах диспетчеризации рекомендуется использовать карьерные самосвалы одной модели (однородный парк).

В качестве примера формирования ГД рассмотрим фактические данные о работе погрузочно-транспортной техники на разрезе «Кедровский». Как уже упоминалось, согласно плану ведения работ на разрезе вскрышные работы с использованием автотранспорта ведутся на участках №1 и №3. Действующие на данном предприятии экскаваторы и автосамосвалы, а также их технические характеристики приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Все 6 самосвалов БелАЗ-75131 обычно заняты на экскаваторах №18061 и №20693, исключённых из рассмотрения. Поэтому далее рассматриваем только самосвалы БелАЗ-75306.

Расчёты производились по изложенной выше методике. Результаты расчётов сведены в таблицу 2.4.

Таким образом, получаем следующее первичное распределение самосвалов между экскаваторами:

- на два экскаватора Р&Н-2800 – 14 самосвалов БелАЗ-75306;
- на два экскаватора ЭКГ-12ус – 6 самосвалов БелАЗ-75306;
- на два экскаватора ЭКГ-15 – 6 самосвалов БелАЗ-75306.

Экскаваторы, входящие в группу диспетчеризации, должны находиться на одном участке горных работ, работать с одним типом горной массы и быть способными обслуживаться самосвалами одного типоразмера. Расстояния транспортирования должны быть не более 5 км (поскольку карьерный автотранспорт эффективен на расстояниях до 5 км).

Формируются следующие укрупнённые группы диспетчеризации: на участке №1 с экскаваторами Р&Н-2800 №28195 и ЭКГ-15 №49 должны работать 10 машин БелАЗ-75306; на участке №3 с экскаваторами ЭКГ-12ус №9 и №12, ЭКГ-15 №42 и Р&Н-2800 №152 – 16 машин БелАЗ-75306.

Таким образом, на участках №1 и №3 имеем смешанные парки экскаваторов и однородные парки самосвалов.

Окончательно сформированные ГД будут выглядеть так:

№1). ЭКГ-15 №42, ЭКГ-12ус №12 – 6 машин БелАЗ-75306 – отвал «Центральный» (участок №3, открытая ГД, средние расстояния транспортирования – 2,28 км и 3,07 км соответственно);

№2). Р&Н-2800 №152, ЭКГ-12ус №9 – 10 машин БелАЗ-75306 – отвал «Центральный» (участок №3, открытая ГД, средние расстояния транспортирования – 3,95 км и 4,2 км соответственно);

№3). Р&Н-2800 №28195, ЭКГ-15 №49 – 10 самосвалов БелАЗ-75306 – отвал «Северный» (участок №1, открытая ГД, средние расстояния транспортирования – 3,02 км и 3,06 км соответственно).

Общие расчёты показывают, что для обслуживания всех рассматриваемых экскаваторов требуется 26 карьерных самосвалов БелАЗ-75306. В наличии на разрезе «Кедровский» имеется 26 действующих машин БелАЗ-75306 (соответствует требованиям). Однако это весьма приблизительные прикидки, поскольку неизвестна рациональная структура парков горнотранспортного оборудования. Для более точного её определения требуются дополнительные исследования.

Таблица 2.4 – Первичное распределение карьерных самосвалов между экскаваторами на участках горных работ

Показатели	Экскаваторы (количество)							Итого по разрезу
	Участок №1			Участок №3				
	Р&Н-2800 (1)	ЭКГ-15 (1)	Всего по участку	ЭКГ-12ус (2)	Р&Н-2800 (1)	ЭКГ-15 (1)	Всего по участку	
Суммарная вместимость ковшей всех экскаваторов, $\sum E_k^3$, м ³	33	15	48	25	33	15	73	121
Суммарная вместимость кузовов всех самосвалов, $\sum V_k^c$, м ³	3374,8							
Вместимость кузова самосвала на 1 м ³ вместимости ковша экскаватора	27,9							
Общая вместимость кузовов самосвалов на данный экскаватор	920,7	418,5	1339,2	697,5	920,7	418,5	2036,7	3374,8
Потребное количество самосвалов БелАЗ-75306, штук	7	3	10	6	7	3	16	26

2.4 Определение рациональной структуры парков техники в составе экскаваторно-автомобильного комплекса

В тех отраслях промышленности, где требуется перемещение больших объёмов горных пород, идёт постоянный поиск способов прогнозирования производительности и выбора рациональных парков техники для заданных условий [104, 105].

В работах [25, 26, 104, 105] предложены методики определения необходимого количества автосамосвалов N_c , способных сбалансировать суммарную производительность $N_э$ экскаваторов. Суть этих методик состоит в том, что между собой сравниваются фактическая производительность экскаваторов и потенциальная (теоретическая) производительность обслуживаемых ими самосвалов. В результате получают зависимость

$$F = \frac{t_{ц}^э \cdot N_c}{t_{ц}^с \cdot N_э}, \quad (2.13)$$

которую называют сравнительным фактором (СФ). Коэффициент F назван так потому, что его можно использовать для сравнения интенсивности прибытия самосвалов λ_c с интенсивностью обслуживания их экскаваторами $\lambda_э$; определяется он как отношение этих интенсивностей.

В формуле (2.13) $t_{ц}^э$ – время полного цикла экскаватора, с; $N_э$ – количество действующих экскаваторов; $t_{ц}^с$ – время цикла самосвала, с; N_c – количество самосвалов, действующих в ЭАК.

Если фактор $F = 1$, то существует некая точка равновесия, когда самосвалы прибывают к экскаваторам примерно с той же интенсивностью, с какой обслуживаются ими. Если $F > 1$, то самосвалы прибывают быстрее, чем обслуживаются, поэтому следует ожидать возникновения очередей. Фактор $F < 1$ показывает, что экскаваторы работают быстрее, чем прибывают самосвалы, и тогда вероятны простои экскаваторов в ожидании прибытия самосвалов.

СФ можно использовать для сравнительной оценки производительностей парков карьерных самосвалов и экскаваторов, а также для определения требуемо-

го количества самосвалов в ЭАК [22, 106]. СФ широко применяют специалисты, как горной промышленности, так и строительства. При этом строители могут быть заинтересованы в достижении значения СФ, близкого к 1, что обеспечивает максимальную производительность техники. Горняки же, напротив, могут стремиться к меньшим значениям СФ, что соответствует меньшим по численности паркам карьерных самосвалов. При этом, хотя и увеличиваются простои экскаваторов, зато существенно снижаются эксплуатационные расходы, большая часть которых на ОГР приходится именно на автотранспорт.

Зависимость (2.13) предполагает, что парк горного оборудования является однородным, то есть используется только один типоразмер карьерных самосвалов и экскаваторов. Однако на практике повсеместно встречаются смешанные (разномарочные) парки. В том случае, когда в составе ЭАК работают смешанные парки экскаваторов и однородные – карьерных самосвалов, что имеет место на разрезе «Кедровский», предлагается следующая зависимость для определения сравнительного фактора [25, 26, 107]:

$$F = \frac{N_c \cdot Z_{t_{\Pi}}}{\bar{t}_{\Pi}^c \cdot \sum_j \left(N_{\varepsilon_j} \cdot \frac{Z_{t_{\Pi}}}{t_{\Pi j}^{\varepsilon}} \right)}, \quad (2.14)$$

где N_c – общее количество карьерных самосвалов в составе ЭАК;

\bar{t}_{Π}^c – усреднённое время рабочего цикла для всех самосвалов за рассматриваемый период, с;

N_{ε_j} – количество экскаваторов j -й модели в системе;

$Z_{t_{\Pi}}$ – наименьшее общее кратное (НОК) индивидуальных значений времени погрузки в каждой паре «самосвал – экскаватор», с²;

$t_{\Pi j}^{\varepsilon}$ – время полного цикла j -го экскаватора при работе с самосвалами одного типоразмера, с.

При выборе парков самосвалов и экскаваторов с помощью линейного программирования, желаемые значения СФ могут быть включены в граничные условия, что позволит избежать больших простоев выбранных парков [22, 106].

Наибольшую сложность представляет определение рабочего цикла карьерного самосвала при различных сочетаниях типоразмеров машин в составе ЭАК. Время цикла карьерного самосвала может быть определено как сумма продолжительностей всех операций, составляющих цикл: погрузки ($t_{пij}^э$), транспортирования до места разгрузки ($t_{грi}$), разгрузку ($t_{разгр}$), движение порожнего самосвала к пункту погрузки ($t_{порi}$), простой самосвала в ожидании погрузки ($t_{ij}^{пп}$), а также время установки под погрузку ($t_{у.п}$) и разгрузку ($t_{у.р}$), то есть

$$t_{ци}^c = t_{пij}^э + t_{грi} + t_{порi} + t_{разгр} + t_{у.п} + t_{у.р} + t_{ij}^{пп}. \quad (2.15)$$

Время, затрачиваемое экскаватором j -го типоразмера на полную загрузку кузова карьерного самосвала i -го типоразмера, можно определить как (с):

$$t_{пij}^э = t_{циj}^э \cdot n_{кij}, \quad (2.16)$$

где $t_{циj}^э$ – время одного рабочего цикла экскаватора j -го типоразмера, с;

$n_{кij}$ – число ковшей экскаватора j -го типоразмера, погружаемых в самосвал i -го типоразмера.

Число ковшей, загружаемых в кузов карьерного самосвала, рассчитывается по двум критериям: по вместимости и по грузоподъёмности.

Потребное число ковшей экскаватора по вместимости кузова карьерного самосвала определяется как

$$n_{кij}^V = \frac{V_{ки}^c}{V_{кj}^э}, \quad (2.17)$$

где $V_{ки}^c$ – объём горной массы в кузове самосвала i -го типоразмера, m^3 (в расчётах следует учитывать возможность загрузки кузова самосвала «с шапкой»);

$V_{кj}^э$ – объём горной массы в ковше экскаватора j -го типоразмера, m^3 .

$$V_{кj}^э = E_{кj}^э \cdot k_{нк} \cdot k_y, \quad (2.18)$$

где $E_{кj}^э$ – геометрический объём ковша экскаватора j -го типоразмера, m^3 ;

k_y – коэффициент уплотнения горной массы.

Потребное число ковшей экскаватора по грузоподъёмности самосвала определяется следующим образом:

$$n_{kij}^q = \frac{q \cdot k_p}{E_{kj}^3 \cdot k_{нк} \cdot \rho_{п}}, \quad (2.19)$$

где q – номинальная грузоподъёмность карьерного самосвала, т.

Для определения загружаемого числа ковшей выбирается меньшее значение из n_{kij}^V и n_{kij}^q и округляется до целых.

В «Инструкции по учёту рабочего времени технологического автотранспорта» [6] приведены значения $k_{нк}$ и k_p для различных условий (таблица 2.5). Значения k_y и $\rho_{п}$ взяты из [108]. Время рабочего цикла действующих на разрезе «Кедровский» экскаваторов приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.5 – Значения коэффициентов наполнения ковша экскаватора, разрыхления и уплотнения горной массы, а также плотности горных пород в зависимости от типа экскаватора и категории пород по трудности экскавации

Показатели	Категория пород по экскавации				
	Глина II	Глина III	Порода III	Уголь III	Порода IV
Плотность горной массы в целике, $\rho_{п}$, т/м ³	1,5	1,9	2,15	1,6	2,6
Коэффициент разрыхления горной массы, k_p	1,25	1,3	1,33	1,33	1,48
Коэффициент наполнения ковша $k_{нк}$ (справочное значение):					
– для мехлопаты <15 м ³	0,86	0,74	0,74	0,74	0,66
– для мехлопаты >15 м ³	0,86	0,74	0,74	0,74	0,715
– для драглайна	0,83	0,69	0,69	0,69	0,59
Коэффициент уплотнения горной массы, k_y	0,9	0,87	0,87	0,87	0,84

Маршрут движения карьерного самосвала обычно разбивается на характерные участки:

– движение с грузом по горизонтальной забойной дороге со скоростью $v_{гр.гз}$;

- движение с грузом из забоя вверх по уклону i_k до верхнего уступа разреза (если уступов K , то количество подъёмов будет $K+1$) со скоростью $v_{гр.нз}$;
- движение с грузом по горизонтальной постоянной (карьерной) дороге на уступе со скоростью $v_{гр.гк}$;
- движение с грузом вверх по уклону i_k по траншейной дороге на поверхность со скоростью $v_{гр.нт}$, затем подъём на отвал по дороге несколько худшего качества;
- движение с грузом по горизонтальной отвальной дороге со скоростью $v_{гр.го}$;
- движение порожняком по горизонтальной отвальной дороге со скоростью $v_{пор.го}$;
- движение порожняком вниз по уклону траншеи i_k до уступа (если уступов K , то количество спусков будет $K+1$) со скоростью $v_{пор.нт}$;
- движение порожняком по горизонтальной постоянной (карьерной) дороге на уступе со скоростью $v_{пор.гк}$;
- движение порожняком вниз по уклону i_k в забой со скоростью $v_{пор.нз}$;
- движение порожняком по горизонтальной забойной дороге со скоростью $v_{гр.гз}$.

Скорость движения карьерного самосвала является важнейшим эксплуатационным показателем работы автотранспорта, определяющими характер движения по отдельным участкам пути и время полного оборота самосвала.

Применительно к автотранспорту различают конструктивную, техническую и эксплуатационную скорости движения. При тяговых расчётах автотранспорта пользуются технической скоростью, представляющей собой отношение длины данного участка дороги ко времени его прохождения автомобилем. Используют также понятие технической скорости отдельно в грузовом и порожняковом направлениях или в обоих направлениях вместе.

Техническую скорость на каждом участке дороги (забойная, карьерная, траншейная, отвальная) можно определить по динамической характеристике пу-

тём разбивки откаточного пути на отдельные участки и с учётом дорожных условий каждого из них.

Динамический фактор на каждом характерном участке в гружёном и порожнем режиме определяется по следующим зависимостям [109]:

$$D_{\text{гр}} = \frac{(q_{\text{T}} + q_{\text{ф}}) \cdot [w_0 \pm g(i_{\text{св}} + w_{\text{к.св}})]}{q_{\text{T}} + q}, \quad (2.20)$$

$$D_{\text{пор}} = \frac{q_{\text{T}} \cdot [1,25w_0 \pm g(i_{\text{св}} + w_{\text{к.св}})]}{q_{\text{T}} + q},$$

где q_{T} – собственная масса карьерного самосвала (масса тары), т;

$q_{\text{ф}}$ – фактическая загрузка самосвала, т;

w_0 – удельное основное сопротивление движению, определяемое видом и покрытием карьерных автодорог, Н/т (таблица 2.6);

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$i_{\text{св}}$ – средневзвешенный продольный уклон карьерной дороги, ‰;

$w_{\text{к.св}}$ – средневзвешенное сопротивление от кривизны трассы, Н/кН.

Таблица 2.6 – Значения удельного основного сопротивления движению w_0 , коэффициента сцепления ψ и зоны видимости на характерных участках маршрута $L_{\text{в}}$ [109]

Характерный участок	Забойная	Карьерная	Траншейная	Отвальная
w_0 , Н/т	600	350	300	1200
ψ	0,4	0,45	0,5	0,35
$L_{\text{в}}$, м	30	40	50	30

Фактическая загрузка карьерного самосвала по массе $q_{\text{ф}}$ определится по следующей формуле:

$$q_{\text{ф}} = \frac{n_{\text{к}ij} \cdot E_{\text{к}j}^3 \cdot k_{\text{нк}} \cdot \rho_{\text{п}}}{k_{\text{р}}}. \quad (2.21)$$

Продольный уклон участка карьерной дороги определяется как

$$i_{\text{к}} = \frac{H_{\text{в}} - H_{\text{н}}}{l_{\text{к}}} \cdot 1000,$$

где H_B, H_H – пикеты (отметки высшей и низшей точки участка), м;

l_k – протяжённость участка, м.

Тогда средневзвешенный продольный уклон будет равен

$$i_{св} = \frac{\sum i_k \cdot l_k}{\sum l_k}, \quad (2.22)$$

где i_k – уклон k -го участка трассы, ‰;

l_k – длина k -го участка трассы, м.

Сопротивление от кривизны на участке карьерной дороги приближённо определяется по эмпирической зависимости:

$$w_k = \frac{200 - R_k}{200} \cdot 30,$$

где R_k – радиус кривизны, м.

Тогда средневзвешенное сопротивление от кривизны определится как

$$w_{к.св} = \frac{\sum w_{кк} \cdot L_{кк}}{L_{х.у}}, \quad (2.23)$$

где $w_{кк}$ – сопротивление от кривизны на k -м участке трассы, ‰;

$L_{кк}$ – длина k -го криволинейного участка трассы, м;

$L_{х.у}$ – длина характерного участка, м.

Техническая скорость самосвала $v_{тех}$ определяется по динамической характеристике.

При движении по криволинейным участкам карьерной автодороги следует учитывать необходимость снижения скорости до значения, безопасного по условию заноса самосвала. Безопасная скорость движения самосвала $v_{без}$ на каждом характерном участке маршрута определяется следующим образом [109]:

$$v_{без} = \frac{-t_{пп} \pm \sqrt{t_{пп}^2 + \frac{2000(L_B - l_a) \cdot (1 + k_{пр})}{w_0 \pm g \cdot i_{св} + b}}}{1000(1 + k_{пр})} \cdot 3,6(w_0 \pm g \cdot i_{св} + b), \quad (2.24)$$

где $t_{пп}$ – время предтормозного пути, с ($t_{пп} = 0,5$ с [109]);

L_B – зона видимости, м (таблица 2.6);

l_a – длина самосвала, м;

$k_{пр}$ – коэффициент приведения ($k_{пр} = 0,15$ [109]);

b – удельная тормозная сила, Н/т.

Удельная тормозная сила b может быть определена по формуле:

$$b = 1000g \cdot \psi,$$

где ψ – коэффициент сцепления (таблица 2.6).

По технике безопасности на забойной и отвальной дороге максимальная скорость $v_{тб}$ не должна превышать 20 км/ч, на карьерной – 30 км/ч, на траншейной – 40 км/ч [109].

За расчётную скорость движения в данном направлении на рассматриваемом характерном участке трассы принимают наименьшую из трёх скоростей – по тяговой способности, по условию безопасности и по технике безопасности:

$$v_p = \min\{v_{тех}; v_{без}; v_{тб}\}. \quad (2.25)$$

По известным значениям скорости движения v_p на отдельных участках определяется время движения $t_{дв}$ карьерного самосвала в течение рейса:

$$t_{дв} = \sum_{i=1}^z t_{гр_i} + \sum_{i=1}^z t_{пор_i} = \sum_{i=1}^z \frac{l_{гр_i}}{v_{гр_i}} + \sum_{i=1}^z \frac{l_{пор_i}}{v_{пор_i}}, \quad (2.26)$$

где $\sum_{i=1}^z t_{гр_i}$ и $\sum_{i=1}^z t_{пор_i}$ – суммарное время движения карьерного самосвала в грузовом и порожнем направлении соответственно, ч;

z – количество i -х характерных участков маршрута движения самосвала.

Расчёт ведётся последовательно для всех характерных участков пути транспортирования. При укрупнённых расчётах пользуются также приведённой технической (среднетехнической) скоростью [109]:

$$v_{р.пр} = \frac{L_{гр} + L_{пор}}{t_{дв}} = \frac{2v_{гр} \cdot v_{пор}}{v_{гр} + \beta(v_{гр} + v_{пор})}, \quad (2.27)$$

где β – коэффициент использования пробега.

Средняя техническая скорость движения карьерного самосвала зависит не только от конструктивных качеств автомобиля, но и от условий эксплуатации, характеризующихся такими показателями, как уклон дороги, сложность трассы, доля постоянных и временных дорог, качество дорожного покрытия и интенсивность движения.

Значения $v_{p,pp}$ существенно различаются в отдельные периоды года из-за изменения состояния карьерных автодорог. Особенно велика эта разница для переходного (осеннего и весеннего) периода, когда скорость движения снижается на 15-20% [109].

Время, затрачиваемое на установку карьерного самосвала под погрузку и разгрузку (при подъезде с тупиковым разворотом), приведено в таблице 2.7 [6].

Таблица 2.7 – Вспомогательные операции при транспортировании породы и угля автосамосвалами (мин/рейс)

Наименование операции		Категория автосамосвала по грузоподъёмности			
		27-30 т	42-55 т	100-130 т	180-220 т
Установка под погрузку, $t_{y,п}$		0,7	0,8	1	1,1
Установка под разгрузку, $t_{y,р}$	уголь	0,8	0,8	1	1,1
	порода	0,5	0,5	0,6	0,7
Разгрузка, $t_{разгр}$		0,8	0,8	0,9	1
ИТОГО:	уголь	2,3	2,4	2,9	3,2
	порода	2	2,1	2,5	2,8

Время простоя карьерного самосвала в ожидании погрузки t_{ij}^{np} (см. формулу 2.15) является случайной величиной и зависит только от наличия других самосвалов у рассматриваемого экскаватора. При организации технологического процесса по закрытому циклу (то есть с закреплением самосвалов за экскаваторами) время ожидания может быть достаточно велико, поскольку высока вероятность образования очередей. Однако и организация работы по открытому циклу (когда самосвалы направляют к свободным или малозагруженным экскаваторам) не всегда способна решить эту проблему. Причиной этого является несоответствие между вместимостью ковша экскаватора и грузовой вместимостью карьерного самосва-

ла. Отправка самосвала слишком большой грузоподъемности к экскаватору слишком малой мощности значительно увеличит время погрузки, а, следовательно, и продолжительность рабочего цикла самосвала. Видимо, во избежание подобных ситуаций следует определять группу экскаваторов, с которыми должен работать данный самосвал. Однако установить это возможно лишь при проведении исследований для каждой стратегии распределения карьерных самосвалов и выбранного критерия (п. 2.1).

Установление величины простоев карьерных самосвалов в очереди в ожидании погрузки является одной из основных задач данной работы.

В качестве примера определения рациональной структуры смешанных парков ЭАК рассмотрим фактические данные о работе погрузочно-транспортной техники на разрезе «Кедровский». Действующие на данном предприятии парк карьерных экскаваторов и самосвалов, а также их технические характеристики приведены в таблицах 2.1 и 2.2. Расстояния транспортирования принимаются по схеме карьерных автомобильных дорог для разреза «Кедровский» и приведены в таблице 2.8.

Рассмотрим пару «экскаватор Р&Н-2800 – самосвал БелАЗ-75306». Из таблиц 2.1 и 2.2 имеем $t_{ц1}^э = 32$ с; $V_{к1}^с = 129,8$ м³; $E_{к1}^э = 33$ м³. Тогда количество загружаемых в самосвал ковшей составит $n_{к11}^V = 6,11 \approx 6$; $n_{к11}^q = 5,57 \approx 6$; $n_{к11} = 6$. Значения $k_{нк} = 0,74$ и $k_y = 0,87$ взяты из таблицы 2.5. Время загрузки самосвала БелАЗ-75306 экскаватором Р&Н-2800 составляет $t_{п11}^э = 192$ с $\approx 3,2$ мин, а фактическое количество горной массы в кузове самосвала составит $q_{ф} \approx 236,9$ т.

По приведённой выше методике определяем скорости движения самосвала БелАЗ-75306 на характерных участках трассы. Длина трассы и её характерных участков: забойных, карьерных (включая постоянные), траншейных (по поверхности) и отвальных (включая подъём на отвал) для каждого оптимального маршрута транспортирования (таблица 2.8) устанавливались по актуальному плану горных работ разреза «Кедровский». Расположение экскаваторов также определялось по плану горных работ. Средневзвешенные уклоны $i_{св}$ характерных участков

Таблица 2.8 – Исходные данные и расчётные составляющие для определения скоростей движения карьерных самосвалов

Участок разреза	Маршрут	Протяжённость дороги, км					Радиус кривизны дороги R_k , м				Средневзвешенное сопротивление от кривизны $W_{к.св.}$, Н/т	Средневзвешенный уклон дороги $i_{св}$, ‰			
		общая	забойная	карьерная (включая постоянную)	траншейная (по поверхности)	отвальная (включая подъём на отвал)	забойная	карьерная	траншейная	отвальная		забойная	карьерная	траншейная	отвальная
№1	№49 – Северный 1	3,06	0,15	0,91	0,55	1,45	100	200	200	200	0,74	25	48	48	28
	№28195 – Северный 1	3,02	0,41	0,61	0,55	1,45	150	200	200	200	1,02	64	40	48	28
№3	№42 – Центральный 3	2,28	0,36	1,32	–	0,6	200	200	200	75	4,93	18	64	–	58
	№12 – Центральный 3	3,07	0,38	0,75	1,06	0,88	175	100	150	75	12,09	57	79	41	47
	№152 – Центральный 3	3,95	0,78	0,75	$\frac{0,46}{1,06}$	0,9	200	200	$\frac{200}{150}$	75	6,28	-5	59	$\frac{-61}{41}$	46
	№9 – Центральный 3	4,2	0,68	1,15	$\frac{0,46}{1,06}$	0,85	50	200	$\frac{200}{150}$	75	9,33	38	56	$\frac{-61}{41}$	49

Примечание: в числителе – параметры отрезка участка «на спуск», в знаменателе – «на подъём».

трасс определялись по формуле (2.23). Радиусы кривизны R_k характерных участков трасс определялись путём непосредственных замеров на каждом из участков разреза «Кедровский».

Средневзвешенное сопротивление от кривизны трассы $w_{к.св}$ определяется по формуле (2.24). Исходные данные и результаты расчётов сведены в таблицу 2.8.

Пары «P&H-2800 – БелАЗ-75306» работают на участках №1 и №3 разреза. Для каждого из этих участков определялось сопротивление от кривизны для каждого характерного участка трассы и средневзвешенное сопротивление, а также динамический фактор для каждого характерного участка трассы при движении в гружёном и порожнем направлениях. По динамической характеристике самосвала БелАЗ-75306 устанавливались скорости его движения $v_{тех}$, соответствующие полученным значениям динамического фактора.

Затем по формуле (2.25) определялись скорости по условию безопасности движения $v_{без}$ и по технике безопасности $v_{тб}$ для каждого характерного участка дороги каждого участка (№1 и №3). В соответствии с рекомендациями (2.26) выбиралась расчётная скорость движения карьерного самосвала, как наименьшая из скоростей $v_{тех}$, $v_{без}$ и $v_{тб}$. Результаты расчёта приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Скорости движения самосвалов БелАЗ-75306 на характерных участках маршрута «P&H-2800 №28195 – Северный отвал»

Характерные участки трассы	Режим движения	i , %	w_0 , Н/т	$w_{к.св}$, Н/т	D	$v_{тех}$, км/ч	$v_{без}$, км/ч	$v_{тб}$, км/ч	v_p , км/ч
забойные	гружёный	64	600	1,02	1295	6	32	20	6
	порожний	-64	600	1,02	554	15	36	20	15
карьерные (включая постоянные)	гружёный	40	350	1,02	777	11	44	30	11
	порожний	-40	350	1,02	331	28	48	30	28
траншейные (по поверхности)	гружёный	48	300	1,02	806	10	55	40	10
	порожний	-48	300	1,02	337	27	60	40	27
отвальные (в том числе подъём на отвал)	гружёный	28	775	1,02	1098	8	32	20	8
	порожний	-28	775	1,02	496	17	34	20	17

По полученным скоростям движения самосвала БелАЗ-75306 определяется суммарное время его движения. Имея из таблицы 2.5 время установки самосвала под погрузку $t_{y.п} = 1,1$ мин и разгрузку $t_{y.р} = 0,7$ мин, время разгрузки $t_{разгр} = 1$

мин, а также нормативное время простоя самосвала в ожидании погрузки $t^{np} = 1$ мин [6], получим следующее значение времени цикла самосвала БелАЗ-75306 при работе его с экскаватором Р&Н-2800 №28195: $t_{ци}^c = 36,9$ мин.

Расчёты для всех остальных пар «экскаватор-самосвал» проводятся аналогично. Результаты расчётов сведены в таблицу 2.10.

По данным таблицы 2.10 определяем составляющие формулы (2.15) для определения СФ. Расчёты производим по ГД №1 и №2, установленным в п. 2.2 (работающим на участке №3).

Участок №3 (ГД №1 и №2). Работают экскаваторы ЭКГ-15 №42 и ЭКГ-12ус №12 с 6 самосвалами БелАЗ-75306; Р&Н-2800 №152 и ЭКГ-12ус №9 с 10 самосвалами БелАЗ-75306. Результаты расчёта приведены в таблице 2.11.

Поскольку сравнительный фактор F есть отношение интенсивности поступления самосвалов к интенсивности обслуживания их экскаваторами, по полученным результатам делаем вывод, что на участке №3 интенсивность поступления самосвалов относительно низка, то есть либо их количество в ЭАК является недостаточным, либо избыточными являются количество и мощность экскаваторов. Так или иначе, в данном случае велика вероятность простоев экскаваторов.

Полученные результаты весьма приблизительны, поскольку в расчётах принимались нормированные значения простоев карьерных самосвалов в ожидании погрузки. В работе [6] время простоя в ожидании погрузки рекомендуется принимать равным 1,6 мин для самосвалов грузоподъёмностью до 55 т; для самосвалов грузоподъёмностью 90-130 т – 0,8 мин, для самосвалов грузоподъёмностью 200-360 т – 1 мин, что почти никогда не соответствует действительности.

Одна из основных задач настоящего исследования заключается в сокращении этих простоев до минимума. Поэтому имеет смысл просчитать СФ для условий, когда простои карьерных самосвалов в ожидании погрузки не учитываются совсем. Это будет отражать то идеальное сочетание условий, к которому нужно стремиться. Результаты определения сравнительного фактора F при отсутствии простоев самосвалов в ожидании погрузки приведены в таблице 2.12. Время цикла самосвалов при отсутствии простоев в ожидании погрузки приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты расчёта времени цикла карьерных самосвалов в составе ЭАК разреза «Кедровский»

Показатель		Пары «экскаватор-самосвал»					
		Участок №1		Участок №3			
		№49 – БелАЗ- 75306	№28195 – БелАЗ- 75306	№42 – БелАЗ- 75306	№12 – БелАЗ- 75306	№152 – БелАЗ- 75306	№9 – БелАЗ- 75306
Время цикла экскаватора, $t_{цj}^э$, с		30	32	30	28	32	28
Количество загружаемых ковшей:							
– по вместимости		14	6	14	16	6	16
– по грузоподъёмности		12	6	12	15	6	15
– принятое		12	6	12	15	6	15
Фактическая загрузка самосвала, т		215,3	236,9	215,3	224,3	236,9	224,3
Время загрузки самосвала экскаватором, $t_{пij}^э$, мин:		6	3,2	6	7	3,2	7
Скорости движения самосвала, км/ч	гружёного по забойной дороге	10	6	11	6	15	8
	гружёного вверх по карьерной дороге	11	11	9	7	9	9
	гружёного по поверхности	12	10	–	10	25,5	25,5
	гружёного по отвальной дороге	8	8	6	6	6	6
	порожного по отвальной дороге	17	17	13	14	15	14
	порожного по поверхности	27	27	–	26	25	24,5
	порожного вниз по карьерной дороге	26	28	20	16	20	22
	порожного по забойной дороге	20	15	20	15	20	17
Время движения самосвала, $t_{дvi}$, мин		28,4	30,9	24,6	35,9	35,3	40,6
Время цикла самосвала (с учётом простоев), $t_{ци}^c$, мин		38,2	37,9	34,4	46,7	42,3	51,4
Время цикла самосвала (без учёта простоев), $t_{ци}^c$, мин		37,2	36,9	33,4	45,7	41,3	50,4

Таблица 2.11 – Результаты расчёта сравнительного фактора F для ГД №1 и №2

Показатели	Пары «экскаватор-самосвал»			
	ГД №1		ГД №2	
	ЭКГ-15 №42 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №12 – БелАЗ-75306	Р&Н-2800 №152 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №9 – БелАЗ-75306
Время загрузки самосвала экскаватором, $t_{пj}^э$, мин	6	7	3,2	7
Время движения самосвала, $t_{двi}$, мин	24,6	35,9	35,3	40,6
Время цикла самосвала с учётом нормативных простоев, $t_{ци}^c$, мин	34,4	46,7	42,3	51,4
Усреднённое время цикла самосвала, $\bar{t}_{ци}^c$, мин	40,55		46,85	
НОК времени погрузки, Z_{t_n} , мин ²	42,0		112	
$\sum_j \left[\frac{N_{эj} \cdot Z_{t_n}}{t_{пj}^э} \right]$	13,0		51,0	
Сравнительный фактор F	0,48		0,47	

Таблица 2.12 – Результаты расчёта сравнительного фактора F при отсутствии простоев самосвалов в ожидании погрузки

Показатели	Пары «экскаватор-самосвал»			
	ГД №1		ГД №2	
	ЭКГ-15 №42 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №12 – БелАЗ-75306	Р&Н-2800 №152 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №9 – БелАЗ-75306
Время загрузки самосвала экскаватором, $t_{пj}^э$, мин	6	7	3,2	7
Время движения самосвала, $t_{двi}$, мин	24,6	35,9	35,3	40,6
Время цикла самосвала без учёта нормативных простоев, $t_{ци}^c$, мин	33,4	45,7	41,3	50,4
Усреднённое время цикла самосвала, $\bar{t}_{ци}^c$, мин	39,55		45,85	
НОК времени погрузки, Z_{t_n} , мин ²	42,0		112	
$\sum_j \left[\frac{N_{эj} \cdot Z_{t_n}}{t_{пj}^э} \right]$	13,0		51,0	
Сравнительный фактор F	0,49		0,48	

Ситуация изменяется незначительно, поскольку при недостаточном количестве самосвалов в системе вероятность их простоев в ожидании погрузки достаточно мала. При таких условиях полученные парки карьерных экскаваторов и самосвалов не сбалансированы по производительности; самосвалов намного меньше, чем должно быть.

В настоящее время всё большую популярность приобретает метод определения скорости самосвалов по тяговой характеристике (отчасти это вызвано тем, что заводы-производители карьерных самосвалов не предоставляют динамические характеристики). В рамках данной работы рассмотреть этот метод не представляется возможным, но сути дела это не меняет. Все приведённые выше аналитические выкладки дают искажённое отражение действительности, поскольку не учитывают случайных факторов погрузочно-транспортного процесса ОГР. Поэтому необходимо моделирование процессов функционирования ЭАК, которое позволит лучше осознать механизм влияния всех факторов на эффективность работы различных типов горнотранспортного оборудования, и в результате определить действительно рациональные парки погрузочно-транспортной техники для конкретных условий.

Для этого ЭАК карьеров (разрезов) необходимо представить как автотранспортные системы массового обслуживания (АТСМО).

ВЫВОДЫ

1. Определение целевых объёмов погрузки и вывоза горной массы на верхнем уровне двухуровневой диспетчерской модели ЭАК разреза предлагается осуществлять путём решения транспортной задачи. Во избежание транспортных заторов в карьере горную массу целесообразно вывозить на разные отвалы при условии, что суммарный итоговый пробег карьерных самосвалов должен быть минимальным.

2. Работу ЭАК разреза на нижнем уровне диспетчерской модели предпочтительнее организовывать по комбинированному (открыто-закрытому) циклу с ис-

пользованием рациональных «групп диспетчеризации», которые можно формировать исходя из соответствия типоразмеров имеющихся в наличии карьерных самосвалов и экскаваторов.

3. Эффективность функционирования ЭАК разреза или его отдельных групп удобно оценивать аналитически по сравнительному фактору (СФ) F , который представляет собой отношение производительности парка наличных экскаваторов к производительности парка наличных карьерных самосвалов. В идеальном случае $F = 1$, а простои, как самосвалов, так и экскаваторов отсутствуют.

4. Величины простоев карьерных самосвалов и экскаваторов в ожидании погрузки имеют вероятностный характер, поэтому точное аналитическое определение их не представляется возможным. Необходимо моделирование погрузочно-транспортных процессов ЭАК как автотранспортных систем массового обслуживания.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА

3.1 Анализ существующих моделей описания функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов

3.1.1 Марковская модель погрузочно-транспортной системы карьера

Для точного определения продолжительности рабочего цикла карьерного самосвала необходимо как можно точнее определить составляющие этого цикла – время погрузки (включая установку под погрузку), время гружёного и порожнего пробегов, а также время разгрузки (включая установку под разгрузку).

Вследствие стохастической природы погрузочно-транспортного процесса ОГР (возможны отказы пунктов погрузки по техническим и технологическим причинам, вариации элементов погрузочно-транспортного цикла и т.д.) предположения о непрерывной работе экскаваторов и ритмичной подаче карьерных самосвалов в погрузочные пункты зачастую не соответствуют реальным условиям. Самосвалы (даже при чёткой организации работы) прибывают к экскаваторам нерегулярно, а экскаваторам для загрузки каждого самосвала требуются неодинаковые промежутки времени. Эти несоответствия могут привести как к простоям карьерных самосвалов в ожидании обслуживания (загрузки), так и к простоям экскаваторов из-за отсутствия самосвалов, готовых к обслуживанию.

Поскольку использование детерминированного метода в задачах проектирования и прогнозирования процессов, имеющих явно выраженный стохастический характер, не приводит к принятию оптимальных решений, можно практиковать расчёт временных параметров погрузочно-транспортного цикла, основанный на применении теории массового обслуживания. При организации работы горно-транспортной техники по закрытому циклу рассматривается совокупность независимых подсистем обслуживания карьерных самосвалов экскаваторами, а при организации работы по открытому циклу учитывается взаимозависимость работы указанных подсистем.

При этом ЭАК карьера рассматривается как замкнутая система массового обслуживания экскаваторами самосвалов. Наиболее простая и распространённая математическая модель такой системы, позволяющая получить аналитическое решение, – марковские случайные процессы; примеры использования марковских моделей для исследования карьерных ЭАК можно найти, например, в работах [110, 111].

Рассмотрим простейший пример. В погрузочно-транспортной системе карьера действуют 2 экскаватора, 1 отвал и 2 самосвала. Первый экскаватор всегда исправен, второй может отказывать с некоторой периодичностью. К первому экскаватору может быть направлено 2 самосвала, ко второму – 1. Схема марковской цепи такой системы представлена на рисунке 3.1.

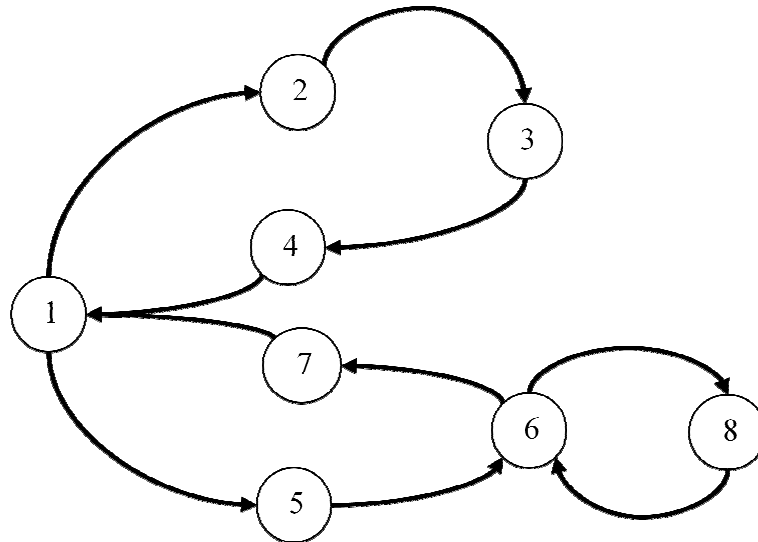


Рисунок 3.1 – Марковская цепь погрузочно-транспортной системы карьера

В данной марковской цепи имеется 8 узлов: 1 – разгрузка на отвале, 2 – порожний пробег до первого экскаватора, 3 – погрузка у первого экскаватора, 4 – гружёный пробег от первого экскаватора, 5 – порожний пробег ко второму экскаватору, 6 – погрузка у второго экскаватора, 7 – гружёный пробег от второго экскаватора, 8 – отказ второго экскаватора. Стрелками показаны возможные переходы из одного состояния (узла) в другое.

В циклической модели количество возможных состояний для карьерных самосвалов и фаз обслуживания (узлов) находится как:

$$S = \frac{(N_c + k_\phi - 1)!}{(k_\phi - 1)! \cdot N_c!}, \quad (3.1)$$

следовательно, в данной системе возможно 36 состояний. Если все временные параметры погрузочно-транспортного цикла описываются экспоненциальным распределением вероятностей (а для марковских моделей это непрямое условие), то интенсивность перехода из i -го состояния в j -е будет определяться следующим образом:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{T_i^0}, \quad (3.2)$$

где T_i^0 – время обслуживания в i -м узле, с.

Например, состояние 1 (разгрузка) переходит в состояние 2 (порожний пробег) с интенсивностью, равной обратному значению времени разгрузки на отвале (рисунок 3.1). Время обслуживания в узлах погрузочно-транспортной системы карьера представляет собой составляющие рабочего цикла карьерного самосвала, и для условий разреза «Кедровский» приведено в таблицах 2.10 – 2.12.

Основной характеристикой марковских процессов с непрерывным временем являются финальные вероятности p возможных состояний системы (рисунок 3.1). Для нахождения этих характеристик можно построить систему уравнений Колмогорова следующего вида [56]:

$$(\mu_{ij} + \mu_{ik} + \dots + \mu_{in}) \cdot p_i = \mu_{ji} \cdot p_j + \mu_{ki} \cdot p_k + \dots + \mu_{ni} \cdot p_n. \quad (3.3)$$

В левой части уравнения (3.3) стоит предельная вероятность данного состояния p_i , умноженная на суммарную интенсивность всех потоков, выходящих из данного состояния; в правой – сумма произведений интенсивностей всех потоков, входящих в i -е состояние, на вероятность тех состояний, из которых эти потоки исходят.

Количество уравнений в системе обычно равняется количеству возможных состояний (для системы, приведенной на рисунке 3.1, их 36). Система решается по методу Гаусса, с условием равенства суммы всех вероятностей единице [56].

К примеру, найдя сумму вероятностей тех состояний, в которых у первого экскаватора нет ни одного самосвала, можно найти вероятность простоя первого экскаватора (при заданных значениях времени обслуживания в узлах); если вычесть вероятность простоя из единицы, можно найти вероятность работы данного экскаватора.

Можно также определить возможное количество рейсов, выполняемых самосвалами при работе с данным экскаватором в течение смены – по следующей формуле:

$$N_{pk} = \frac{3600 \cdot T_{см} \cdot P_j^p}{t_{пij}^э + t_{у.пi}}, \quad (3.4)$$

где $T_{см}$ – продолжительность рабочей смены, ч;

P_j^p – вероятность работы j -го экскаватора;

$t_{пij}^э$ – продолжительность одной полной загрузки карьерного самосвала i -го типоразмера экскаватором j -го типоразмера, с (см. зависимости (2.15) – (2.19));

$t_{у.пi}$ – время маневрирования и установки под погрузку самосвала i -го типоразмера, с (таблица 2.7).

По количеству рейсов можно проверить адекватность данной модели. Проверка модели применительно к группе диспетчеризации №1 (п. 2.2) показывает, что марковский метод даёт излишне оптимистичные результаты. Количество выполняемых за смену рейсов на маршруте «ЭКГ-12ус №12 – Центральный отвал», согласно марковской модели, составило 23,07 (для 10-часовой смены), в то время как в реальности оно в среднем равно 19 (за маршрутом закреплено 4 самосвала БелАЗ-75306). Завышение производительности составит примерно 21,4%, или около 900 т погруженной и вывезенной горной массы. Таким образом, адекватность марковской модели работы ЭАК недостаточна.

При детерминированных расчётах рабочих циклов (п. 2.4) производительность, напротив, занижается. При расчётной продолжительности рейса в 45,7 мин (без учёта простоев) среднее количество рейсов за 10-часовую смену составит

13,1 против 19 в реальности. Производительность в данном случае занижается на 31%, что соответствует 1300 т горной массы. Следовательно, применение и детерминированных методов не даёт адекватных результатов.

3.1.2 Экскаваторно-автомобильные комплексы разрезов как автотранспортные системы массового обслуживания

В рассмотренной марковской модели работы ЭАК нереалистичными являются допущения о полной готовности первого экскаватора к погрузке и экспоненциальных распределениях элементов транспортного цикла. Применение традиционных марковских моделей без учёта отказов пунктов погрузки приводит к завышению производительности оборудования до 30% [109]. Впоследствии это подтвердилось и нашими исследованиями (см. п. 3.3.3): производительность ЭАК как марковской модели оказалась выше, чем имитационной модели, при одинаковых условиях.

Неадекватность детерминированных и марковских моделей устраняется использованием метода статистических испытаний и имитационного моделирования (ИМ) на компьютерах. ИМ базируется на теории вероятностей, математической статистике, теории запасов, резервирования и др., и представляется в терминах теории массового обслуживания.

ЭАК разреза можно представить в качестве обслуживающей системы, в которой некоторый поток требований на обслуживание (поток карьерных самосвалов, которые необходимо загружать) перерабатывается техническим обслуживающим устройством (экскаватором) при определённых структурных и временных ограничениях. Поскольку самосвалы циркулируют между обслуживающими объектами (экскаваторами, отвалами), составляющими сеть обслуживающих объектов в единой системе, ЭАК относится к *АТСМО замкнутого типа*. Протекающие при функционировании ЭАК процессы имитационная модель рассматривает в динамике и взаимосвязи как вероятностные. Все исходные закономерности и взаимосвязи, закладываемые в модель, устанавливаются на основе статистической

обработки информации об исследуемом объекте, отражающей полный набор всех его элементов.

Важнейшими составляющими обслуживающих систем ЭАК являются:

- *входящий поток* требований на обслуживание (поток карьерных самосвалов, поступающих к экскаваторам для загрузки);
- *обслуживающие устройства* (экскаваторы, обеспечивающие загрузку самосвалов);
- *очереди требований*, ожидающих обслуживания (очереди самосвалов, ожидающих загрузки у экскаваторов). При определённых условиях такая очередь может быть нулевой.

Входящий поток (ВП) карьерных самосвалов, идущих под погрузку, характеризуется интенсивностью (λ_c), нагрузкой на одно требование (q_c – количество m^3 (т) горной массы, которое необходимо погрузить), а также закономерностями изменения ВП по времени и по величине. Изменения ВП по времени характеризуются конфигурацией. Изменение интенсивности ВП карьерных самосвалов характерно для АТСМО с циклическим режимом работы. Для непрерывного режима работы, когда технологический процесс при переходе от одной рабочей смены к другой не прерывается (что характерно для ЭАК разрезов), ВП карьерных самосвалов можно считать стационарным.

Обслуживающие устройства (экскаваторы) характеризуются структурой (если парк экскаваторов смешанный, то есть включающий в себя экскаваторы различных типоразмеров), интенсивностью обслуживания карьерных самосвалов ($\lambda_э$) и надёжностью (интенсивностью и закономерностью выхода их из строя и восстановления работоспособности).

Очереди характеризуются величиной (как правило, переменной) и средним временем простоя заявки в ожидании обслуживания за определённый период времени ($t_{cp}^{пр}$).

Ещё одним важнейшим понятием АТСМО является их *пропускная способность*. Пропускная способность ЭАК оценивается коэффициентом занятости об-

служивающих устройств по времени (в работах [25, 26] он назван сравнительным фактором (СФ) F). Коэффициент занятости (СФ) определяется как соотношение интенсивностей поступления карьерных самосвалов под погрузку (λ_c) и обслуживания их экскаваторами ($\lambda_э$), то есть

$$F = \frac{\lambda_c}{\lambda_э}. \quad (3.5)$$

В общем случае, когда рассматриваются ЭАК, состоящие из смешанных парков карьерных экскаваторов и самосвалов (машин разных типоразмеров), в работах [25, 26, 107] предлагается следующая зависимость:

$$F = \frac{N_c}{\sum_j \left(\frac{N_{эj}}{t_{пj}} \right) \cdot \sum_i (t_{ци}^c \cdot N_{ci})}, \quad (3.6)$$

где N_c – общее количество самосвалов в составе ЭАК;

N_{ci} – количество самосвалов i -го типоразмера;

$N_{эj}$ – количество экскаваторов j -го типоразмера;

$t_{ци}^c$ – время рабочего цикла карьерного самосвала i -го типоразмера, с;

$t_{пj}$ – время окончания последней погрузки для каждого j -го типоразмера экскаваторов, с.

Время $t_{пj}$ представляет собой время, необходимое каждому экскаватору для обслуживания имеющегося парка карьерных самосвалов, и определяется как:

$$t_{пj} = \sum_i (t_{пij}^э \cdot N_{ci}), \quad (3.7)$$

где $t_{пij}^э$ – время полной загрузки самосвала i -го типоразмера экскаватором j -го типоразмера, с.

Для ЭАК, в которых интенсивность обслуживания $\lambda_э$ превышает интенсивность ВП самосвалов λ_c , значение $F < 1$, и причиной возникновения очередей может быть неравномерность входящего потока. В случае, когда $F > 1$, очереди есть всегда, и теоретически при $t \rightarrow \infty$ (где t – время функционирования системы) она монотонно увеличивается до ∞ .

В реальных ЭАК чем больше значение F , тем больше очередь самосвалов в ожидании обслуживания; чем меньше – тем больше простои экскаваторов в ожидании работы. Для таких систем характерно существование зависимости суммарных простоев погрузочно-транспортной техники в очередях от показателя F :

$$t_{\text{пр}} = f(F). \quad (3.8)$$

Существующие модели функционирования ЭАК приемлемых решений этой задачи дать не могут. Зависимость (3.8) в неявной форме присутствует в предлагаемом варианте ИМ в виде численных оценок простоев.

3.2 Алгоритмическое обеспечение распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки

При формулировании алгоритма (модели) были рассмотрены и учтены следующие требования (условия):

- модельный процесс должен максимально точно описывать реальные процессы, протекающие в ЭАК;
- чтобы максимизировать производительность, необходимо как можно строже придерживаться маршрутов с наименьшим временем пробега самосвалов, которые определяются оптимальным решением программно-целевой модели (п. 2.2);
- использование карьерных самосвалов и экскаваторов максимизируется путём минимизации их суммарных простоев;
- алгоритм должен обеспечивать возможность быстрого реагирования на непредвиденные изменения (отказы самосвалов и экскаваторов).

В соответствии с этими условиями алгоритм включает в себя: использование для оптимизации распределения карьерных самосвалов имитационной модели, обоснование и выбор критериев распределения самосвалов, а также оценку эффективности диспетчерской модели на верхнем и нижнем уровне двухуровневой системы ЭАК.

Критерий распределения карьерных самосвалов. В ЭАК при работе по любому циклу распределения (открытому, закрытому, комбинированному) имеется N_3 экскаваторов, которые обслуживают N_c карьерных самосвалов. Из этих N_c самосвалов часть находится под погрузкой, другие совершают гружёный пробег, третьи совершают порожний пробег или уже разгружаются, четвёртые разгрузились и готовы к отправке к одному из экскаваторов, пятые находятся на пересечении и также готовы к отправке. Следовательно, необходимо различать пять фаз обслуживания в ЭАК.

Ещё одну, шестую, фазу составляет диспетчеризация (распределение) карьерных самосвалов. Выбор того, к какому из экскаваторов следует направить каждый освободившийся (четвёртая или пятая фаза) самосвал, и будет составлять основную задачу распределения.

Основным показателем эффективности диспетчеризации на *верхнем уровне* является выполнение всеми экскаваторами плана погрузки и вывоза горной массы, соответствующего оптимальному решению ПЦМ (см. п. 2.2). Оценка эффективности управления на верхнем уровне может быть, например, такой, как предлагается в работе [61].

«Нуждающиеся» экскаваторы появляются потому, что разные маршруты транспортирования от разных экскаваторов могут иметь разные потребности, соответствующие показателям выработки (погрузки и перевозок), полученным в результате решения ПЦМ на верхнем уровне. То есть «нуждающиеся» экскаваторы – это все экскаваторы, связанные с маршрутами, на которых текущая накопленная выработка ниже плановой. У остальных экскаваторов, следовательно, все маршруты имеют накопленную выработку больше или равную целевой.

Если считать, что Q_{jk} – количество горной массы, подлежащей перевозке за смену от экскаватора j к отвалу k (согласно оптимальному решению ПЦМ), и если q_{jk} – текущая накопленная выработка на маршруте от экскаватора j к отвалу k , то коэффициент накопленной выработки будет равен:

$$r_{jk} = \frac{q_{jk}}{Q_{jk}}. \quad (3.9)$$

По ходу смены коэффициент r_{jk} будет расти и достигнет единицы, однако этот рост на разных маршрутах будет неравномерным. Для того чтобы поддерживать на должном уровне производительность всех маршрутов, желательно, чтобы все значения коэффициента r_{jk} были одинаковыми.

Осуществить это на практике сложно, поскольку процесс перемещения карьерных самосвалов в реальных условиях носит стохастический характер, в результате чего текущие значения r_{jk} на разных маршрутах будут разными.

Вводится целевой коэффициент r , который является общим для всех маршрутов:

$$r = \frac{1}{N_э \cdot n_k} \sum_{j=1}^{N_э} \sum_{k=1}^{n_k} r_{jk}, \quad (3.10)$$

где $N_э$ – общее количество пунктов погрузки (экскаваторов);

n_k – количество пунктов разгрузки (отвалов).

Разность между текущим значением коэффициента r_{jk} для каждого маршрута и целевым значением r , общим для всех маршрутов, составит отклонение

$$\Delta r_{jk} = r_{jk} - r \quad (3.11)$$

для каждого экскаватора.

Каждый экскаватор, для которого $\Delta r_{jk} < 0$, используется неэффективно и недовыполняет план. Соответственно, при $\Delta r_{jk} \geq 0$, экскаватор план перевыполняет, что также нежелательно, поскольку другие экскаваторы в данной группе, скорее всего, будут использоваться недостаточно эффективно. В случае недовыполнения или перевыполнения плана в критерий оптимизации можно ввести штрафную функцию.

Критерий распределения карьерных самосвалов на *нижнем уровне* диспетчерской модели может быть представлен следующим образом.

Все карьерные самосвалы, находящиеся на отвале, считаются подлежащими распределению. Решение задачи по распределению осуществляется, когда нерас-

пределённый самосвал заканчивает разгрузку. Для распределения выбирается самосвал, требующий немедленного распределения.

Если известна текущая ситуация в карьере и выбраны самосвалы для распределения, применяется следующий критерий: во-первых, должна быть учтена приоритетность различных экскаваторов (маршрутов), и, во-вторых, минимизированы суммарные простои карьерных экскаваторов и самосвалов с учётом их весо-мостей.

Для каждого i -го карьерного самосвала, находящегося у k -го отвала, общее время простоя, связанное с направлением этого самосвала к j -му экскаватору, может быть определено как:

$$t_{ij}^{\text{пп}} = \overline{t_{\text{п}j}} (N_{c_j}^o + N_{c_j}^{\text{п}}) - t_{\text{пор}kj}, \quad (3.12)$$

где $\overline{t_{\text{п}j}}$ – средняя продолжительность загрузки j -м экскаватором, с;

$N_{c_j}^o$ – количество самосвалов, находящихся у j -го экскаватора (под погрузкой и в очереди);

$N_{c_j}^{\text{п}}$ – количество самосвалов, находящихся на пути к j -му экскаватору;

$t_{\text{пор}kj}$ – ожидаемое время пробега самосвала от k -го отвала до j -го экскаватора, с.

Зависимость (3.12) означает, что простои появляются, когда суммарное время загрузки всех карьерных самосвалов, уже направленных к j -му экскаватору, больше, чем время порожнего пробега i -го самосвала, то есть самосвал доберётся до искомого экскаватора раньше, чем тот освободится.

При определении $t_{ij}^{\text{пп}}$ используется средняя продолжительность загрузки самосвала j -м экскаватором потому, что к j -му экскаватору могут быть направлены карьерные самосвалы разных типоразмеров. Если же в группу диспетчеризации (п. 2.3) попадают самосвалы одного типоразмера, то среднее время погрузки $\overline{t_{\text{п}j}}$ заменяется на индивидуальное $t_{\text{п}ij}$.

Если диспетчерская система разреза позволяет в реальном времени определить местонахождение любого карьерного самосвала, тогда от среднего времени

загрузки можно отказаться и использовать индивидуальные продолжительности загрузки, то есть

$$T_{\text{осв}j}^{\text{э}} = \overline{t_{\text{п}j}} \left(N_{\text{с}j}^{\text{о}} + N_{\text{с}j}^{\text{п}} \right) = \sum_i \left(t_{\text{п}ij} \cdot N_{\text{с}ij}^{\text{о+п}} \right), \quad (3.13)$$

где $t_{\text{п}ij}$ – продолжительность загрузки j -м экскаватором каждого самосвала i -го типоразмера, с;

$N_{\text{с}ij}^{\text{о+п}}$ – количество самосвалов, находящихся у j -го экскаватора (под погрузкой и в очереди), а также на пути к j -му экскаватору.

Средняя продолжительность порожнего пробега карьерного самосвала от отвала до j -го экскаватора определяется в основном скоростями движения, ограниченными лишь условиями безопасности, а не возможностями самосвала, как при гружёном пробеге. К примеру, максимальные скорости движения (паспортные) самосвалов БелАЗ-75131 и БелАЗ-75306 практически одинаковы. Поэтому среднее время пробега $\overline{t_{\text{пор}kj}}$ в данном случае практически совпадёт с индивидуальным временем пробега $t_{\text{пор}ikj}$ карьерного самосвала любого i -го типоразмера.

Критерий принятия решений по распределению должен учитывать возможный простой и карьерного самосвала, и экскаватора, причём учитываться будут лишь те простои, которые, как ожидается, возникнут в результате данной планируемой отправки. Простои, возникшие как результат принятия прошлых диспетчерских решений, учитываться не будут.

Для сокращения суммарных простоев карьерных самосвалов ожидаемый простой рассматриваемого самосвала при принятии диспетчерского решения должен стремиться к минимуму, то есть необходимо найти экскаватор, по прибытии к которому самосвал будет загружен через наименьший промежуток времени. Это позволит сократить очереди карьерных самосвалов в ожидании погрузки, а также уменьшить вероятность возникновения простоев экскаваторов.

Поэтому критерий «минимума простоев самосвалов» будет выглядеть следующим образом:

$$J = \arg \min_j \frac{T_{\text{пр}j}^c + \delta}{x_j}, \quad (3.14)$$

или, если подробнее –

$$J = \arg \min_j \frac{(T_{\text{осв}j}^a - t_{\text{н.см}} - T_{\text{дв}j}^c)_+ + \delta}{x_j},$$

где J – номер экскаватора, к которому нужно будет отправить карьерный самосвал;

$T_{\text{пр}j}^c$ – ожидаемый простой самосвала при его отправке к j -му экскаватору в составе группы диспетчеризации, ч;

$T_{\text{осв}j}^a$ – ожидаемое время «освобождения» (окончания последней загрузки) j -го экскаватора, включая самосвалы, уже стоящие в очереди возле него, а также находящиеся на пути к нему, ч (определяется зависимостью (3.13));

$t_{\text{н.см}}$ – текущее время, прошедшее с начала смены, ч;

$T_{\text{дв}j}^c$ – ожидаемое время движения распределяемого самосвала до j -го экскаватора, ч;

x_j – параметр приоритетности j -го экскаватора и соответствующего ему маршрута транспортирования;

δ – произвольное малое число, позволяющее в случае отсутствия простоев при возможности отправки самосвала на несколько направлений выбрать наиболее приоритетное.

Для сокращения суммарных простоев экскаваторов ожидаемый простой рассматриваемого экскаватора при принятии диспетчерского решения должен стремиться к максимуму, то есть необходимо найти экскаватор, который до прибытия к нему рассматриваемого карьерного самосвала будет простаивать в течение наибольшего промежутка времени. Это даст гарантию того, что экскаваторы, по каким-либо причинам попавшие в простой, будут оперативно обеспечены работой; это позволит снизить их суммарные сменные простои.

Критерий «минимума простоев экскаваторов» будет выглядеть так:

$$J = \arg \max_j \frac{(t_{н.см} + T_{двj}^c - T_{освj}^э)_+ + \delta}{x_j}. \quad (3.15)$$

Чтобы объединить эти два критерия, необходимо ввести некоторые весовые показатели для простоев карьерных самосвалов и экскаваторов. В качестве таких показателей можно использовать стоимости единицы времени простоя. Тогда комплексный критерий будет выглядеть следующим образом:

$$J = \arg \min_j \frac{C_c \cdot (T_{освj}^э - t_{н.см} - T_{двj}^c)_+ - C_{эj} \cdot (t_{н.см} + T_{двj}^c - T_{освj}^э)_+ + \delta}{x_j}$$

или

$$J = \arg \min_j \frac{(C_c + C_{эj}) \cdot (T_{освj}^э - t_{н.см} - T_{двj}^c)_+ + \delta}{x_j}, \quad (3.16)$$

где C_c – стоимость простоя применяемого в данной группе типа самосвалов, руб./ч;

$C_{эj}$ – стоимость простоя j -го типа экскаваторов, руб./ч.

Количество экскаваторов в группе диспетчеризации определяется в зависимости от цикла работы ЭАК. При закрытом цикле каждый экскаватор составляет отдельную группу диспетчеризации, и тогда распределение теряет смысл. При открытом цикле группа диспетчеризации одна, и в неё входят все экскаваторы, то есть число экскаваторов равно $N_э$. При комбинированном цикле каждому j -му экскаватору соответствуют карьерные самосвалы i -го типоразмера, выбираемые по рациональному соотношению вместимостей кузовов самосвалов и ковшей экскаваторов.

Чем больше величина $T_{прj}^c = (T_{освj}^э - t_{н.см} - T_{двj}^c)_+$, тем более загружен соответствующий экскаватор, и тем менее желательна отправка к нему порожнего карьерного самосвала. В то же время, с уменьшением $T_{прj}^c$ возрастает вероятность простоя экскаватора.

Предлагаемые в данной работе параметры приоритетности экскаваторов и соответствующих им маршрутов x_j определяются численно в результате многокритериального имитационного моделирования различных ситуаций; расчёт производится один раз (например, перед началом каждой смены) для всех возможных комбинаций карьерных экскаваторов и самосвалов путём некоторого количества «прогонов» имитационной программы. При каком-либо важном изменении в конфигурации ЭАК или разреза в целом эти параметры переоцениваются.

В параметрах приоритетности x_j учитываются: производительности экскаваторов; соответствие карьерных самосвалов и экскаваторов друг другу; расстояния транспортирования; скоростные характеристики самосвалов, зависящие от их технического состояния и квалификации водителей; возможность и закономерности отказов и восстановления работоспособности оборудования; влияние внешней горной среды. В результате может оказаться, что при прочих равных условиях учёт параметра приоритетности x_j будет иметь решающее значение для направления самосвала именно к этому, а не другому, экскаватору, и текущее распределение карьерных самосвалов кардинальным образом изменится. До настоящего времени параметр приоритетности в критериях принятия решений типа (3.14) или (3.15) не учитывался.

Параметры x_j можно свести в отдельную базу данных и при необходимости быстро обращаться к ней, что позволит существенно сократить время принятия решений. Подробнее механизм нахождения этих параметров будет описан далее.

Отказы оборудования. Выход из строя экскаватора рассматривается как главное изменение в состоянии ЭАК разреза. Поэтому в случае отказа экскаватора ПЦМ (см. п. 2.2) переоценивается, обновляются соответствующие входные параметры, а затем получают новое решение. Оптимальное решение обновлённой ПЦМ служит основой для последующего распределения карьерных самосвалов между оставшимися экскаваторами – до тех пор, пока не вернётся в строй нерабочий экскаватор, или пока не выйдет из строя другой. Самосвал, уже направленный

к вышедшему из строя экскаватору, перенаправляется к любому другому подходящему экскаватору (на усмотрение диспетчера).

В случае выхода из строя карьерного самосвала обновляется список доступных для распределения самосвалов. Поэтому вышедший из строя самосвал при распределении не учитывается – до тех пор, пока он не вернется в строй (либо не будет заменён самосвалом из резерва).

Диспетчерский алгоритм. Алгоритм распределения карьерного автотранспорта на нижнем уровне диспетчерской модели ЭАК (при его практической реализации) может выглядеть следующим образом [112, 113].

1. *Определение текущего статуса самосвала.* При принятии решения нас интересуют только порожние самосвалы, поэтому определение статуса проводится по текущему весу, снимаемому действующей системой диспетчеризации. Все карьерные самосвалы, имеющие положительное значение текущего веса (плюс-минус точность), временно отбрасываются.

Кроме того, нужно знать координаты каждого из работающих в данной подсистеме порожних самосвалов (данные берутся также из действующей диспетчерской системы).

2. *Идентификация маршрута.*

3. *Идентификация направления движения (с задачей движения).*

4. *Оценка ожидаемого времени движения до каждого экскаватора:*

$$T_{дв\ j}^c = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i}, \quad (3.17)$$

где j – номер экскаватора в данной подсистеме;

l_i – длина i -го отрезка маршрута, км;

v_i – скорость самосвала на i -м отрезке маршрута, км/ч.

Скорость v_i для первичного запуска программы может вычисляться теоретически, с помощью динамической характеристики, а затем – из «истории» движения. Время $T_{дв\ j}^c$, таким образом, будет накапливаться.

5. *Оценка ожидаемого времени погрузки.* При первичном запуске может вычисляться теоретически, через число ковшей; затем – из «истории».

6. *Вычисление критерия принятия решений* по формуле (3.16).

7. *Повтор цикла для всех порожних карьерных самосвалов в подсистеме.*

8. *Сравнение значений критериев и принятие решения.*

9. *Передача информации распределяемому самосвалу.*

Итак, на нижнем уровне для достижения целевых установок верхнего уровня применяется алгоритм оптимального распределения карьерных самосвалов по критерию наименьших затрат. Если рассматривать погрузочно-транспортные процессы ОГР, то такими затратами являются суммарные простои карьерных экскаваторов и самосвалов. Простои оборудования в итоге выливаются в значительные финансовые издержки, поэтому их (простои) необходимо свести к минимуму.

Поскольку стоимость простоев карьерных экскаваторов и самосвалов неодинакова, в качестве критерия эффективности разработанного алгоритма (генерального критерия оптимизации) можно использовать следующий:

$$C_{\text{пр}} = \sum_j C_{\text{э}_j} \cdot t_{\text{пр}_j}^{\text{э}} + \sum_j C_{\text{с}} \cdot t_{\text{пр}_j}^{\text{с}} \rightarrow \min, \quad (3.18)$$

где $t_{\text{пр}_j}^{\text{э}}$ и $t_{\text{пр}_j}^{\text{с}}$ – ожидаемое суммарное время простоя карьерных экскаваторов и самосвалов соответственно (за смену), ч;

$C_{\text{пр}}$ – стоимость простоев оборудования (потери от простоев), руб.

Стоимость простоев каждого вида оборудования можно приближённо определить по следующей формуле:

$$C = \frac{t_{\text{пр}} \cdot P_{\text{ч}}}{k_{\text{вскр}}} \cdot C_{\text{у}}, \quad (3.19)$$

где $t_{\text{пр}}$ – время простоя единицы техники, ч;

$P_{\text{ч}}$ – средняя часовая производительность единицы техники по вскрыше, м³/ч;

$k_{\text{вскр}}$ – плановый коэффициент вскрыши, м³/т;

$C_{\text{у}}$ – средняя стоимость угля при его реализации, руб./т.

Зависимость (3.18) одновременно являются и оценкой эффективности диспетчерской модели на нижнем уровне. В качестве такой оценки можно использовать также коэффициент эксплуатационной производительности $k_{ЭП}^{ЭАК}$, определённый зависимостью (2.2).

3.3 Принципы имитационного моделирования погрузочно-транспортного процесса экскаваторно-автомобильного комплекса

Существует достаточно большое количество имитационных моделей, исследующих ЭАК карьеров, но все они служат либо «для наглядности» [114, 115, 116], либо для простой оценки эффективности предлагаемых методов [117 – 121], тогда как для действительно эффективной диспетчеризации необходимо «заглянуть в будущее», то есть результаты ИМ нужно использовать в дальнейшей работе ЭАК. С помощью таких моделей можно, к примеру, определить приоритетность различных экскаваторов и соответствующих им маршрутов по какому-либо критерию. Для карьерных ЭАК таких разработок пока нет.

Карьерные транспортно-технологические системы характеризуются сравнительно быстрым изменением параметров транспортного потока в пространстве и времени, а также случайными значениями времени протекания технологических процессов, оптимизация которых предполагает точное определение такого сочетания действующих факторов, при котором обеспечивается наилучший результат работы системы в целом. Особенностью этих задач является многовариантность их решений, обусловленная целым рядом причин: возможностью замены одних моделей самосвалов и экскаваторов на другие, существованием альтернативных технологий работы ЭАК (закрытый, открытый и комбинированный циклы) и др. В любом случае, в задачах подобного типа требуется найти такое решение, которое давало бы оптимальное значение некоторого экономического показателя.

В ряде отраслей разработаны и реализованы модели транспортировки грузов по критерию минимума приведённых или (в динамической постановке) интегральных затрат. При добыче полезных ископаемых необходимо снижать себе-

стоимость продукции, а также расходы, связанные с простоями транспорта и погрузочного оборудования.

В качестве методической основы для исследования динамических моделей функционирования промышленных объектов (в том числе и ЭАК разрезов) целесообразно применять имитацию на компьютерах структуры этих комплексов и протекающих в них процессов. Компьютерная имитация погрузочно-транспортных процессов на горных предприятиях значительно расширяет возможности исследования их работы. Главным фактором является согласованность действий всех участников транспортного процесса, вследствие чего оптимизируются карьерные погрузочно-транспортные операции, состав транспортных средств и погрузочного оборудования. Работа погрузочного и транспортного оборудования в карьерах жёстко взаимосвязана, поэтому изменение одной из характеристик ЭАК неизбежно приводит к изменениям во всех частях системы.

Особенностью метода имитационного моделирования является обязательное использование вычислительной техники. Это предполагает математическую формализацию исследуемого процесса в виде сбора и обработки массива исходных данных, составления блок-схемы алгоритма исследования и программное обеспечение последнего.

Существуют следующие виды имитационного моделирования [122].

1. Дискретно-событийное моделирование касается моделирования системы по мере её развития во времени посредством представления, в котором переменные состояния изменяются мгновенно в конкретные моменты времени. В такие моменты времени происходят события, причём событие определяется как мгновенное возникновение, которое может изменить состояние системы. В зависимости от подхода к продвижению модельного времени данный вид моделирования подразделяется на:

- а) моделирование с продвижением времени от события к событию;
- б) моделирование с продвижением времени посредством постоянного шага.

2. Непрерывное моделирование – моделирование системы во времени при помощи представления, в котором переменные состояния изменяются во времени непрерывно.

3. Комбинированное непрерывно-дискретное моделирование (КНДМ). Поскольку некоторые системы не являются ни полностью дискретными, ни полностью непрерывными, может возникнуть необходимость создания модели с аспектами как дискретно-событийного, так и непрерывного моделирования, в результате чего имеет место КНДМ.

4. Моделирование по методу Монте-Карло трактуется как схема, в которой используются случайные числа – случайные переменные $U(0, 1)$. Такая схема предназначена для решения стохастических и детерминированных задач, в которых течение времени не играет особой роли.

При совершенствовании системы диспетчеризации карьерного автотранспорта возникает необходимость в оптимизации комплекса характеризующих её параметров. При этом задача может решаться с целью оптимизации какого-либо одного параметра, или с целью определения оптимального соотношения параметров в группе. Поскольку с увеличением числа оптимизируемых параметров резко возрастает и объём расчётных работ, то в пределах допустимых упрощений следует стремиться к ограничению их числа. В число оптимизируемых параметров следует включать только те, которые оказывают решающее влияние на протекающий процесс; остальные параметры при этом фиксируются на заданном уровне, подсказываемым опытом или другими соображениями. Задача облегчается зачастую тем, что некоторые параметры, хотя в принципе и являются случайными, однако могут быть зафиксированы на каком-то определённом уровне и рассматриваться как константы. Это, например, функции распределения, сменность работы, номинальная производительность экскаваторов и т.п.

При ИМ скорость протекания процесса в модели значительно выше, чем в реальных условиях, что даёт возможность за небольшие промежутки времени промоделировать большое количество смен и вариантов работы ЭАК. Процесс ИМ технологического процесса заключается в воспроизведении на персональном

компьютере (ПК) смены состояний единиц оборудования в той же логической последовательности и по тем же вероятностным законам, что и в реальном процессе, но в изменённом масштабе времени. Все изменения в ЭАК происходят только в моменты наступления событий. Такие события, как поступление карьерного самосвала под погрузку или уход самосвала после окончания погрузки, наступают мгновенно и изменяют состояние системы, меняя статус экскаватора (свободен/занят), либо укорачивая/удлиняя на единицу очередь самосвалов. Чтобы вычислить простой карьерного самосвала в очереди (если она есть), нужно определить время его поступления, так как простой равен известному времени начала его загрузки за вычетом времени его поступления. Для определения времени будущих событий необходимо знать длительности выполнения отдельных операций, которые генерируются из вероятностных распределений этих длительностей.

Таким образом, рассматриваемый вариант ИМ относится к дискретно-событийному виду. Принципиальная схема дискретно-событийной модели приведена на рисунке 3.2 [122].

Предлагаемая методология дискретно-событийного ИМ носит название имитационного моделирования с продвижением времени от события к событию. Рассмотрим этот механизм продвижения времени на примере системы массового обслуживания с одним обслуживающим устройством. Для этого понадобятся следующие обозначения:

- t_i – момент поступления i -й заявки на обслуживание ($t_0 = 0$);
- $I_i = t_i - t_{i-1}$ – временной интервал между поступлениями заявок ($i - 1$) и i ;
- T_i – время, потраченное обслуживающим устройством на обслуживание i -й заявки (без учёта времени задержки заявки в очереди);
- D_i – время задержки i -й заявки в очереди;
- $L_i = t_i + D_i + T_i$ – время ухода i -й заявки по завершении обслуживания;
- e_i – момент возникновения i -го события любого типа (значение i , принимаемое часами модельного времени без учёта значения $e_0 = 0$).

Каждый из определённых параметров, как правило, будет случайной величиной. Предположим, что известны распределения вероятности для интервалов между поступлением заявок I_1, I_2, \dots, I_n и для времени обслуживания T_1, T_2, \dots, T_n , и что они имеют функции распределения, обозначенные как F_I и F_T соответственно. F_I и F_T вычисляются путём сбора статистических данных в исследуемой системе и последующего определения распределений по этим данным с использованием методов, описанных в п. 3.3.2.

В момент времени $e_0 = 0$ обслуживающее устройство (его функции выполняет карьерный экскаватор) находится в состоянии незанятости. Момент поступления первой заявки (то есть момент прибытия первого карьерного самосвала на погрузку) определяется путём генерации значения I_1 из F_I и прибавления его к 0. После этого часы модельного времени (в предлагаемой модели их роль исполняет переменная *CurTime*) переводятся на время возникновения следующего (первого) события $e_1 = t_1$. Поскольку на момент поступления заявки t_1 устройство не занято, оно немедленно начинает обслуживание с задержкой требования в очереди $D_1 = 0$, и его состояние меняется на занятое.

Время L_1 завершения обслуживания поступившей заявки определяется путём генерации значения T_1 из F_T и прибавления его к t_1 . И наконец, момент поступления второй заявки t_2 вычисляется по формуле $t_2 = t_1 + I_2$, где значение I_2 генерируется из F_I . Если $t_2 < L_1$, то часы модельного времени переводятся с e_1 на время следующего события $e_2 = t_2$ (иначе часы были бы переведены с e_1 на L_1).

Так как заявка, поступившая в момент t_2 , обнаруживает, что обслуживающее устройство уже занято, число заявок в очереди увеличивается с 0 до 1, а время поступления заявки записывается. Однако в этот раз время обслуживания заявки T_2 не генерируется. Время поступления третьей заявки вычисляется по формуле $t_3 = t_2 + I_3$. Если $L_1 < t_3$, часы модельного времени переводятся с e_2 на время наступления следующего события $e_3 = L_1$.

Когда заявка, обслуживание которой завершено, уходит, начинается обслуживание заявки в очереди (той, что поступила в момент t_2), вычисляется время её

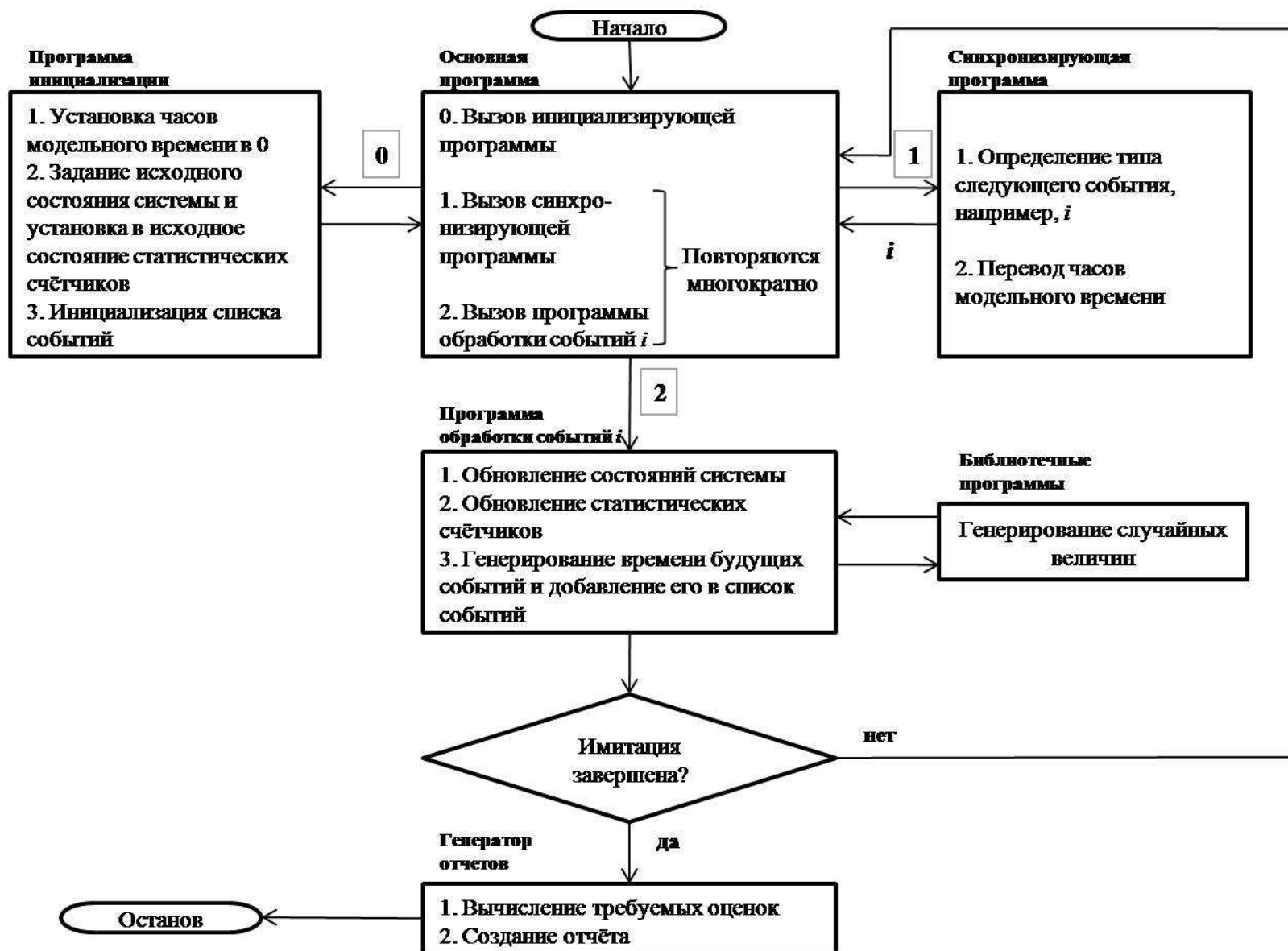


Рисунок 3.2 – Схема дискретно-событийной имитационной модели функционирования ЭАК с продвижением времени от события к событию

задержки в очереди $D_2 = L_1 - t_2$ и $L_2 = L_1 + T_2$ (теперь T_2 генерируется из F_T), а число заявок в очереди меняется с 1 на 0. Если $t_3 < L_2$, часы модельного времени переводятся с e_3 на время наступления следующего события $e_4 = t_3$, и т.д.

Моделирование может быть прервано в случае, когда число заявок, задержка которых в очереди была учтена, достигнет принятого значения, то есть очередь становится больше числа самосвалов в группе, либо самосвал выходит из строя.

Моделированию технологического процесса на ЭВМ предшествует этап формального описания функционирования моделируемого объекта (ЭАК). Этот этап состоит в установлении последовательности состояний погрузочно-транспортного оборудования в ЭАК и формулировке условий перехода от одного состояния к другому.

Моменты смены состояний ЭАК. Основная масса событий, как вероятностного, так и детерминистического характера, фиксируется на оси времени в процессе реализации имитационной модели на компьютере. Блок-схема алгоритма, описывающего действия модели при наступлении события смены состояний, показана на рисунке 3.3.

К таким событиям относятся:

1). Моменты поступления самосвалов $t_{п.з_1}, t_{п.з_2}, \dots, t_{п.з_i}, \dots$ под погрузку к каждому экскаватору. Моделируется так называемое «поступление заявки». При наличии очереди прибавляется 1 к числу самосвалов в очереди, и, если очередь заполнена, то моделирование прекращается; если нет – время прихода самосвала сохраняется. При отсутствии очереди экскаватор заканчивает простаивать и переводится в состояние занятости, а затем моделируется время погрузки – с помощью функции распределения длительностей погрузки $F_{T_1}(T_{погр})$. Функции распределений интервалов и длительностей строятся по методике, приведённой в п. 3.3.2.

2). Моменты окончания загрузки самосвалов $t_{о.з_1}, t_{о.з_2}, \dots, t_{о.з_i}, \dots$. Моделируется так называемый «уход заявки». В случае отсутствия очереди экскаватор переводится в состояние незанятости и начинает простаивать, а событие

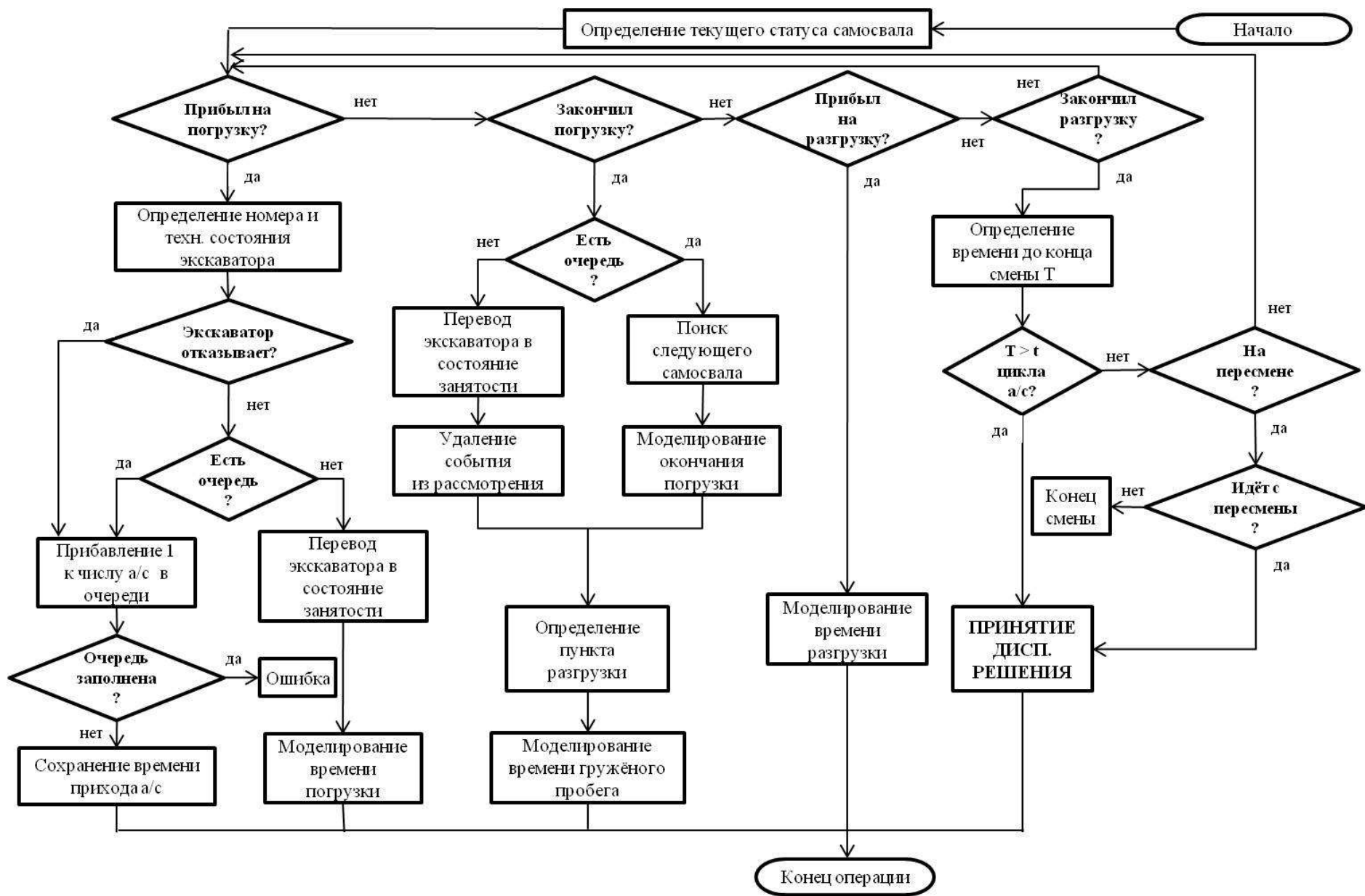


Рисунок 3.3 – Алгоритм действий при смене состояний ЭАК разреза

удаляется из рассмотрения. При наличии очереди моделируется время окончания погрузки рассматриваемого самосвала. Каждый последующий самосвал заканчивает погрузку через интервал $T_{0.3i}$, то есть $t_{0.3i} = t_{0.3i-1} + T_{0.3i-1}$. Значения $I_{0.3}$ определяются с помощью функции вероятностного распределения длительностей погрузки $F_{T_1}(T_{\text{погр}})$.

После этого определяется отвал-адресат (если есть возможность такого выбора) и моделируется время гружёного пробега – с помощью функции распределения длительностей гружёных пробегов $F_{T_2}(T_{\text{гр.пр}})$.

3). Моменты прихода карьерных самосвалов $t_{\text{п.п}_1}, t_{\text{п.п}_2}, \dots, t_{\text{п.п}_i}, \dots$ на разгрузку на отвалах. В таких случаях просто моделируется время разгрузки – с помощью функции распределения длительностей разгрузки $F_{T_3}(T_{\text{разг}})$.

4). Моменты окончания разгрузки карьерных самосвалов $t_{\text{о.п}_1}, t_{\text{о.п}_2}, \dots, t_{\text{о.п}_i}, \dots$. Оценивается время, оставшееся до конца смены, и, если оно больше ожидаемого времени рабочего цикла самосвала, то происходит принятие диспетчерского решения (рисунок 3.4); если меньше – начинается пересмена.

5). Нахождение карьерного самосвала на пересмене. Здесь возможны 2 варианта развития событий. Если карьерный самосвал прибывает на площадку пересмены, либо уже находится на ней, то смена для него заканчивается. Если же самосвал отбывает от площадки пересмены, то необходимо принятие диспетчерского решения (как в случае окончания разгрузки).

Блок-схема алгоритма принятия диспетчерского решения по распределению карьерных самосвалов приведена на рисунке 3.4. Время порожнего пробега моделируется с помощью функции распределения длительностей порожних пробегов $F_{T_4}(T_{\text{пор.пр}})$.

6). Моменты выхода из строя экскаваторов $t_{\text{э}_1}, t_{\text{э}_2}, \dots, t_{\text{э}_j}, \dots$, где $t_{\text{э}_j} = t_{\text{э}_{(j-1)}} + I_{\text{э}_j}$. Значения $I_{\text{э}_j}$ определяются по функции $F_{I_1}(I_{\text{э}})$ распределения случайных значений интервалов выхода из строя экскаваторов. Каждому моменту $t_{\text{э}_j}$ также присваивается длительность простоя экскаватора в ремонте. Вероятностная

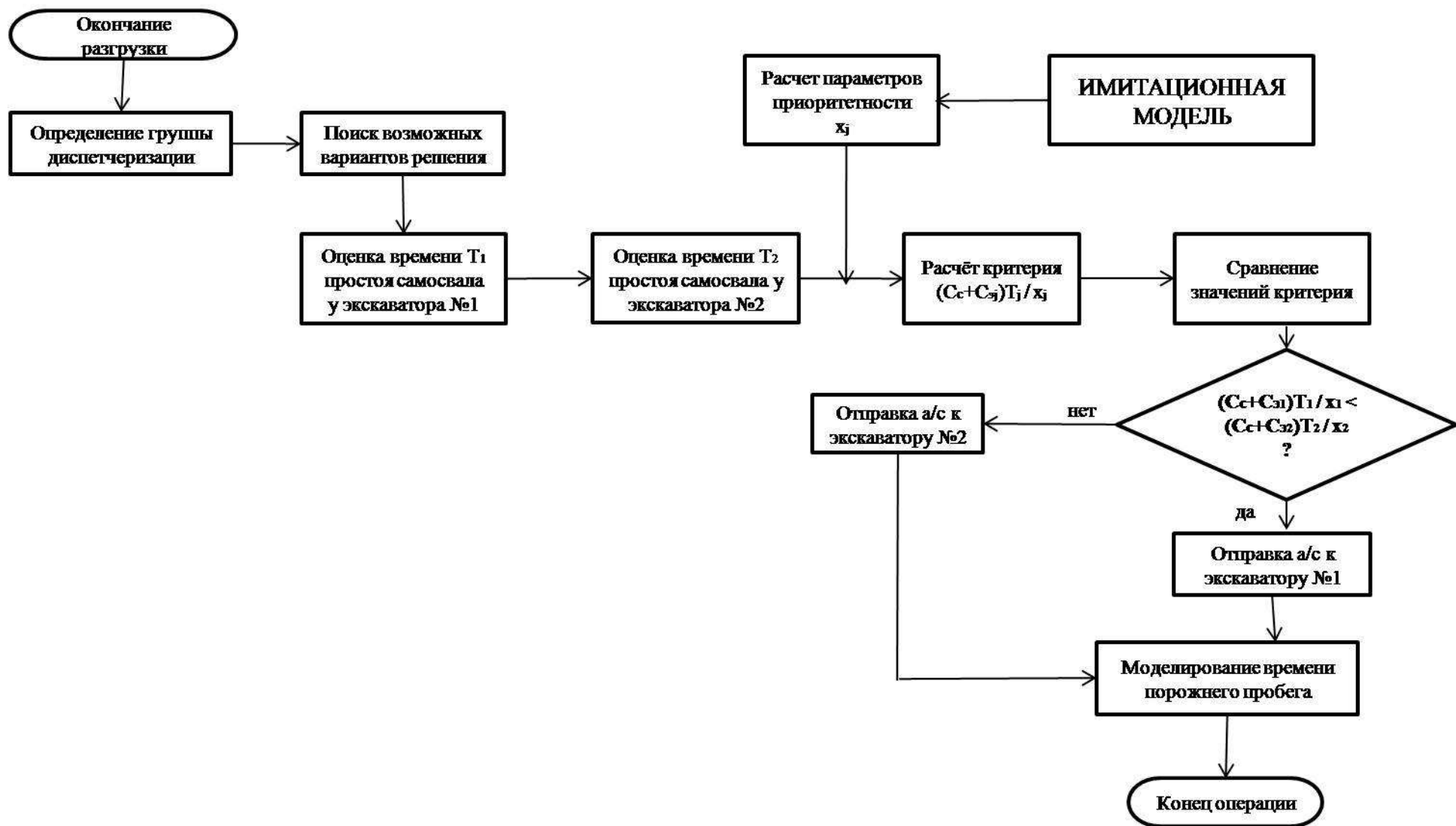


Рисунок 3.4 – Алгоритм действий при принятии диспетчерских решений по распределению карьерных самосвалов

величина $t_{эj}$ определяется по функции $F_{T_5}(\tau_э)$ распределения длительностей простоя экскаваторов в ремонте.

С точки зрения диспетчеризации карьерного автотранспорта поломки экскаваторов и самосвалов имеют значение только в момент поступления карьерного самосвала под погрузку. Если экскаватор в этот момент исправен, то просто моделируется «поступление заявки». Если же происходит поломка экскаватора, то самосвал либо становится в очередь (в случае несерьёзной поломки), либо перераспределяется.

С точки зрения технического состояния (рисунок 3.5) после поломки экскаватора он переводится в нерабочее состояние, моделируется время его простоя в ремонте, и, в случае наличия возле него самосвалов, прерывание погрузки. Если экскаватор закончил ремонт, он переводится в рабочее состояние, затем моделируется время до следующей поломки и «уход заявки».

7). Моменты выхода карьерных самосвалов из строя $t_{c_1}, \dots, t_{c_i}, \dots$, где $t_{c_i} = t_{c_{(i-1)}} + I_{c_i}$.

Значения I_{c_i} определяются по функции $F_{I_2}(I_c)$ распределения случайных значений интервалов между выходами самосвалов из строя. Каждому моменту t_{c_i} также присваивается длительность простоя самосвала в ремонте. Вероятностная величина t_{c_i} определяется по функции $F_{T_6}(\tau_c)$ распределения длительностей простоя карьерных самосвалов в ремонте.

После поломки карьерного самосвала (рисунок 3.6) производится перевод его в нерабочее состояние, моделирование времени простоя в ремонте, и, если самосвал в момент поломки находился на погрузке, то моделируется «уход заявки»; в любом другом случае самосвал просто временно исключается из рассмотрения. Если же карьерный самосвал заканчивает ремонт, он переводится в рабочее состояние, затем моделируется время до следующей поломки и «поступление заявки».

Особое место в ИМ занимает имитация освобождения обслуживающего устройства (экскаватора) от обслуживаемой операции (погрузки) – $T_{освj}^э$ (п. 3.2).

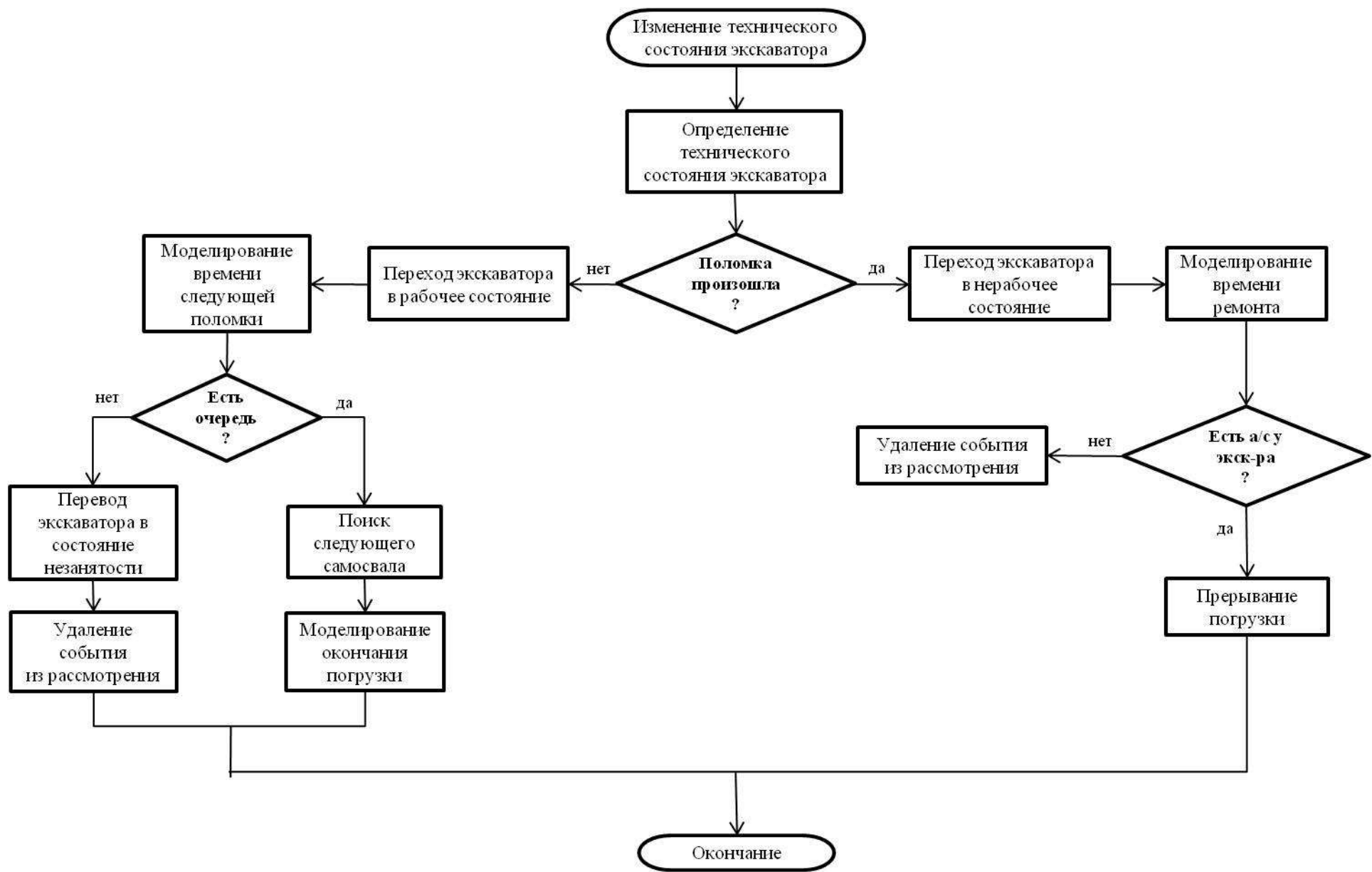


Рисунок 3.5 – Алгоритм действий при поломке экскаватора

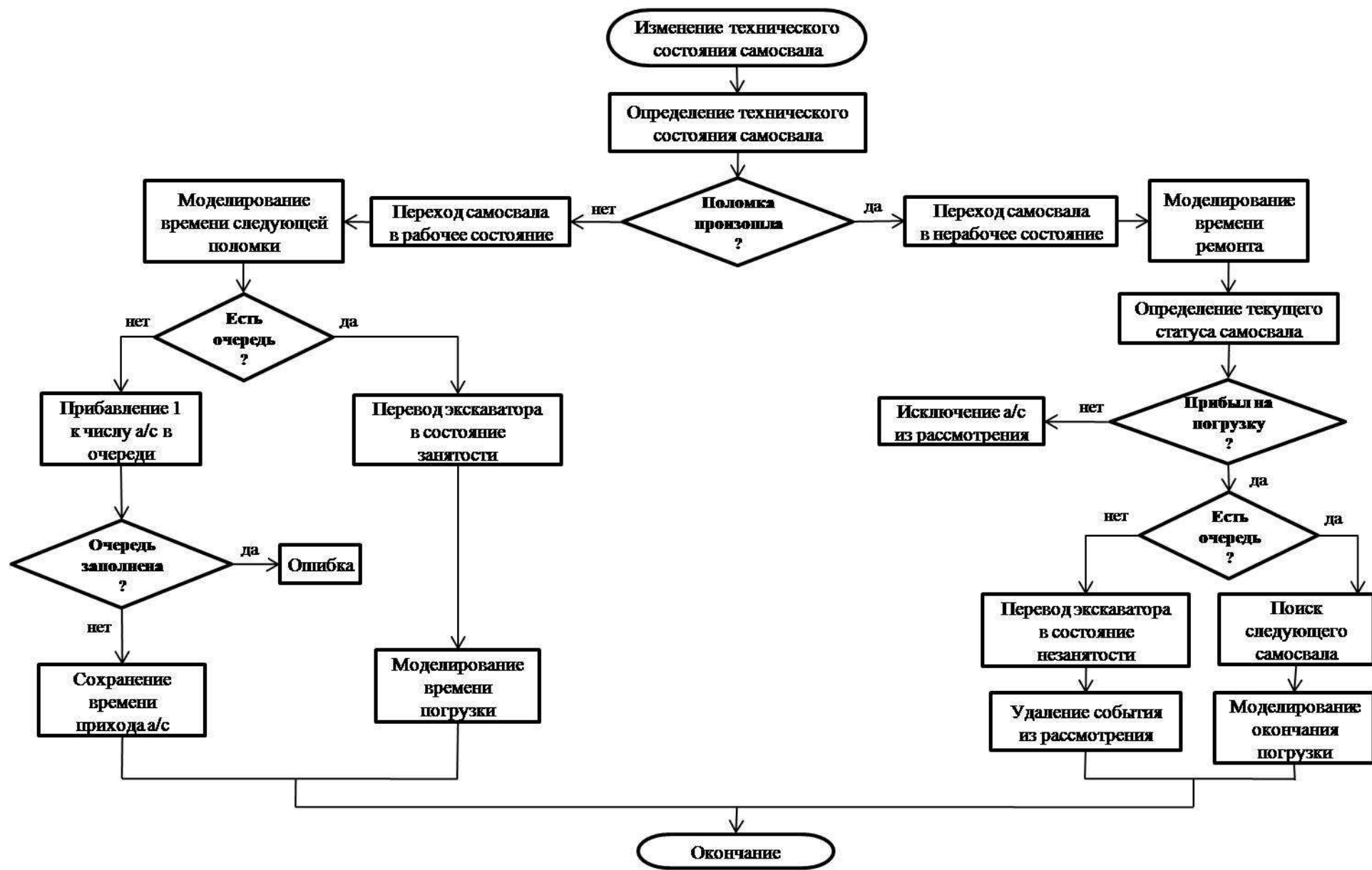


Рисунок 3.6 – Алгоритм действий при поломке карьерного самосвала

Это ожидаемый момент времени, в который карьерный самосвал, идущий перед распределяемым, закончит загрузаться у j -го экскаватора. Алгоритм усложняется тем, что в пути могут быть несколько самосвалов и нужно учитывать, какой из них прибудет раньше, будет ли экскаватор свободен и т.д. Данное время необходимо при принятии диспетчерского решения по распределению, а также при моделировании «ухода заявки».

Для прогнозирования $T_{\text{осв}j}^{\text{э}}$ служит процедура *Sub ForecastTime* в модуле *UnLocked* предлагаемой имитационной программы. Изначально $T_{\text{осв}j}^{\text{э}}$ (в программе – *LorryIdleForecast*) сравнивается с часами модельного времени $t_{\text{н.см}}$ (*CurTime*), и если время $T_{\text{осв}j}^{\text{э}}$ для карьерного самосвала, идущего перед распределяемым, больше ожидаемого времени начала его загрузки (*AllTimes*), то $T_{\text{осв}j}^{\text{э}} = T_{\text{осв}j}^{\text{э}} + \text{LoadTimes}$ (время загрузки этого предыдущего самосвала). В противном случае $T_{\text{осв}j}^{\text{э}} = \text{AllTimes} + \text{LoadTimes}$.

Имитация входящих потоков карьерных самосвалов. ВП требований на обслуживание в общем случае неравномерны по величине и по времени. По времени различают неравномерности трёх типов: по часам суток (внутрисуточная), по дням недели (внутринедельная) и по месяцам года (сезонная). Неравномерность ВП по величине едина и, как правило, не зависит от часа суток, дня недели или месяца года. Наибольшее значение для протекающих в ЭАК погрузочно-транспортных процессов имеет внутрисуточная неравномерность во времени. Это объясняется её скоротечностью в том смысле, что если по отношению к внутринедельной и сезонной неравномерностям, которые хорошо прогнозируются и система имеет какое-то время на их учёт, то внутрисуточная практически учёту не поддаётся. В отличие от внутринедельной и сезонной неравномерностей, учёт которых возможен через их частные коэффициенты неравномерности, а интервалы между последовательно поступающими карьерными самосвалами не имеют смысла, во внутрисуточном разрезе моделируемый ВП должен имитировать процесс поступления карьерных самосвалов к экскаваторам во всех его деталях.

Должны имитироваться моменты поступления, например, карьерных самосвалов в АТСМО – $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$, где $t_2 = t_1 + I_1, t_3 = t_2 + I_2, \dots, t_i = t_{i-1} + I_{i-1}, \dots$, или, что одно и то же, последовательность интервалов $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots$, которые, строго говоря, имеют переменную интенсивность на каждом стационарном участке ВП. Однако, как уже указывалось выше, для систем с непрерывным режимом работы, ВП карьерных самосвалов на всем протяжении работы можно считать стационарным.

3.3.1 Концепция оптимизационных расчётов на имитационной модели экскаваторно-автомобильного комплекса

Постановка задачи, методика и организация исследований. На показатели работы ЭАК влияют не только величины характеризующих её параметров, но также организационные и технологические мероприятия. Например, на простои карьерных самосвалов у экскаваторов влияют неравномерность поступления самосвалов под погрузку, которая, в свою очередь, зависит от качества диспетчеризации карьерного автотранспорта. Чем слабее неравномерность ВП карьерных самосвалов, тем меньше, при прочих равных условиях, их простои в очереди в ожидании погрузки.

Проводя исследования на имитационной модели ЭАК, необходимо иметь в виду следующее.

1. В пункте погрузки выполняется основной технологический процесс – грузовая переработка поступающего под погрузку порожнего карьерного самосвала. Здесь же имеют место и неосновные технологические процессы, которые также влияют на пропускную способность ЭАК: обслуживание и ремонт различных технических устройств, и т.д.

Основной технологический процесс в ЭАК многозвенен, то есть каждый карьерный самосвал последовательно обрабатывается на различных участках. Типовая цепочка основного технологического процесса ЭАК выглядит примерно так: диспетчеризация – движение к экскаватору под погрузку – загрузка самосва-

ла экскаватором – движение гружёного самосвала на отвал – разгрузка самосвала – диспетчеризация.

2. Если стоит задача выявить влияние на работу исследуемого ЭАК какого-либо одного параметра, остальным параметрам (звеньям технологического процесса) необходимо задать достаточную пропускную способность, такую, чтобы на протекающий в ней процесс эти параметры влияния не оказывали.

В ЭАК слабым звеном всей технологической цепочки является процесс своевременной загрузки карьерных самосвалов экскаваторами. Все остальные звенья (движение гружёных и порожних самосвалов, разгрузка на отвале с неограниченной вместимостью, процесс диспетчеризации) не являются сдерживающими звеньями общего технологического процесса ЭАК; они не приводят к простоям карьерных самосвалов или экскаваторов. Только некачественная диспетчеризация может привести к тому, что к одному экскаватору направляется много самосвалов – и тогда образуются очереди; к другому экскаватору тогда направляется недостаточное количество самосвалов, и тогда простаивает экскаватор. Задача состоит в том, чтобы так осуществлять распределение самосвалов в течение смены, чтобы суммарные простои подвижного состава (ПС) и экскаваторов были минимальными.

Проблема заключается в том, чтобы определить влияние того или иного параметра ЭАК, тех или иных организационно-технологических мероприятий (в том числе диспетчеризации) на простои ПС в ожидании обслуживания, простои экскаваторов в ожидании работы, количество обработанного ПС, объём переработанной горной массы.

Подобные исследования преследуют две цели:

– во-первых, для вычленения из общего и, на первый взгляд, непредсказуемого и хаотического процесса его основополагающих взаимосвязей и зависимостей; для «проигрывания» на модели намечаемых к внедрению технико-организационных мероприятий и принятия обоснованных решений;

– во-вторых, выявленные на модели зависимости являются необходимым исходным материалом для дальнейших оптимизационных расчётов или для выбо-

ра величины того или иного параметра системы или уровня организационно-технологических составляющих транспортно-производственных процессов, протекающих в исследуемой системе.

Одним из важнейших принципов ИМ является то, что строится и наполняется данная модель вполне определённой, конкретной системы. На компьютере имитируются:

- поступление порожних самосвалов на диспетчерский пункт для распределения;
- их диспетчерское обслуживание;
- подача под погрузку;
- загрузка самосвала экскаватором.

Основной технологический процесс обработки карьерных самосвалов в пунктах погрузки (у экскаваторов) моделируется совместно с имитацией условий, в которых этот процесс протекает, в том числе и условий стохастического характера. В этой части модели имитируются:

- количество и структура погрузочных средств (экскаваторов);
- их производительность и надёжность;
- распределение длительностей загрузки карьерных самосвалов экскаваторами;
- требуемая выработка (плановые объёмы погрузки и вывоза).

Рассматриваемая модель относится к классу статистических, что предполагает сбор большого объёма наблюдений с его последующей обработкой по правилам математической статистики. Основной целью реализации подобных моделей является определение зависимости между параметрами исследуемой ЭАК. Вид и численные значения функции этой зависимости определяются путём моделирования работы исследуемой обслуживающей транспортно-технологической системы. Количественная оценка этих зависимостей по какому-либо критерию позволяет определить оптимальное численное значение исследуемого параметра системы. Наиболее общим критерием является стоимостной – минимум потерь от простоев карьерного погрузочного и транспортного оборудования. Нахождение этого ми-

нимума достигается многовариантными расчётами. Самый «дешёвый» вариант – оптимальный.

Условием адекватности проектируемой модели реальному процессу является использование в модели закономерностей, которые имеют место в процессе. Эти закономерности выявляются путём статистической обработки наблюдений за всеми элементами моделируемой системы (главным образом, моментами смены состояний системы и длительностями тех или иных технологических операций).

Эти наблюдения условно подразделяются на детерминированные и вероятностные. В зависимости от этого используется тот или иной механизм их обработки. Результатом обработки наблюдений являются гистограммы и таблицы моделирования; эти таблицы вводятся в память компьютера и используются для имитации того процесса, который был заложен в подготовку соответствующих таблиц.

3.3.2 Методика сбора и обработки исходных данных

Исходные данные нужны для построения и функционирования имитационных моделей. Цель – получение фактических значений параметров модели. Они определяются путём натурного и документального моделирования объекта. Исходные данные для моделирования составляются из хронометражных наблюдений на действующих предприятиях.

Построение таблиц вероятностных событий. К вероятностным событиям относятся: моменты прибытия карьерных самосвалов к экскаваторам, продолжительность загрузки самосвала, длительности гружёных и порожних пробегов, интервалы выхода из строя экскаваторов и самосвалов и длительность их восстановления и др.

Расчёт таблицы моделирования соответствующих распределений выполним на примере распределения длительностей загрузки самосвала БелАЗ-75306 экскаватором Р&Н-2800 №28195 с ковшем объёмом 33 м^3 (с функцией распределения

$F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$). Данные получены с помощью системы управления и учёта работы технологического автотранспорта, внедрённой на разрезе «Кедровский» [123].

1). Собранные значения времени погрузки $T_{\text{погр}_j}$ должны быть сгруппированы. Интервал группировки определяется по формуле Стерджесса:

$$I_{\text{гр}} = \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{[1 + 3,322 \lg N]}, \quad (3.20)$$

где $t_{\text{max}}, t_{\text{min}}$ – максимальное и минимальное значение $t_{\text{погр}_j}$ соответственно, с;

N – объём выборки.

В данном примере $I_{\text{гр}} = 14$. Результаты расчётов сводятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Таблицы моделирования распределения длительностей загрузки самосвала БелАЗ-75306 экскаватором Р&Н-2800 №28195

Интервал группировки, $I_{\text{гр}}$, с	Частота появления $T_{\text{погр}_j}$ в i -м интервале, n_i	Частость, $p_i = n_i/N$	Накопленная частость, $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$
84-98	11	0,149	0,149
98-112	11	0,149	0,298
112-126	22	0,297	0,595
126-140	14	0,189	0,784
140-154	8	0,108	0,892
154-168	6	0,081	0,973
168-182	2	0,027	1,000
	$\sum n_i = N$	$\sum p_i = 1,000$	$F_{T_i} \leq 1; T_{\text{погр}_j} \geq 0$

2). Определяется средняя продолжительность погрузки:

$$T_{\text{погр}_{\text{ср}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{погр}_i}$$

Накопленная частость $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$ и является интегральной функцией распределения времени погрузки.

3). Строится график функции $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$. Он приведён на рисунке 3.7.

4). Строится таблица моделирования посредством трансформации определённого количества равномерно-распределённых чисел от 1 до данного значения через кривую $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$ (рисунок 3.8).

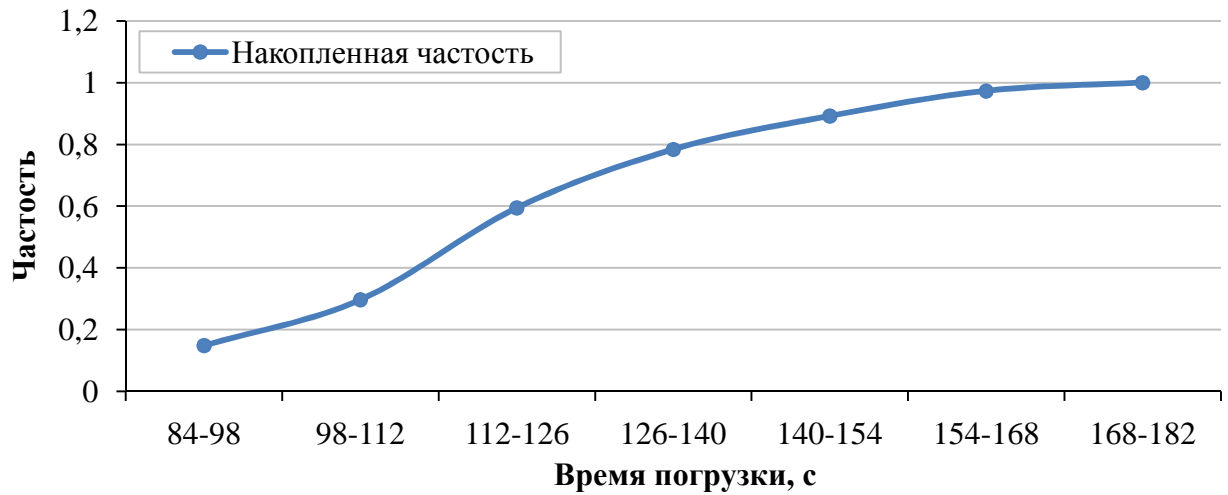


Рисунок 3.7 – График интегральной функции распределения времени погрузки $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$

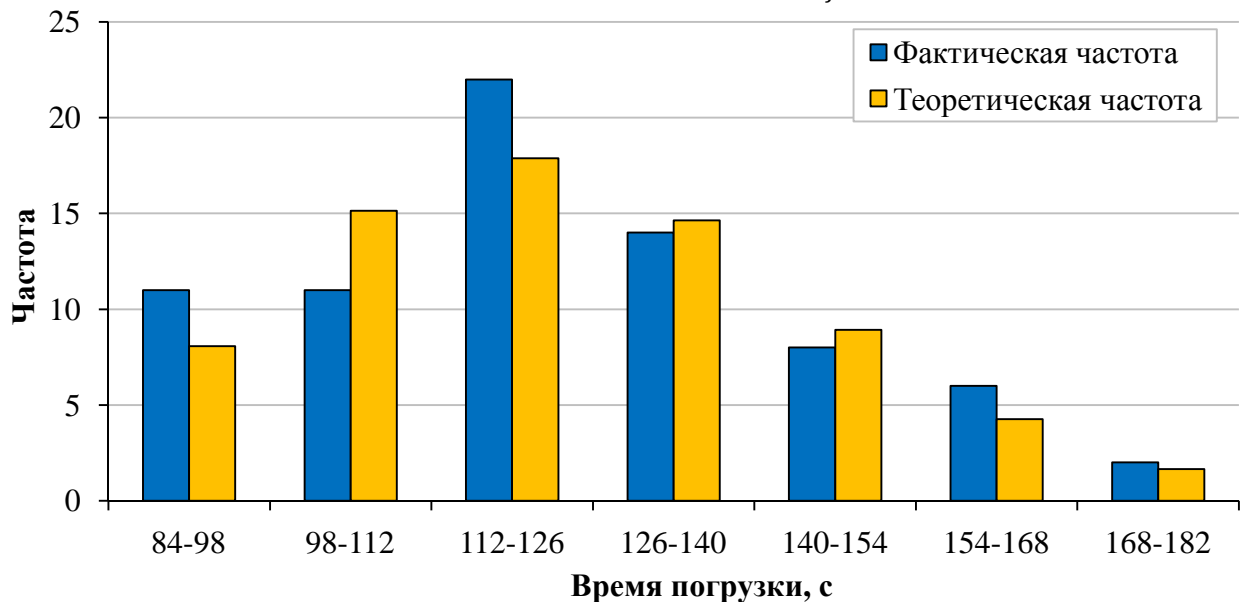


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения времени погрузки $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$

Кривая $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$ имеет и теоретическое распределение. Предварительные расчёты показывают, что в наибольшей степени экспериментальным данным соответствует гамма-распределение [122]. Поэтому, имея гистограмму значений, можно получить наиболее подходящее распределение, обладающее специфическими параметрами. Это позволяет пользоваться в дальнейшем вместо гистограммы соответствующим теоретическим распределением $F_{T_i}(T_{\text{погр}_j})$ и рассчитать таблицы моделирования.

Конкретные параметры гамма-распределений для всех временных характеристик погрузочно-транспортного процесса ЭАК применительно к условиям раз-

реза «Кедровский» приведены в таблице 3.2. Из таблицы видно, что из 17 распределений временных характеристик погрузочно-транспортного процесса ЭАК (а также ремонтов экскаваторов и самосвалов) только 3 не удовлетворяют критерию согласия $\chi^2 < \chi_{0,1; k-1}^2$. Однако, ввиду того, что эти различия невелики (12,6 и 12,0; 13,1 и 12,0; 15,0 и 13,4), а остальные удовлетворяют критерию согласия χ^2 вполне, можно считать, что все временные характеристики погрузочно-транспортных процессов ЭАК для разреза «Кедровский» соответствуют гамма-распределению. Кроме того, гамма-распределение для времени выполнения различных операций (в том числе и в ЭАК) рекомендуется в работах [120, 122].

В п. 2.3 при формировании групп диспетчеризации фигурировал экскаватор ЭКГ-15 №49, вошедший в ГД №3. В реальности он обслуживает только самосвалы, не оборудованные средствами АСД, поэтому фактических данных по нему получить невозможно, и его приходится исключить из дальнейшего рассмотрения. Следовательно, экскаватор Р&Н-2800 №28195 в имитационной модели будет обслуживаться по закрытому циклу на маршруте «Р&Н-2800 №28195 – отвал Северный» (участок №1), поскольку он в ГД №3 остался один.

Таким образом, ГД №3 из дальнейшего рассмотрения исключается, и полномасштабному исследованию будут подвергнуты только группы диспетчеризации №1 и №2, данные по которым приведены в таблице 3.2.

3.3.3 Разработка и программирование имитационной модели экскаваторно-автомобильного комплекса

Типизация моделирования. Процесс имитационного моделирования работы ЭАК на компьютере сравнительно трудоёмок, требует значительных затрат времени и средств, и, хотя эти затраты впоследствии себя окупают, используют его редко. В то же время принципиальное устройство обслуживающих систем во многих составляющих аналогично, а некоторые части (блоки) системы практически идентичны. Стандартизация алгоритмов задач приводит к стандартизации программного обеспечения моделей, что является основным положительным

Таблица 3.2 – Параметры гамма-распределения для временных характеристик погрузочно-транспортного процесса ЭАК разреза «Кедровский»

Временной показатель		Среднее, с	Стандартное отклонение, с	Параметр a	Параметр B	Число интервалов k	Критерий согласия (КС) χ^2	Критическое значение КС $\chi_{0,1; k-1}^2$
ЭКГ-15 №42 – отвал Центральный	Погрузка	253,2	35,36804	51	4,964706	6	6,1	9,2
	Гружёный пробег	598,2857	40,26851	221	2,707175	6	7,4	9,2
	Порожний пробег	485,2424	29,03449	279	1,73922	7	9,9	10,6
	Отказ экскаватора	78911,71	–	1	78911,71	–	–	–
ЭКГ-12ус №12 – отвал Центральный	Погрузка	280,625	37,5716	56	5,011161	8	11,3	12,0
	Гружёный пробег	667,5556	35,67393	350	1,907302	8	7,9	12,0
	Порожний пробег	522,1951	43,03558	147	3,552348	8	12,6	12,0
	Отказ экскаватора	49641,82	–	1	49641,82	–	–	–
Р&Н-2800 №152 – отвал Центральный	Погрузка	134,2911	30,27647	20	6,714557	8	10,6	12,0
	Гружёный пробег	879,6134	52,72335	278	3,164077	8	13,1	12,0
	Порожний пробег	698,1603	73,89034	89	7,844498	8	9,2	12,0
	Отказ экскаватора	70343,58	–	2	35171,79	–	–	–
ЭКГ-12ус №9 – отвал Центральный	Погрузка	263,3458	33,75805	61	4,317144	7	4,5	10,6
	Гружёный пробег	917,2619	39,70315	534	1,717719	7	7,6	10,6
	Порожний пробег	682,74	56,73095	145	4,708552	6	8,8	9,2
	Отказ экскаватора	45872,94	–	1	45872,94	–	–	–
Р&Н-2800 №28195 – отвал Северный	Погрузка	122,0676	22,94564	28	4,359556	7	4,0	10,6
	Гружёный пробег	616,8293	32,805	354	1,742456	7	9,2	10,6
	Порожний пробег	521,4	64,69281	65	8,021538	6	2,4	9,2
	Отказ экскаватора	76291,2	–	1	76291,2	–	–	–
Разгрузка		60	–	2	30	–	–	–
Ремонт экскаватора (любого)		3969,26	1980,723	4	992,315	9	15,0	13,4
Отказ самосвала		26524,47	–	1	26524,47	–	–	–
Ремонт самосвала		979,82	624,1304	2	489,91	7	4,8	10,6

моментом подобного подхода. Исследования показывают, что ЭАК разреза можно рассматривать как систему, состоящую из некоторого числа независимых подсистем, – каждая с собственной технологией. Задача заключается в том, чтобы выявить и описать типовые подсистемы и всю дальнейшую работу осуществлять с ними. Тогда модель ЭАК любого разреза будет строиться путём компоновки из типовых составляющих.

Для решения задач данной работы в терминах теории массового обслуживания была разработана дискретно-событийная имитационная модель с продвижением времени от события к событию, сформирован её алгоритм и программа (программный комплекс). В состав программного комплекса входит база данных «Экскаваторно-автомобильный комплекс разреза» и программа «Имитационная модель работы экскаваторно-автомобильного комплекса разреза».

Проектирование базы данных. Для решения задачи ИМ погрузочно-транспортных процессов ЭАК разреза интерфейс пользователя и БД программы реализованы в общедоступной среде *Microsoft Access*. Система управления БД *Access* выбрана из-за простоты средств реализации, лёгкости освоения инструментария разработчика (VBA), наглядности и возможности импорта данных из других баз и приложений (например, *Excel*), без ввода их с клавиатуры.

В процессе проектирования БД были определены объекты (сущности) и их свойства (атрибуты), которые должны храниться в ней. Информация условно разделена на первичную, справочную и расчётную. К первичной относится собранная и статистически обработанная информация о времени выполнения технологических операций, о периодичности отказов и времени ремонта оборудования. К справочной – информация о действующих на разрезе участках горных работ; пунктах погрузки, разгрузки и пересмены; действующих карьерных экскаваторах и самосвалах; актуальных маршрутах перевозок и группах диспетчеризации, в которые сведены эти маршруты. К расчётной (вторичной) информации можно отнести ожидаемые простои экскаваторов и самосвалов за смену; ожидаемое количество рейсов, выполняемых за смену от каждого экскаватора; параметры приоритетности маршрутов транспортирования горной массы.

Система *Access* основана на идее хранения наборов данных определённого смысла в отдельных таблицах. Для построения программы необходимо создание 10 связанных таблиц.

Таблица «Участки» (таблица 3.3) представляет собой список действующих на разрезе участков, на которых планируется ведение горных работ (если есть деление на участки).

Таблица 3.3 – Действующие участки горных работ разреза «Кедровский»

Участки	
ID	Наименование участка
1	Участок №3
2	Участок №1

Характеристики погрузочного оборудования заносятся в таблицу «Экскаваторы» (таблица 3.4). Таблица содержит информацию о моделях экскаваторов, объёмах ковшей, стоимостях простоя, определяемых по зависимости (3.19), о параметрах гамма-распределения частоты поломок и времени ремонта, а также времени загрузки карьерных самосвалов (таблица 3.2). Кроме того, указывается номер участка, на котором тот или иной экскаватор работает.

В БД также отражаются сведения о характеристиках карьерного автотранспорта – в таблице «Самосвалы» (таблица 3.5). В таблице представлена информация о моделях карьерных самосвалов, их количестве, скорости движения, стоимости простоя (зависимость (3.19)), а также о параметрах распределении частоты поломок и времени ремонта (таблица 3.2). Из технической характеристики карьерных самосвалов определяется их грузоподъёмность, грузоподъёмность и время разгрузки.

Данные о времени погрузки карьерных самосвалов, необходимые для расчёта, представлены в таблице «Время погрузки» (таблица 3.6). В таблице отражены сведения о параметрах вероятностного гамма-распределения времени погрузки одного карьерного самосвала в зависимости от модели экскаватора и самосвала, а также типа груза. Тем не менее, к расчёту принимается округлённое время погрузки, указанное в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики работы выемочно-погрузочных средств ЭАК разреза «Кедровский»

Экскаваторы															
ID	ID пункт	Модель	Участок	Теоретическая производительность, м ³ /ч	Объем ковша, м ³	Стоимость простоя, руб/ч	Поломка (среднее)	Поломка (альфа)	Поломка (бета)	Ремонт (среднее)	Ремонт (альфа)	Ремонт (бета)	Время погрузки (среднее), с	Время погрузки (альфа)	Время погрузки (бета)
1	1	ЭКГ-15 №42	№3	850	15	70800	78911,71	1	78911,71	3969,26	4	992,315	253	51	4,960784
2	2	ЭКГ-12ус №12	№3	640	12,5	53300	49641,82	1	49641,82	3969,26	4	992,315	281	56	5,017857
3	3	P&H-2800 №152	№3	1640	33	136700	70343,58	2	35171,79	3969,26	4	992,315	134	20	6,7
4	4	ЭКГ-12ус №9	№3	640	12,5	53300	45872,94	1	45872,94	3969,26	4	992,315	263	61	4,311475
5	5	P&H-2800 №28195	№1	1640	33	136700	76291,2	1	76291,2	3969,26	4	992,315	122	28	4,357143

Таблица 3.5 – Характеристики работы транспортных средств ЭАК разреза «Кедровский»

Самосвалы														
ID	Модель	Участок	Количество	Грузовместимость, м ³	Грузоподъемность, т	Скорость, км/ч	Стоимость простоя, руб/ч	Теоретическая производительность, м ³ /ч	Поломка (среднее)	Поломка (альфа)	Поломка (бета)	Ремонт (среднее)	Ремонт (альфа)	Ремонт (бета)
1	БелАЗ-75306	№3	20	130	220	42	17500	210	26524,47	1	26524,47	979,82	2	489,91
2	БелАЗ-75306	№1	20	130	220	42	17500	210	26524,47	1	26524,47	979,82	2	489,91

Таблица 3.6 – Данные о времени погрузки

Время погрузки							
ID	Экскаватор	Самосвал	Тип груза	Участок	Время погрузки (среднее), с	Время погрузки (альфа)	Время погрузки (бета)
1	ЭКГ-15 №42	БелАЗ-75306	вскрыша	№3	253,2	51	4,964706
2	ЭКГ-12ус №12	БелАЗ-75306	вскрыша	№3	280,625	56	5,011161
3	P&H-2800 №152	БелАЗ-75306	вскрыша	№3	134,2911	20	6,714557
4	ЭКГ-12ус №9	БелАЗ-75306	вскрыша	№3	263,3458	61	4,317144
5	P&H-2800 №28195	БелАЗ-75306	вскрыша	№1	122,0676	28	4,359556

Информация о пунктах погрузки и разгрузки, а также о площадках пересмены приведена в таблице «Пункты» (таблица 3.7). В таблице указываются пункты, в которых производится погрузка («экскаватор»), разгрузка («отвал», «склад») и пересмена («ПП») карьерных самосвалов, а также их тип и участок, на котором тот или иной пункт располагается.

Таблица 3.7 – Данные о местоположении пунктов погрузки, разгрузки и пересмены на разрезе «Кедровский»

Пункты				
ID	Наименование	Тип	Участок	Экскаватор
1	ЭКГ-15 №42	экскаватор	№3	ЭКГ-15 №42
2	ЭКГ-12ус №12	экскаватор	№3	ЭКГ-12ус №12
3	P&H-2800 №152	экскаватор	№3	P&H-2800 №152
4	ЭКГ-12ус №9	экскаватор	№3	ЭКГ-12ус №9
5	P&H-2800 №28195	экскаватор	№1	P&H-2800 №28195
6	площадка пересмены (№3)	ПП	№3	
7	отвал Центральный	отвал	№3	
8	отвал Южный (№3)	отвал	№3	
9	площадка пересмены (№1)	ПП	№1	
10	отвал Северный	отвал	№1	
11	отвал Южный (№1)	отвал	№1	

Характеристики маршрутов транспортирования горной массы приведены в таблице «Временные параметры» (таблица 3.8).

В таблице представлены средние (по информации из АСД) расстояния между пунктами погрузки, разгрузки и пересмены отдельных участков разреза, которые обозначены «Пункт 1» и «Пункт 2» соответственно. Также представлены параметры гамма-распределения времени гружёных и порожних пробегов между этими пунктами (таблица 3.2).

В таблице «Подгруппы диспетчеризации» (таблица 3.9) указываются номера и виды формируемых групп диспетчеризации, номера подгрупп в их составе, а также модели карьерных самосвалов, которым предписывается работать в данных группах (подгруппах), и их предполагаемое количество в каждой подгруппе (в первом приближении). Расчёт идёт до тех пор, пока количество самосвалов в группе (подгруппе) не достигнет указанного в таблице числа.

Таблица 3.8 – Характеристики маршрутов между пунктами погрузки, разгрузки и пересмены на разрезе «Кедровский»

Временные параметры										
ID	Пункт 1	Пункт 2	Участок	Расстояние, км	Гружёный пробег (среднее), с	Порожный пробег (среднее), с	Гружёный пробег (альфа)	Гружёный пробег (бета)	Порожный пробег (альфа)	Порожный пробег (бета)
1	ЭКГ-15 №42	отвал Центральный	№3	2,28	598,2857	485,2424	221	2,707175	279	1,73922
2	ЭКГ-12ус №12	отвал Центральный	№3	3,07	667,5556	522,1951	350	1,907302	147	3,552348
3	P&H-2800 №152	отвал Центральный	№3	3,95	879,6134	698,1603	278	3,164077	89	7,844498
4	ЭКГ-12ус №9	отвал Центральный	№3	4,2	917,2619	707,5517	534	1,717719	73	9,692489
5	P&H-2800 №28195	отвал Северный	№1	3,02	616,8293	521,4	354	1,742456	65	8,021538
6	площадка пересмены (№3)	ЭКГ-15 №42	№3	3,3	0	580	0	0	125	4,64
7	площадка пересмены (№3)	ЭКГ-12ус №12	№3	2,15	0	460	0	0	180	2,555556
8	площадка пересмены (№3)	P&H-2800 №152	№3	1,3	0	370	0	0	250	1,48
9	площадка пересмены (№3)	ЭКГ-12ус №9	№3	1,5	0	400	0	0	225	1,777778
10	площадка пересмены (№1)	P&H-2800 №28195	№1	3	0	521,4	0	0	65	8,021538

Таблица 3.9 – Подгруппы диспетчеризации карьерного автотранспорта на разрезе «Кедровский»

Подгруппы диспетчеризации					
ID	Номер группы	Подгруппа	Вид группы	Количество самосвалов	Тип самосвалов
1	1	№1 (участок 3)	открытая	20	БелАЗ-75306
2	2	№2 (участок 3)	открытая	20	БелАЗ-75306
3	3	№3 (участок 1)	закрытая	20	БелАЗ-75306

Группы диспетчеризации могут быть трёх видов:

- закрытая (один экскаватор работает на один отвал по закрытому циклу);
- открытая (от 2 до 4 экскаваторов работают на один отвал по открытому или комбинированному циклу);
- комбинированная, или смешанная (3 или 4 экскаватора работают на 2 отвала). Предполагается наличие мощного экскаватора, способного обслуживать 2 маршрута; в этом случае требуется разбивка группы на подгруппы.

Ввиду ограниченности вычислительных ресурсов максимальное количество экскаваторов в группе установлено равным 4. Максимальное количество самосвалов в группе – 20, максимальное число подгрупп в одной группе – 2.

В таблице «Направления диспетчеризации» (таблица 3.10) представляется качественный состав формируемых групп и подгрупп диспетчеризации (то есть пункты погрузки и разгрузки, которые будут взаимодействовать между собой); кроме того, указывается номер участка, на котором сформирована та или иная группа (подгруппа).

Таблица «Имитация» (таблица 3.11) является расчётной. В данную таблицу записываются результаты вычислений, производимых с помощью процедур *Sub ImitationLocked* (для закрытых групп) и *Sub ImitationUnLocked* (для открытых и комбинированных групп) в модулях *Locked* и *UnLocked* соответственно.

Таблица 3.10 – Направления диспетчеризации в ЭАК разреза «Кедровский»

Направления диспетчеризации				
ИД	Экскаватор	Отвал	Подгруппа	Участок
1	ЭКГ-15 №42	отвал Центральный	№1 (участок 3)	Участок №3
2	ЭКГ-12ус №12	отвал Центральный	№1 (участок 3)	Участок №3
3	P&H-2800 №152	отвал Центральный	№2 (участок 3)	Участок №3
4	ЭКГ-12ус №9	отвал Центральный	№2 (участок 3)	Участок №3
5	P&H-2800 №28195	отвал Северный	№3 (участок 1)	Участок №1

Прежде чем начать имитационное моделирование, необходимо в коде программы указать либо номера участков, для которых проводится моделирование (если речь идёт о закрытом цикле работы), либо номер группы диспетчеризации (если работа идёт по открытому или комбинированному циклу). Также в открытых группах есть возможность задать требуемый интервал количества карьерных самосвалов – в целях экономии машинного времени. В закрытых группах такой возможности нет, и моделирование всегда проводится при всех возможных количествах карьерных самосвалов.

Чтобы начать моделирование, необходимо запустить одну из указанных выше процедур, после чего программа, промоделировав некоторое количество рабочих смен, выберет вариант, при котором суммарные финансовые потери от простоев карьерных самосвалов и экскаваторов будут минимальными. Программа вычисляет (при различных количествах самосвалов) простои самосвалов и экскаваторов за смену, ожидаемое количество рейсов по каждому маршруту транспортирования, а также параметры приоритетности маршрутов (экскаваторов). Кроме этого, в таблице указываются номера групп и подгрупп диспетчеризации, их тип, а также направления диспетчеризации.

Таблица «Динамическое программирование» (таблица 3.12) также является расчётной. В данную таблицу записываются результаты вычислений, производимых с помощью процедуры *Sub example* (в модуле *Dynamic*). В случае образования сложных групп, состоящих из 4-х экскаваторов, с помощью аппарата динамического программирования выбирается оптимальный вариант распределения

Таблица 3.11 – Данные о совместной работе карьерных экскаваторов и самосвалов в ГД №1

Имитация											
ID	Номер решения	Тип решения	Группа диспетчеризации	Подгруппа	Направление диспетчеризации	Экскаватор	Количество самосвалов	Простои экскаватора, ч	Простои самосвалов, ч	Количество рейсов	Параметр приоритетности
4433	101	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	1	8,399142	0,949589	22,779	11
4434	101	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	1	9,960738		0,503	10
4435	102	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	2	7,102728	1,982583	41,226	11
4436	102	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	2	9,6283		4,762	10
4437	103	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	3	6,093961	3,204415	55,58	12
4438	103	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	3	9,039058		12,311	10
4439	104	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	4	5,329901	4,642544	66,452	17
4440	104	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	4	8,241565		22,528	10
4441	105	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	5	4,647715	5,913931	76,159	12
4442	105	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	5	7,3305		34,2	12
4443	106	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	6	4,055976	7,775987	84,579	13
4444	106	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	6	6,436218		45,657	6
4445	107	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	7	3,575909	9,5477654	91,41	10
4446	107	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	7	5,412207		58,776	7

Продолжение таблицы 3.11

Имитация											
ID	Номер решения	Тип решения	Группа диспетчеризации	Подгруппа	Направление диспетчеризации	Экскаватор	Количество самосвалов	Простои экскаватора, ч	Простои самосвалов, ч	Количество рейсов	Параметр приоритетности
4447	108	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	8	3,137938	11,49068	97,642	10
4448	108	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	8	4,376956		72,039	10
4449	109	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	9	2,492788	13,663414	106,822	12
4450	109	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	9	3,593825		82,072	8
4451	110	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	10	1,986788	17,057087	114,022	14
4452	110	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	10	2,893822		91,04	8
4453	111	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	11	1,543546	20,760608	120,329	14
4454	111	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	11	2,187107		100,094	10
4455	112	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	12	1,33447	26,50889	123,304	9
4456	112	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	12	1,618473		107,379	9
4457	113	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	13	1,103256	33,85579	126,594	10
4458	113	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	13	1,365729		110,617	9
4459	114	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	14	1,094752	42,76794	126,715	10
4460	114	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	14	1,174649		113,065	12

Окончание таблицы 3.11

Имитация											
ID	Номер решения	Тип решения	Группа диспетчеризации	Подгруппа	Направление диспетчеризации	Экскаватор	Количество самосвалов	Простои экскаватора, ч	Простои самосвалов, ч	Количество рейсов	Параметр приоритетности
4461	115	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	15	1,020328	52,43452	127,774	11
4462	115	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	15	1,188855		112,883	12
4463	116	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	16	0,923204	61,91882	129,156	13
4464	116	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	16	1,192602		112,835	11
4465	117	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	17	0,8837782	71,63103	129,717	16
4466	117	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	17	1,179722		113	11
4467	118	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	18	0,876891	81,31621	129,815	13
4468	118	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	18	1,128908		113,651	10
4469	119	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	19	0,8684576	90,98435	129,935	13
4470	119	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	19	1,076533		114,322	13
4471	120	открытая	1	1	1	ЭКГ-15 №42	20	0,8273451	100,91218	130,52	17
4472	120	открытая	1	1	2	ЭКГ-12ус №12	20	1,104945		113,958	7

карьерных самосвалов по экскаваторам при закрытом цикле работы (поскольку аналитическое определение такого варианта является слишком трудоёмким). В коде программы нужно указать номер участка, на котором работают данные экскаваторы, после чего определяется количество карьерных самосвалов, которое необходимо закрепить за каждым экскаватором с целью минимизации потерь от простоев оборудования. Каждый экскаватор можно идентифицировать по коду, указанному в таблице 3.4. Также показывается величина потерь от простоев при выбранном варианте.

Таблица 3.12 – Результаты динамического программирования для закрытого цикла работы ЭАК

Динамическое программирование					
ID	ID решения	Количество самосвалов	Группа (экскаватор)	Затраты	Тип
150	5	1	4	1919616	закрытая
151	5	11	3	1428310	закрытая
152	5	3	2	701191	закрытая
153	5	5	1	327239	закрытая

В таблицах каждая запись содержит данные отдельного объекта. Записей может быть неограниченное количество – в зависимости от цели проектирования БД. Таблицы связывают между собой во избежание дублирования информации с помощью создания ключевого поля.

Рассматриваемая БД включает в себя 8 основных таблиц (сущностей), логические взаимосвязи которых представлены на рисунке 3.9.

Взаимодействие таблиц реализуется с помощью отношения «один-ко-многим» или «многие-ко-многим», которые связывают одну или несколько записей одной таблицы со многими записями другой таблицы.

Значения ключевых полей, совпадающие в двух таблицах, идентифицируют отношения между записями в разных таблицах. Данный ключ организует данные путём идентификации каждой записи, что позволяет различать записи. Идентифицировать экскаваторы по модели невозможно, поскольку в программе присут-

ствуют несколько одинаковых моделей, которые расположены в разных местах. Номер «ID» идентифицирует его уникально, то есть данный номер может иметь только один экскаватор. Таким образом, таблицы, между которыми установлено отношение, имеют как минимум один общий столбец, а также определённый тип отношения.

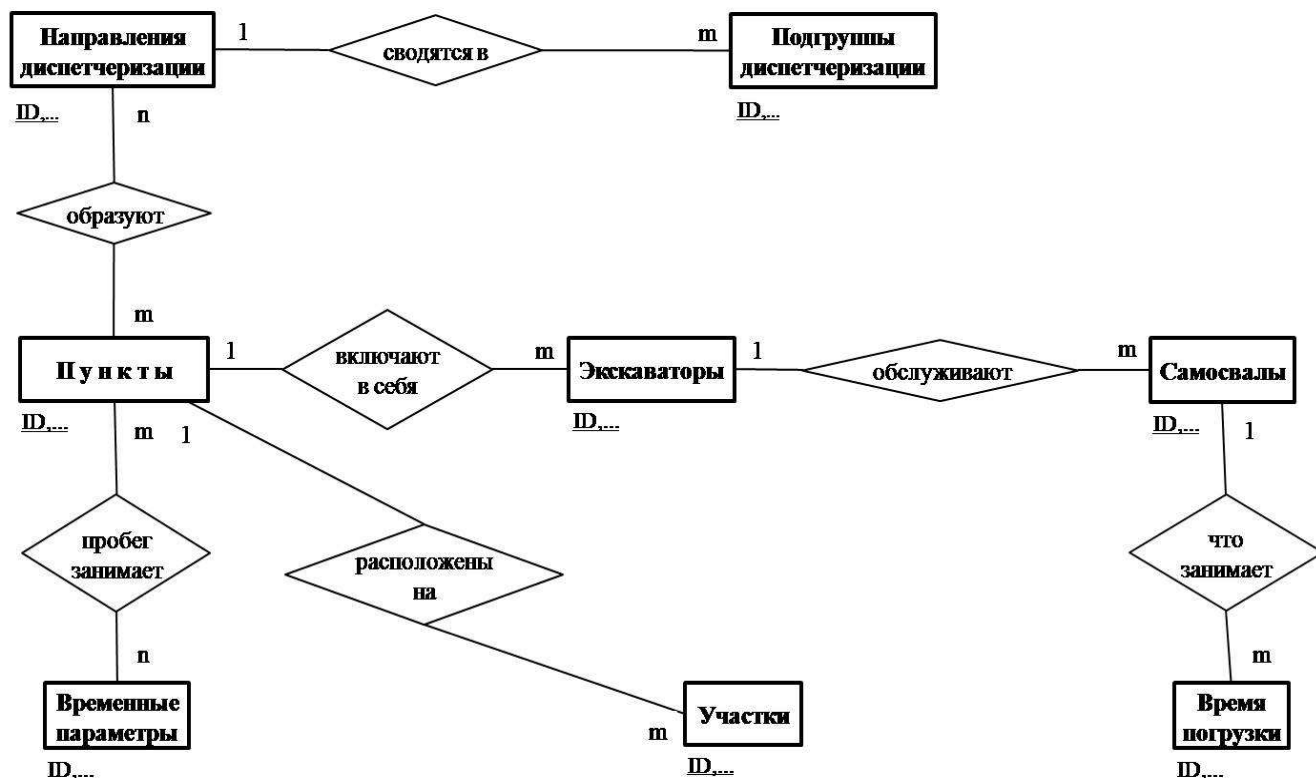


Рисунок 3.9 – ER-диаграмма базы данных «Экскаваторно-автомобильный комплекс разреза»

База данных «Экскаваторно-автомобильный комплекс разреза» защищена свидетельством о государственной регистрации базы данных №2014620773 от 28.05.2014.

«Активная часть» имитационной модели ЭАК разреза «Кедровский». Основная задача программного комплекса – проведение оптимизации работы ЭАК разреза без закрепления карьерных самосвалов за пунктами погрузки. К второстепенным задачам относится определение простоев погрузочно-транспортного оборудования, параметров приоритетности маршрутов и т.д. Алгоритм оптимизации (рисунок 3.10) состоит из следующих этапов:

1 этап – сбор справочной и первичной информации об ЭАК разреза, помещение её в базу данных, корректировка ошибочной информации.

2 этап – формирование блока исходных данных на основе информации из таблиц «Пункты», «Временные параметры», «Участки», «Экскаваторы», «Самосвалы», «Время погрузки», «Направления диспетчеризации», «Подгруппы диспетчеризации».

3 этап – определение набора параметров приоритетности, который будет использоваться при моделировании.

4 этап – имитационное моделирование рабочей смены ЭАК разреза.

5 этап – оценка ожидаемого количества рейсов, выполняемых действующим парком самосвалов за смену.

6 этап – оценка ожидаемых сменных простоев погрузочно-транспортного оборудования в составе ЭАК.

7 этап – решение математических задач оптимизации работы ЭАК по критерию минимума денежных потерь от простоев оборудования.

8 этап – оценка результатов оптимизации: определение количества рейсов, сменных простоев оборудования и параметров приоритетности маршрутов, соответствующих варианту с минимальными потерями от простоев.

На компьютере имитируются: поступление порожних карьерных самосвалов, их диспетчерское обслуживание, подача под погрузочные операции (порожний пробег), погрузка, подача гружёных самосвалов под разгрузку (гружёный пробег), разгрузка самосвалов на отвале.

Разработанный программный комплекс может использоваться как для моделирования различных ситуаций (изменения числа работающих самосвалов, характеристик маршрутов и т.д.), так и для оптимизации. Алгоритм оптимизации не учитывает требования к качеству горной массы, поэтому программный комплекс можно применять для оптимизации работы ЭАК только на разрезах. Дальнейшее совершенствование комплекса и расширение области его применения возможно благодаря разработке математических моделей, учитывающих требования к качеству горной массы.

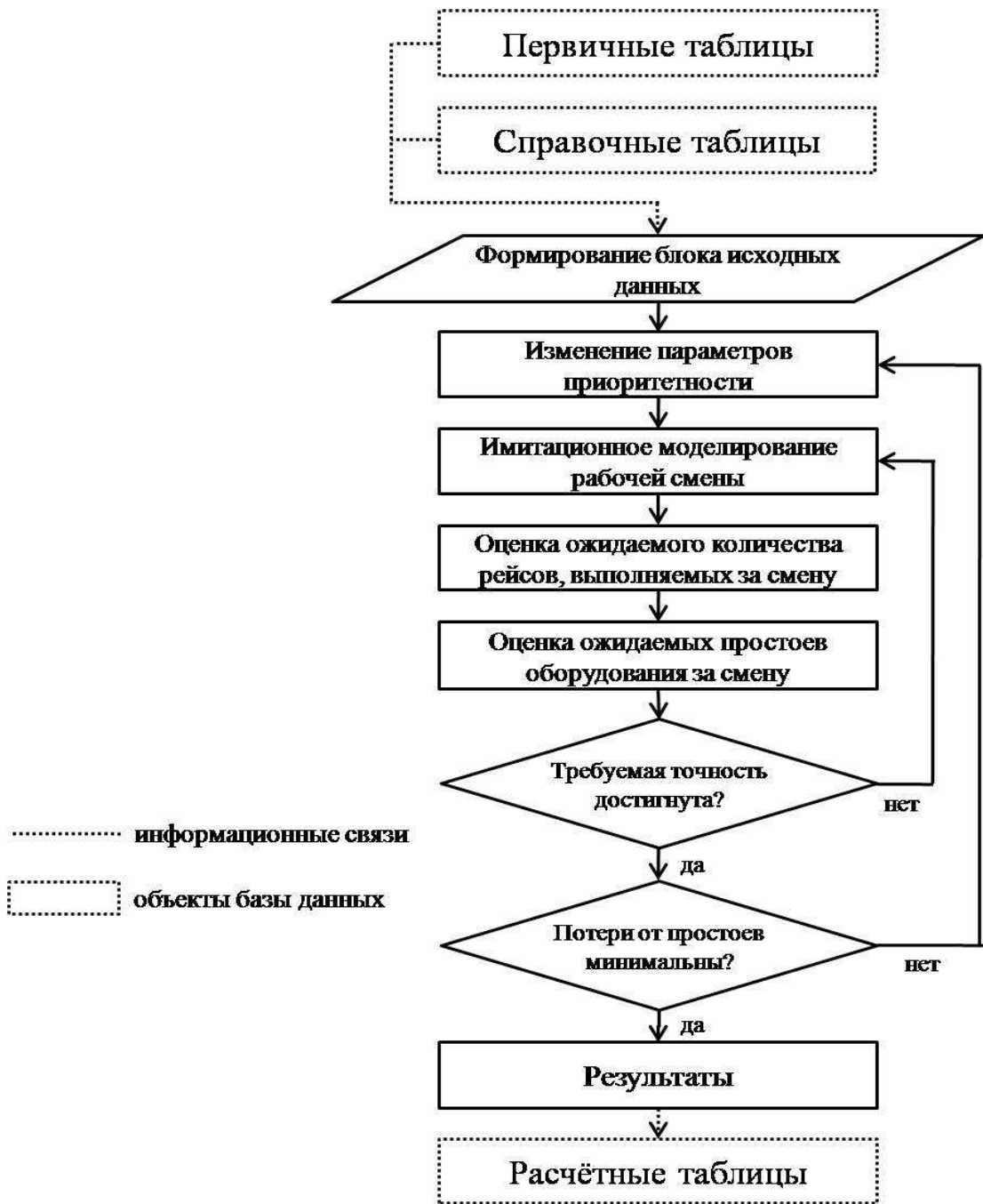


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритма оптимизации

Основной технологический процесс обработки карьерных самосвалов в ЭАК разреза моделируется одновременно с имитацией условий, в которых этот процесс протекает, в том числе вероятностного характера. В этой части модели имитируются: мощность обслуживающих средств на разных фазах обслуживания, в том числе количество и типоразмеры экскаваторов, их производительность и надёжность, распределение длительностей обслуживания.

Характеристики протекающих в системе процессов (простой карьерных самосвалов в ожидании обслуживания, число обслуженных машин, простой экскаваторов в ожидании работы, и т.д.) видны из приведённого выше примера (таблица 3.11) – выходной машинограммы реализуемой на ПК модели работы ЭАК разреза «Кедровский».

Визуальное представление алгоритма моделирования в виде компьютерной программы затруднительно. Из-за огромного количества деталей, связанных с вычислительными процедурами, такое представление делает модель малообозримой и затрудняет ориентирование в ней. Необходима запись алгоритма в таком виде, чтобы, во-первых, хорошо просматривалась структура модели, и, во-вторых, алгоритм облегчал бы процесс разработки программы.

Наиболее наглядной и удобной формой записи алгоритма является блок-схема (рисунок 3.2), содержащая цепи последовательно расположенных операторов. С точки зрения моделирования работы ЭАК можно говорить о следующих классах операторов: A_i – арифметический или вычислительный; L_i – логический или сравнительный; Φ_i – оператор формирования случайной величины; K_i – контрольный счётчик; R_i – подготовки результатов реализации модели.

Каждый оператор имеет номер, который указывает, как правило, каким по счёту он вступает в действие. Это правило не распространяется только на логические операторы. После логического оператора управление передается в зависимости от результатов сравнения одному из двух операторов.

В рассматриваемом примере номера операторов следующие:

0). Программа инициализации (*Sub GetDataLocked, Sub GetDataUnLocked*) – подпрограмма, устанавливающая в исходное состояние имитационную модель в момент времени, равный 0.

1). Основная программа (*Sub CountShift*) – подпрограмма, которая вызывает синхронизирующую программу, для того чтобы определить следующее событие, а затем передает управление соответствующей событийной программе с целью обеспечения заданного обновления состояния системы. Основная программа так-

же может контролировать необходимость прекращения моделирования и вызывать генератор отчётов по окончании моделирования.

1а). Синхронизирующая программа (*Sub Synchron, Sub FindNextEvent*) – подпрограмма, которая отыскивает следующее событие в списке событий, а затем переводит часы модельного времени на время возникновения этого события.

2). Программа обработки событий (*Sub ChangeStage, Sub ChangeStage1*) – подпрограмма, обновляющая состояние системы при наступлении события определённого типа. Для некоторых типов событий могут существовать отдельные программы обработки событий (например, *Sub EventBreakExcavator* – для события поломки экскаватора).

2а). Библиотечные программы (*Function GenerateGamma*) – набор подпрограмм, применяемых для генерации случайных наблюдений из вероятностных распределений, которые были определены как часть имитационной модели.

3). Логический оператор завершения имитации (*Function IsEnoughError*). Если имитация не завершена, происходит возвращение к основной программе, если завершена – вызывается генератор отчётов.

4). Генератор отчётов (*ImitationLocked, ImitationUnLocked*) – подпрограмма, которая считывает оценки (со статистических счетчиков) критериев оценки работы и выдаёт отчёт по окончании моделирования.

Программа для имитации работы ЭАК разреза представляет собой файл *Microsoft Access*; в качестве программного средства разработки данной программы был выбран язык *Visual Basic For Applications* (VBA). Синтаксис языка и принципы его работы в *Access* являются общими и для других приложений пакета *Microsoft Office*. Основным достоинством языка является сочетание простоты использования, доступности и большого набора разнообразных возможностей, что позволяет решать многие задачи самостоятельно, не прибегая к услугам программистов.

Для хранения и использования программы были применены модули *DataModule, Dynamic, Locked, UnLocked, Dynamic* и *XDirections*, которые являются самостоятельными объектами базы данных. Модуль – это набор процедур, функ-

ций, объявлений и констант языка VBA, которые управляют базами данных *Access*.

Модуль *DataModule* загружает данные из различных таблиц; в нём производится описание основных (общих для всех модулей) переменных, констант и ограничений.

Модуль *Dynamic* – вспомогательный, используется только в случае формирования сложных групп диспетчеризации с 4 экскаваторами. Путём динамического программирования определяется рациональное количество самосвалов, закрепляемых за каждым из 4 экскаваторов (по критерию минимума потерь от простоев) при работе по закрытому циклу.

С помощью модуля *Locked* производится моделирование работы ЭАК по закрытому циклу. Учтена возможность поломок карьерных самосвалов и экскаваторов; ЭАК разреза поделён на участки (согласно актуальному плану горных работ). После запуска процедуры *Sub ImitationLocked* вычисляются суммарные ожидаемые сменные простои всех самосвалов и в отдельности каждого экскаватора на определённом участке (вместе со временем поломок и ремонтов; сюда также входят простои самосвалов под погрузкой), а также ожидаемое количество рейсов за смену. Моделирование производится при различных количествах действующих карьерных самосвалов (от 1 до заданного).

В модуле *UnLocked* происходит моделирование открытого (или комбинированного) цикла работы. Возможность поломок учтена. ЭАК поделён на группы (комбинированные группы с двумя отвалами и мощным экскаватором – на подгруппы). Принцип работы схож с модулем *Locked*, с той разницей, что, помимо простоев и рейсов, вычисляются ещё и параметры приоритетности различных маршрутов.

Модуль *XDirections* – также вспомогательный, он пересчитывает номера групп, подгрупп и направлений диспетчеризации в таблице «Имитация».

Входными параметрами имитационной программы являются: количество карьерных самосвалов, которые обслуживаются экскаваторами; параметры гамма-распределения времени погрузки, движения с грузом и без груза, разгрузки, а

также поломок и ремонта самосвалов и экскаваторов (таблица 3.2). Исходная информация обрабатывается и группируется, после чего начинается имитация погрузочно-транспортного процесса.

Программа генерирует время поступления самосвала под погрузку, помещает его в список событий и проверяет занятость экскаватора. Если экскаватор свободен – определяется время его простоя, следовательно, самосвал находится в пути и программа моделирует время возврата. Если же экскаватор занят, то самосвал находится под погрузкой, поэтому программа учитывает время простоя и планирует время его ухода по окончании обслуживания. Если по завершении погрузки очередь остается пустой – экскаватор будет простаивать в ожидании транспорта; если нет – начнёт погрузку первого в очереди карьерного самосвала. Затем программа определяет ближайшее событие и переводит часы модельного времени на время возникновения события.

Моделирование продолжается до тех пор, пока часы модельного времени не сравняются с продолжительностью рабочей смены. В результате моделирования определяются следующие параметры: суммарное количество рейсов, совершаемых карьерными самосвалами за смену; суммарное время простоев самосвалов в ожидании погрузки; время простоев экскаваторов в ожидании работы. Простои рассчитываются следующим образом: отмечается момент начала простоя (с помощью часов модельного времени); когда простой заканчивается, оценивается время этого простоя, которое затем прибавляется к общему времени простоя.

Результаты моделирования определяются случайным характером процессов, поэтому, для того чтобы охватить множество возможных вариантов событий, имитационная модель «проигрывается» множество раз. Моделирование повторяется, пока по закону больших чисел не будет достигнута необходимая точность, в результате чего рассчитываются следующие показатели, которые используются в дальнейшем для оптимизации погрузочно-транспортного процесса: среднее время простоев карьерных самосвалов; среднее время простоев экскаваторов; среднее количество рейсов самосвалов; параметры приоритетности различных маршрутов.

Параметры приоритетности маршрутов (экскаваторов) оцениваются следующим образом. Пусть j – количество экскаваторов в определённой группе диспетчеризации, тогда $X = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ – вектор параметров приоритетности. Имитационное моделирование позволяет статистическими методами оценить характеристики системы $C(X)$. В качестве характеристики $C(X)$ выступает величина денежных потерь от простоев всех экскаваторов и всех самосвалов в рассматриваемой группе диспетчеризации за смену ($C_{пр}$ в формуле (3.18)).

Для получения точной оценки необходимо провести расчёт достаточно большого количества смен, поэтому для определения правила остановки можно использовать центральную предельную теорему (ЦПТ) теории вероятностей.

Пусть для n испытаний (прогонов имитационной программы) $\hat{C}_n(X)$ – среднее значение характеристики, S_n^2 – значение характеристики с выборочной дисперсией, ΔC – допустимая погрешность. Тогда погрешность вычислений будет равна

$$P(|C(X) - \hat{C}_n(X)| < \Delta C) = \Phi\left(\frac{\Delta C}{S_n^2}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta C}{S_n^2}\right), \quad (3.21)$$

где Φ – функция стандартного нормального распределения.

В этих условиях количество прогонов программы n увеличивается до тех пор, пока вероятность попадания в доверительный интервал (3.21) не достигнет требуемой величины.

Следующая задача, которую необходимо решить – поиск оптимальных параметров приоритетности:

$$X^* = \arg \min_X \hat{C}_n(X). \quad (3.22)$$

Решение данной задачи требует значительных вычислительных ресурсов, так как оценка \hat{C}_n для каждого набора X получается в результате имитационного моделирования. Чтобы снизить затраты времени, используется следующий приём.

Из формулы (3.16) понятно, что при принятии диспетчерского решения важно отношение между параметрами приоритетности, то есть во сколько раз

один параметр больше другого. Пусть первый параметр $x_1 = 1$, а шаг параметра $s > 1$. Задаются предельные отклонения параметров приоритетности экскаваторов $s^{-d} < x_j < s^d$. Таким образом, каждый параметр может принимать $(2d + 1)$ значений. То есть для решения задачи (3.22) с помощью полного перебора потребуется $(2d + 1)^{j-1}$ расчётов характеристики \hat{C}_n .

Другими словами, сначала все значения параметров задаются равными 1. Затем фиксируются все значения, кроме одного, которое изменяется в установленных пределах (эти пределы всегда одинаковые). Так находится оптимальное значение параметра при фиксированных остальных. Далее программа переходит к другому параметру и также находит его оптимальное значение. Когда будут пройдены все параметры, один цикл заканчивается и начинается второй. Остановка происходит, когда значение генерального критерия оптимизации за цикл изменится незначительно. Результат будет оптимальным, если имитация была проведена с необходимой точностью и функция затрат выпукла вниз по параметрам (иначе нужен перебор сразу по всем параметрам, а это потребует слишком долгих расчётов).

Критерий необходимой точности (он же – критерий остановки) моделирования можно представить следующим образом.

ЦПТ теории вероятностей утверждает, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин (факторов), имеющих примерно одинаковые масштабы (то есть ни одно из слагаемых не является доминирующим и не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному.

Нормальное распределение определяется полностью, если известно его среднее значение $X_{\text{ср.ген}}$ и отклонение σ . Для нахождения доверительного интервала в общем виде с требуемой вероятностью $P(t)$ можно воспользоваться известной формулой Стьюдента:

$$X_{\text{ср.ген}} = X_{\text{ср.выб}} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.23)$$

где $X_{\text{ср.выб}}$ – среднее значение некоторой выборки из генеральной совокупности;

t – квантиль распределения Стьюдента (зависит от вероятности $P(t)$ и объёма выборки);

n – объём выборки.

Модуль выражения $(X_{\text{ср.ген}} - X_{\text{ср.выб}})$ представляет собой допустимую погрешность вычислений; значение $t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ – фактическую погрешность. Поэтому необходимо, чтобы значение $t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ не превышало $|X_{\text{ср.ген}} - X_{\text{ср.выб}}|$, то есть

$$|X_{\text{ср.ген}} - X_{\text{ср.выб}}| > t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.24)$$

Приспособив неравенство (3.24) к условиям предлагаемой имитационной модели, получим следующий критерий точности моделирования:

$$\varepsilon \cdot \sqrt{N_{\text{см}}} > 1,64 \cdot \sigma, \quad (3.25)$$

где ε ($\varepsilon = |X_{\text{ср.ген}} - X_{\text{ср.выб}}|$) – требуемая точность расчётов (принималась равной 1 руб.);

$N_{\text{см}}$ ($N_{\text{см}} = n$) – количество промоделированных смен (прогонов модели);

σ – среднеквадратическое отклонение величины потерь от простоев (выражение (3.18)).

Значение квантиля t при $n \rightarrow \infty$ и доверительной вероятности 90% приближённо равняется 1,64.

Выбор доверительной вероятности 90%, а не 95%, как принято, обусловлен сильной зависимостью от неё продолжительности ИМ на ПК. Если при 90% полный цикл ИМ для данных ЭАК разреза «Кедровский» составлял 5-6 часов, то при 95% он увеличивался почти вдвое без существенного повышения точности. При наличии вычислительных средств больших мощности и быстрогодействия доверительную вероятность можно увеличить и до 95%.

Проверку адекватности модели возможно осуществить по среднему и суммарному количеству рейсов карьерных самосвалов за смену, а также по средней и суммарной длительности простоев их в ожидании погрузки и в ремонте.

Среднее количество выполняемых за смену рейсов на наиболее стабильном маршруте «ЭКГ-12ус №12 – Центральный отвал» (имеется в виду, что на данном маршруте самосвалы, закреплённые за экскаватором, чаще всего работали только с этим экскаватором, и ни с каким другим), согласно имитационным расчётам, составило 19,31 (при 10-часовой смене и 4 закреплённых за маршрутом самосвалах БелАЗ-75306). Фактически это количество равно 19; отклонение, таким образом, составило 1,6%, или 70 т погруженной и вывезенной горной массы. Как видно, имитационная модель работы ЭАК продемонстрировала точность на 19,8% выше, чем марковская модель (см. п. 3.1.1).

Суммарное количество рейсов (расчётное) при тех же условиях составляет 77,258, фактически – 76. Отклонение – 1,7%, или 275 т горной массы. Среднее отклонение по рейсам, таким образом, равняется 1,65%.

Средняя расчётная длительность простоя одного карьерного самосвала составила 1,79 ч, фактическая – 1,7 ч. Отклонение – 5,3%, что соответствует 13 285 рублям, недополученным из-за простоев. Суммарная расчётная длительность простоев 4 самосвалов составила 7,15 ч, фактическая – 6,8 ч. Отклонение – 5,1%, или 6125 недополученных рублей. Среднее отклонение по простоям будет равно 5,2%.

Из всего сказанного выше можно сделать вывод об адекватности разработанной имитационной модели работы экскаваторно-автомобильного комплекса разреза [124, 125]. Несмотря на то, что результаты ИМ оказываются всё же несколько завышенными по сравнению с фактическими показателями работы ЭАК, расчёты на имитационной модели гораздо точнее, чем при использовании марковских (а тем более – детерминированных) методов.

Программа «Имитационная модель работы экскаваторно-автомобильного комплекса разреза» защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014616483 от 25.06.2014.

Разработанные имитационная модель, алгоритм и программа могут быть использованы для моделирования погрузочно-транспортных процессов ЭАК и других разрезов. Для этого требуется лишь статистический анализ временных ха-

рактистик: времени погрузки, движения с грузом и без груза и др. для условий конкретного предприятия.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что традиционные детерминированные и марковские методы непригодны для исследования процессов в карьерных ЭАК. Их использование приводит либо к завышению (марковский метод), либо к занижению (детерминированные методы) производительности ЭАК. Неадекватность детерминированных и марковских методов устраняется применением имитационного моделирования.

2. Погрузочно-транспортный процесс в ЭАК разрезов по своей природе является дискретно-событийным и вероятностным, поэтому для его исследования разработана дискретно-событийная имитационная модель. Доказано, что для описания вероятностно-распределённых временных параметров предпочтительным является гамма-распределение.

3. В качестве критериев эффективности диспетчеризации предлагаются: на верхнем уровне – выполнение экскаваторами плана погрузки, соответствующего оптимальному решению ПЦМ; на нижнем – минимальные финансовые потери от простоев карьерных экскаваторов и самосвалов, определяемые через условную стоимость недобытого угля.

4. При принятии текущих решений по распределению карьерных самосвалов учитываются предлагаемые в работе параметры приоритетности маршрутов, определяемые в результате многокритериального ИМ и оказывающие существенное влияние на текущее распределение. При моделировании учитываются: мощности экскаваторов; соответствие карьерных экскаваторов и самосвалов друг другу; расстояния транспортирования; скоростные характеристики карьерных самосвалов, зависящие от их технического состояния и квалификации водителей; возможность и закономерности отказов и восстановления работоспособности оборудования; показатели внешней горной среды.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА «КЕДРОВСКИЙ»

4.1 Анализ результатов имитационного моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса

4.1.1 Определение оптимальной организации функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса и структуры парков горной техники

Для проверки разработанных моделей и алгоритмов, а также сравнения полученных результатов с фактическими данными разреза «Кедровский», было проведено имитационное моделирование работы ЭАК для конкретных условий эксплуатации и различных сочетаний парков карьерных самосвалов и экскаваторов.

В соответствии с задачами исследования, сформулированными в п. 2.1, моделировалось три варианта организации работы ЭАК.

1. ЭАК работает по закрытому циклу, карьерные самосвалы перераспределяются только в случае поломок экскаваторов. Перераспределение осуществляется, если поломка достаточно серьёзная, и ожидаемое время восстановления машины выйдет за пределы текущей смены. Минимизация простоев оборудования достигается за счёт выбора оптимального количества работающих самосвалов.

2. ЭАК работает по открытому циклу (без деления на группы диспетчеризации). Минимизация простоев оборудования достигается за счёт оптимизации распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки. Распределение осуществляется по критерию (3.16).

3. ЭАК работает по комбинированному циклу (с делением на группы диспетчеризации). Принцип оптимизации сходен с вариантом открытого цикла.

Для более полного анализа влияния способа организации работы ЭАК на её эффективность проводились исследования не только для смешанных, но и для однородных экскаваторных парков, а также недогруженных и перегруженных карьерных парков.

ерными самосвалами систем. В качестве критерия эффективности использовался минимум потерь от простоев оборудования.

На рисунках 4.1 – 4.4 сравниваются закрытый и комбинированный циклы работы ЭАК для групп диспетчеризации №1 (рисунки 4.1 и 4.2) и №2 (рисунки 4.3 и 4.4).

Различие ГД №1 и №2 состоит в том, что в ГД №1 экскаваторы близки по мощности, а в ГД №2 – существенно различаются. Оценка качества динамического распределения машин проводилась по критерию (3.18). Стоимости 1 часа простоев карьерных экскаваторов для разреза «Кедровский» составляют: Р&Н-2800 – 136,7 тыс. руб.; ЭКГ-15 – 70,8 тыс. руб.; ЭКГ-12ус – 53,3 тыс. руб.; карьерных самосвалов БелАЗ-75306 – 17,5 тыс. руб.

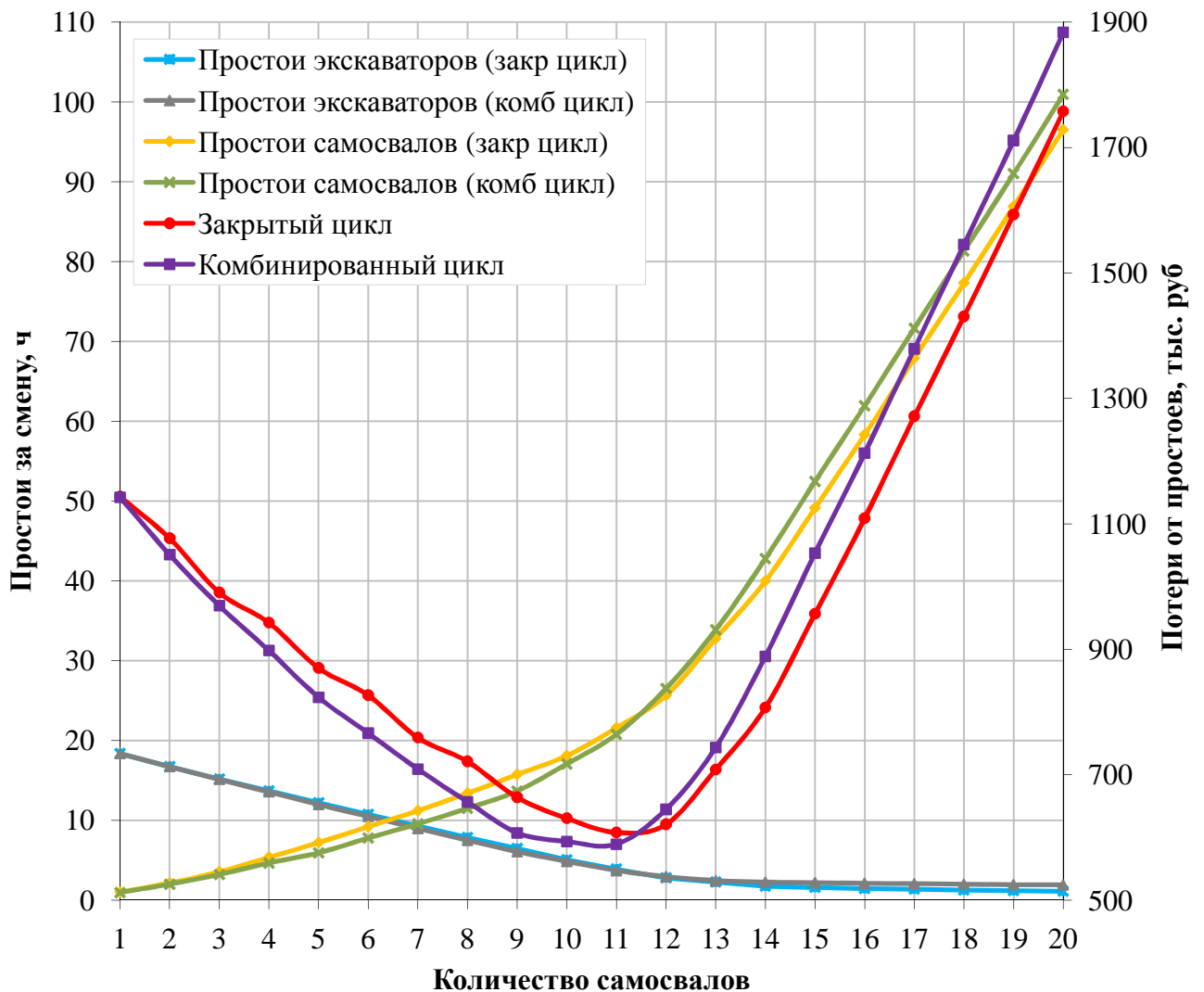


Рисунок 4.1 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (ГД №1)

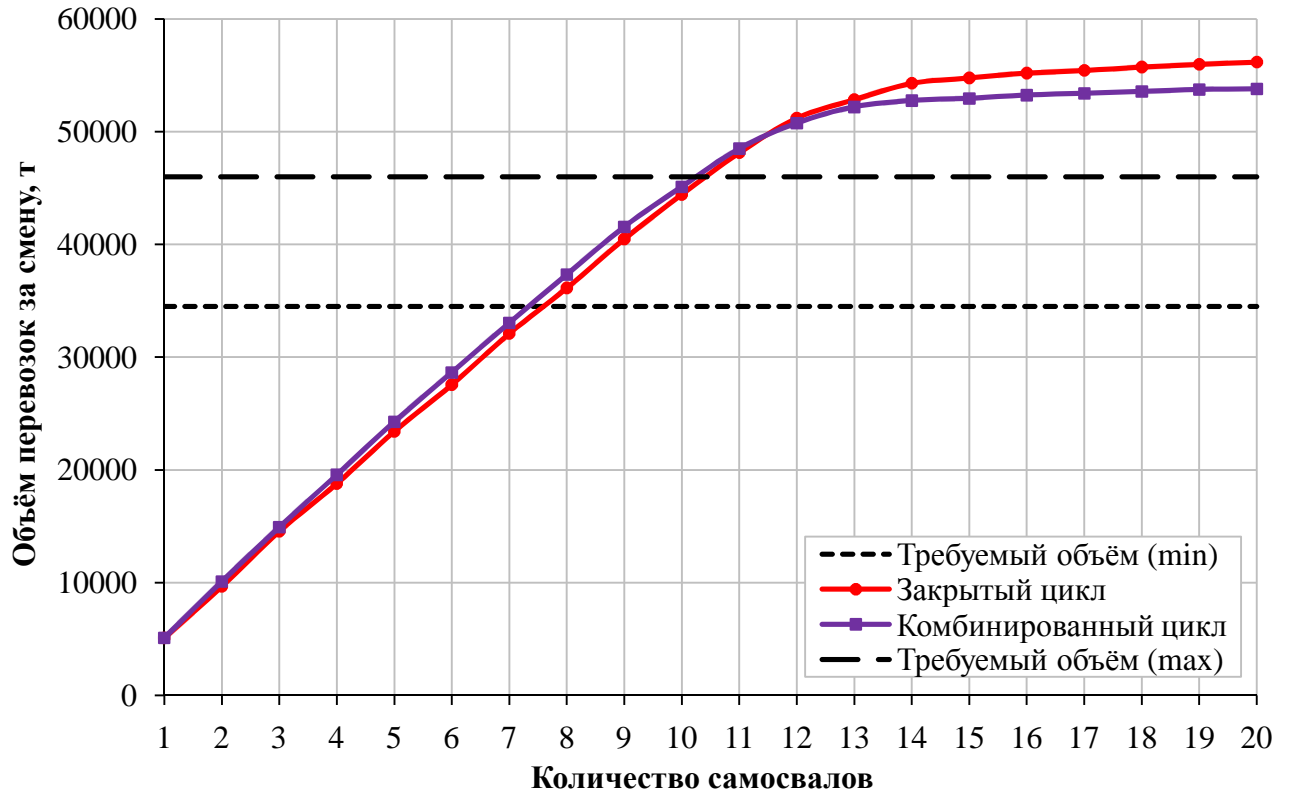


Рисунок 4.2 – Зависимость сменного объёма перевозок от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (ГД №1)

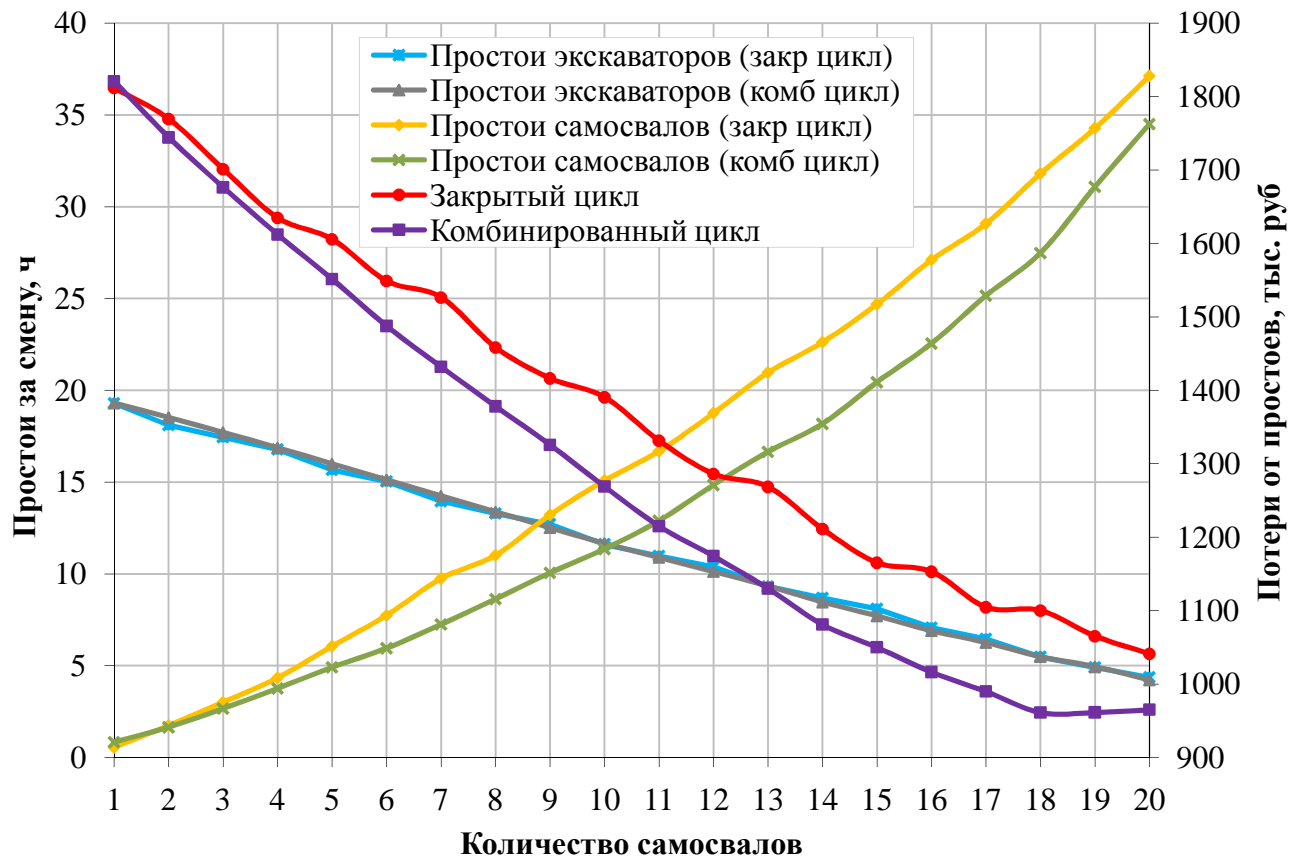


Рисунок 4.3 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (ГД №2)

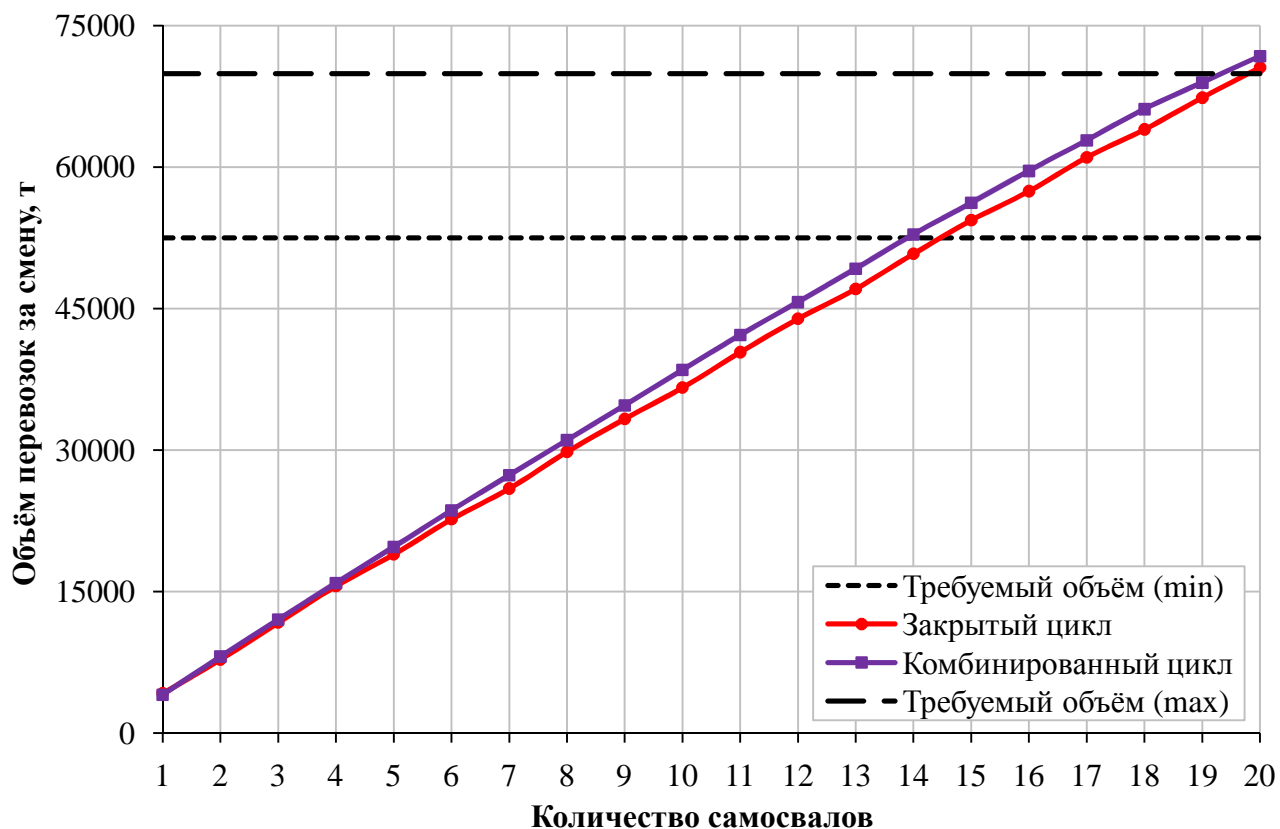


Рисунок 4.4 – Зависимость сменного объема перевозок от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (ГД №2)

Как видно из графиков, в плане сокращения потерь от простоев комбинированный цикл по сравнению с закрытым циклом является предпочтительным, причём величина экономии зависит от мощности работающих в группе экскаваторов. Для ГД №1 (ЭКГ-15 №42, ЭКГ-12ус №12) экономия по сравнению с закрытым циклом колеблется от 0 до 9,0% (среднее – 4,5%), а после 11 самосвалов вообще может стать отрицательной, что свидетельствует о перегруженности группы самосвалами. Если в группе работает 12 и более самосвалов (такое возможно в случае производственной необходимости, например, при срочном заказе на партию угля), то работу выгоднее организовывать по закрытому циклу, при котором потери от простоев оборудования в среднем на 7,7% меньше, чем при комбинированном. При оптимальном для комбинированного цикла количестве самосвалов экономия составляет 3,1%.

В плане производительности ЭАК, выражаемой ожидаемым объемом перевозок за смену, комбинированный цикл практически не даёт преимуществ над за-

крытым циклом. До 11 самосвалов превышение составляет в среднем 2,8%; после 11 – снижение производительности максимально до 4,2%. Объясняется это тем, что принятый в работе генеральный критерий оптимизации требует не максимизации производительности, а минимизации потерь от простоев. Минимизация же простоев не всегда означает рост производительности. При работе по комбинированному циклу самосвал может быть направлен к разным экскаваторам, расположенным на разном расстоянии от пункта разгрузки (отвала). Порожний самосвал, двигаясь по более длинному маршруту, формально не простаивает, но за смену успевает сделать меньше рейсов, чем если бы он в течение всей смены работал на одном маршруте. При значительной разнице в длинах маршрутов снижение производительности может быть довольно значительным. Тем не менее, при оптимальном и для закрытого, и для комбинированного цикла количестве самосвалов (11) рост производительности составляет 0,8%.

При большой разнице в мощности экскаваторов, имеющей место в ГД №2 (P&H-2800 №152, ЭКГ-12ус №9), экономия по сравнению с закрытым циклом более заметна: при оптимальном количестве самосвалов (18) она составляет 12,6%.

Оценка по коэффициенту эксплуатационной производительности ЭАК (зависимость (2.2)) даёт его увеличение на 0,94 и 2,65% для ГД №1 и ГД №2 соответственно.

Производительность ЭАК по сравнению с закрытым циклом всегда выше (при оптимальном количестве самосвалов – на 3,4%). Результат по ГД №2 несколько лучше, чем по ГД №1; объясняется это тем, что в ГД №2 разница между средними длинами маршрутов транспортирования меньше (0,25 км против 0,79 км в ГД №1). Это подтверждает тезис о том, что экскаваторы, действующие в одной группе и работающие на один и тот же отвал, не должны быть слишком удалены друг от друга.

Работа по комбинированному циклу в ГД №1 позволяет выполнить минимальный план погрузки и вывоза горной массы (см. п. 2.2) с тем же количеством самосвалов (8), что и при работе по закрытому циклу, однако потери от простоев при этом будут на 9,0% меньше.

Комбинированный цикл в ГД №2 позволяет выполнить план погрузки и вывоза горной массы при 14 самосвалах, тогда как закрытый цикл – только при 15. Налицо экономия в один самосвал. Снижение потерь от простоев при этом составляет 7,2%.

На рисунках 4.5 – 4.6 сравниваются комбинированный и открытый (без деления на группы диспетчеризации) циклы работы ЭАК. Из графиков видно, что открытый цикл оказывается хуже комбинированного максимально на 3,7%, что составляет ~ 57 тыс. рублей (полученное небольшое преимущество открытого цикла на отрезке 6-13 самосвалов – 0,2-1,1% – может быть оценено как погрешность расчётов). В плане производительности различий между открытым и комбинированным циклом практически нет.

В то же время и открытый, и тем более комбинированный циклы однозначно предпочтительнее, чем закрытый. Преимущество комбинированного цикла над закрытым (в плане сокращения потерь от простоев) составляет до 6,8%; открытого – до 3,7%.

Отсюда следует вывод о том, что комбинированный цикл работы ЭАК по сравнению и с закрытым, и с открытым циклом, является предпочтительным. Поэтому далее будет рассматриваться только комбинированный цикл.

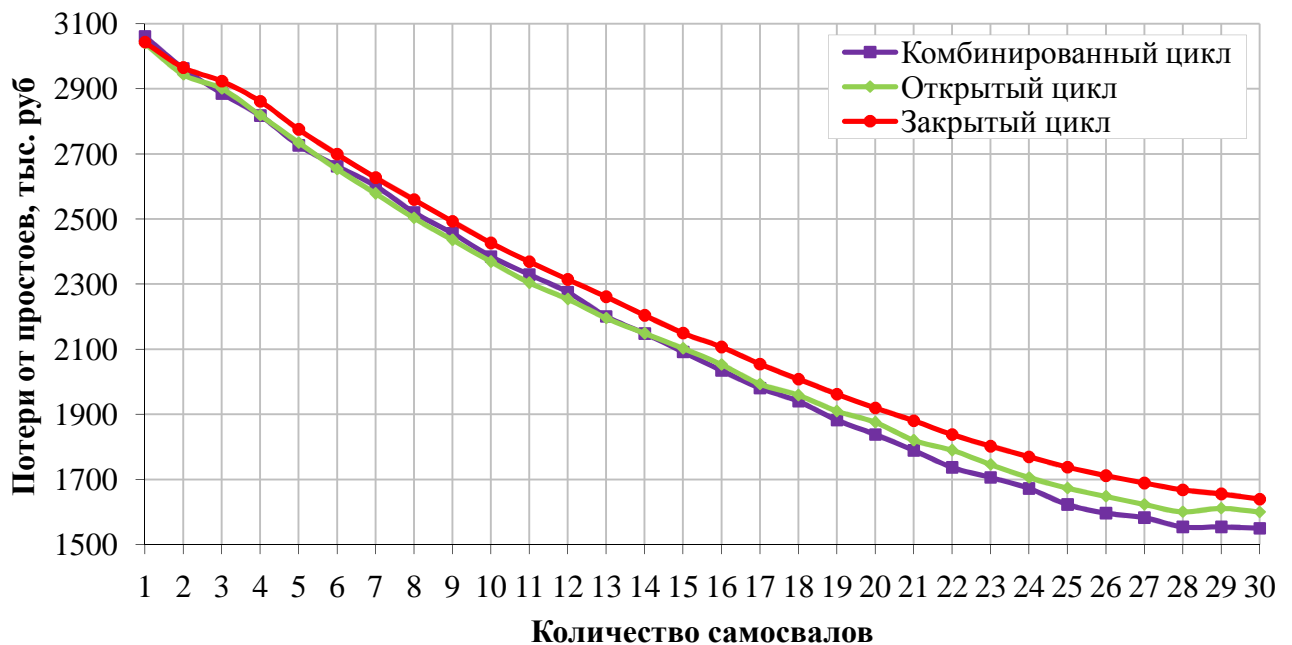


Рисунок 4.5 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при открытом и комбинированном циклах работы (ГД №1 и №2)

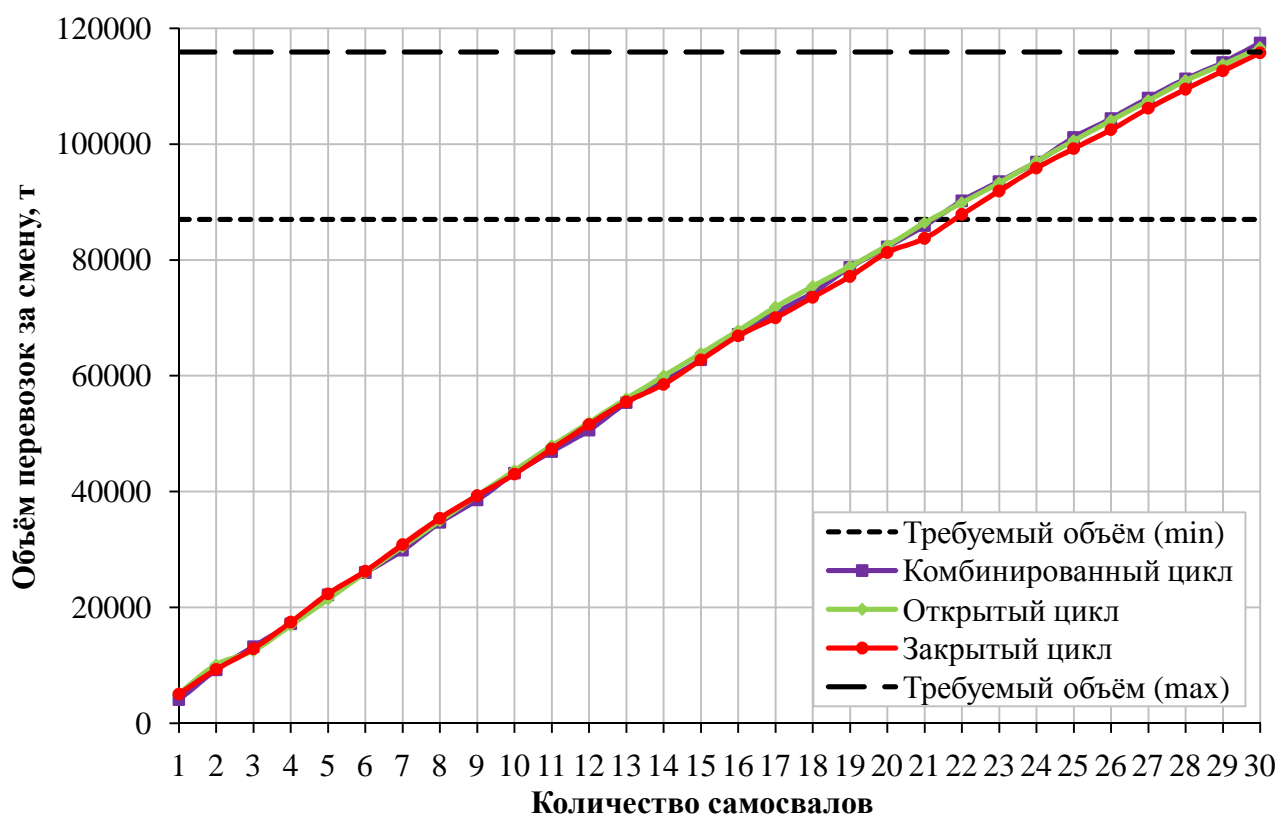


Рисунок 4.6 – Зависимость сменного объема перевозок от количества самосвалов при открытом и комбинированном циклах работы (ГД №1 и №2)

Итак, на разрезе «Кедровский» рекомендуется работу ЭАК осуществлять по комбинированному циклу с разделением на две группы диспетчеризации.

Следующая задача – исследование влияния структуры парка экскаваторов на эффективность работы групп диспетчеризации и ЭАК в целом.

На рисунках 4.7 и 4.8 сравниваются случаи разномарочного (смешанного) состава экскаваторов в ГД №1 (ЭКГ-15 и ЭКГ-12ус) и их однородного состава (оба экскаватора – модели ЭКГ-15, то есть суммарная мощность экскаваторов незначительно возрастает). При однородном составе ГД №1 до 12 самосвалов потери от простоев выше, чем при смешанном (максимально до 17,9%); затем, после «точки перегруженности» группы самосвалами – ниже (максимально до 5,6%). Производительность ЭАК при однородном парке экскаваторов выше, чем при смешанном (до 5,3%); при оптимальном количестве самосвалов – 11 – на 2,6%.

Преимущества однородного парка объясняются тем, что при росте мощности экскаваторов (оба экскаватора – ЭКГ-15) самосвалы загружаются быстрее, а значит, их простои уменьшаются. Правда, заметно это лишь при достаточном ко-

личестве самосвалов (в данном случае – 12 и более). При меньшем количестве преимуществ однородного парка перед смешанным нет, поскольку начинает влиять увеличение простоев экскаваторов.

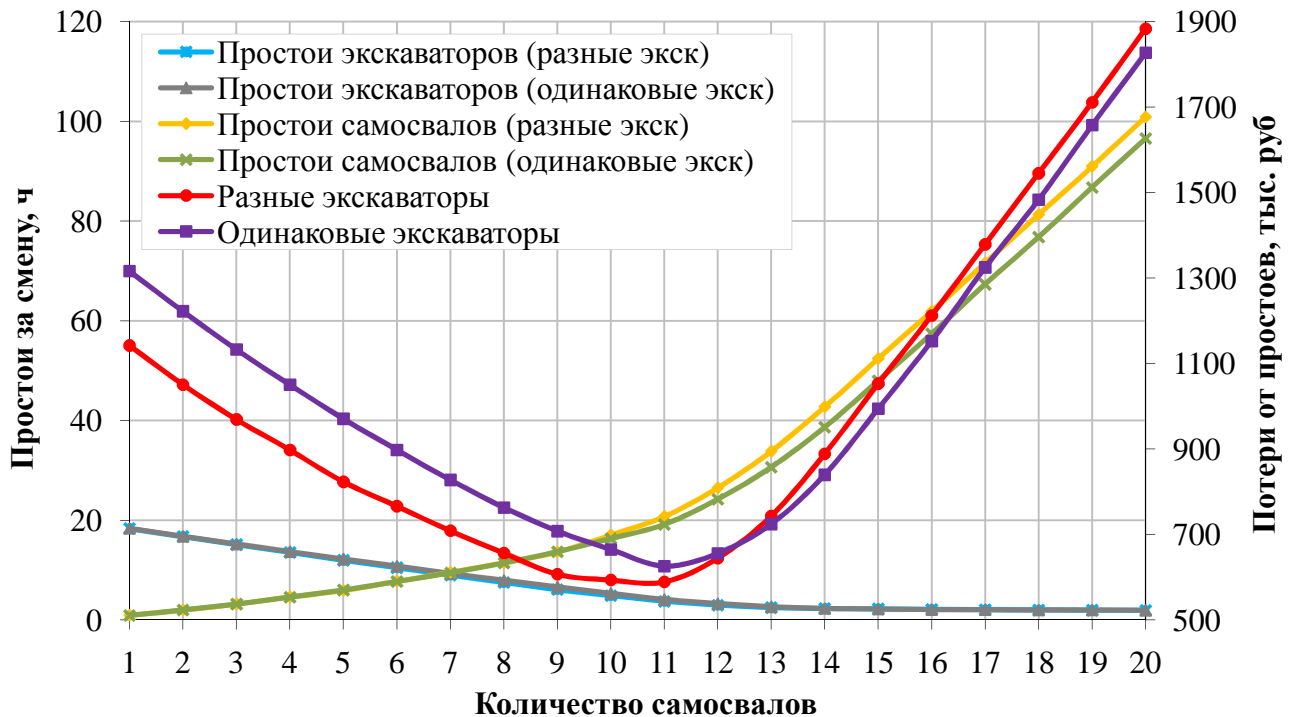


Рисунок 4.7 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭКГ-15)

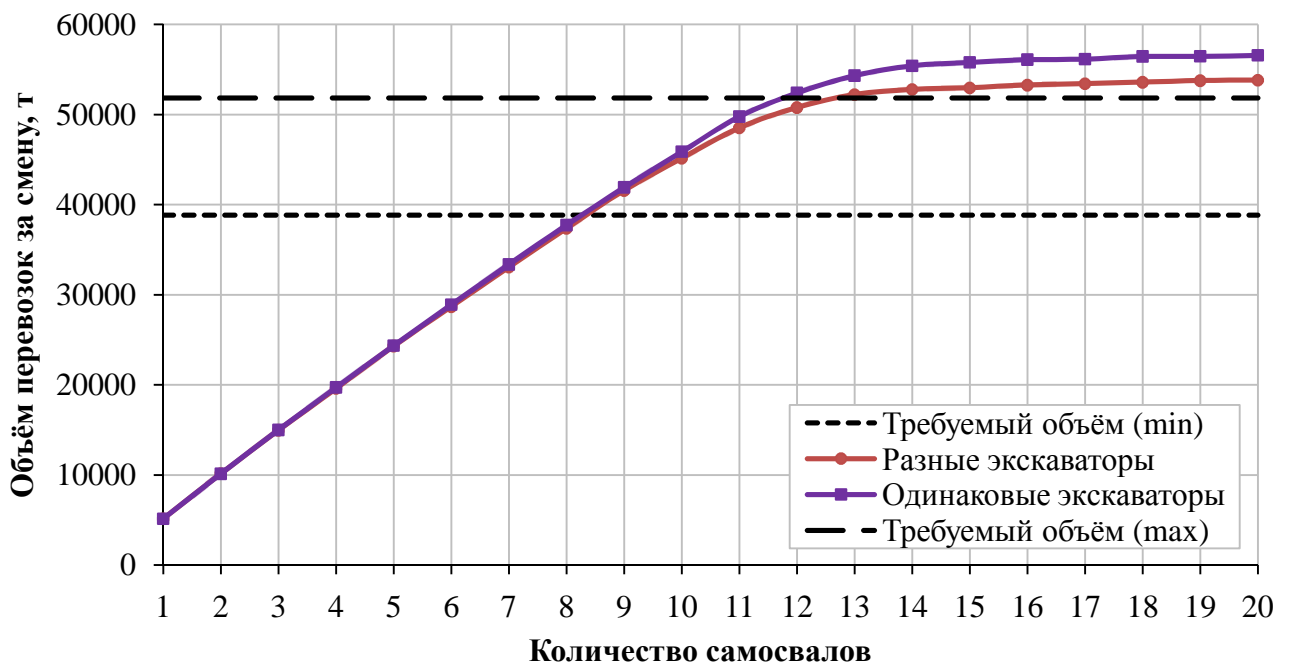


Рисунок 4.8 – Зависимость сменного объема перевозок от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭКГ-15)

Графики, приведённые на рисунках 4.9 и 4.10, подтверждают этот вывод. В случае работы в ГД №1 двух одинаковых экскаваторов модели ЭКГ-12ус (то есть при небольшом снижении суммарной мощности экскаваторов) ситуация обратная: теперь потери от простоев оборудования при одинаковых экскаваторах сначала ниже (до 13%), а после «точки перегруженности» группы (12 самосвалов) – увеличиваются (до 6,1%).

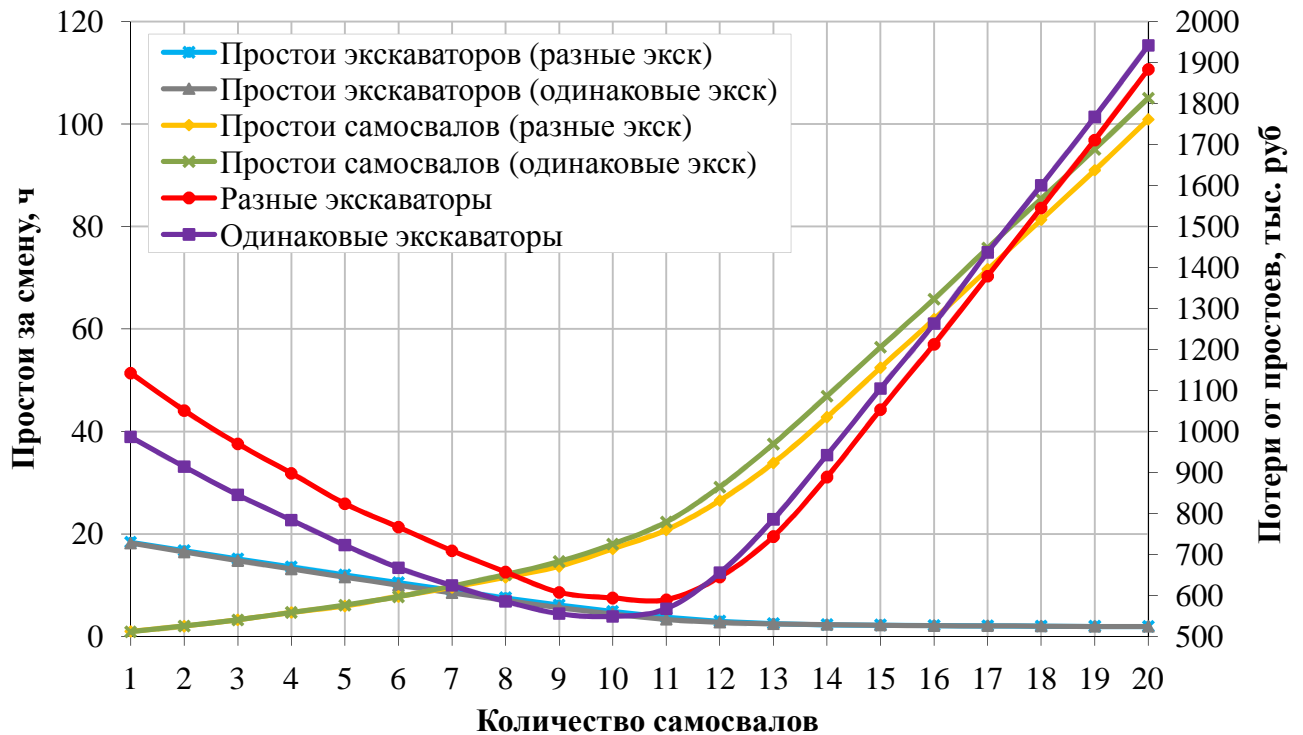


Рисунок 4.9 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭКГ-12ус)

Производительность ЭАК для однородного парка ниже, чем смешанного (до 5,4%). Причина состоит в том, что при работе экскаваторов меньшей мощности увеличивается время загрузки ими самосвалов, что приводит к увеличению простоев последних. Простои экскаваторов несколько снижаются, но это обстоятельство не способно исправить ситуацию из-за большой разницы в величинах суммарных сменных простоев (4 часа простоев экскаваторов против 35 часов простоев карьерных самосвалов). При оптимальном количестве самосвалов (10) по потерям от простоев лучше однородный парк экскаваторов (на 7,5%), по производительности – смешанный (на 2,4%).

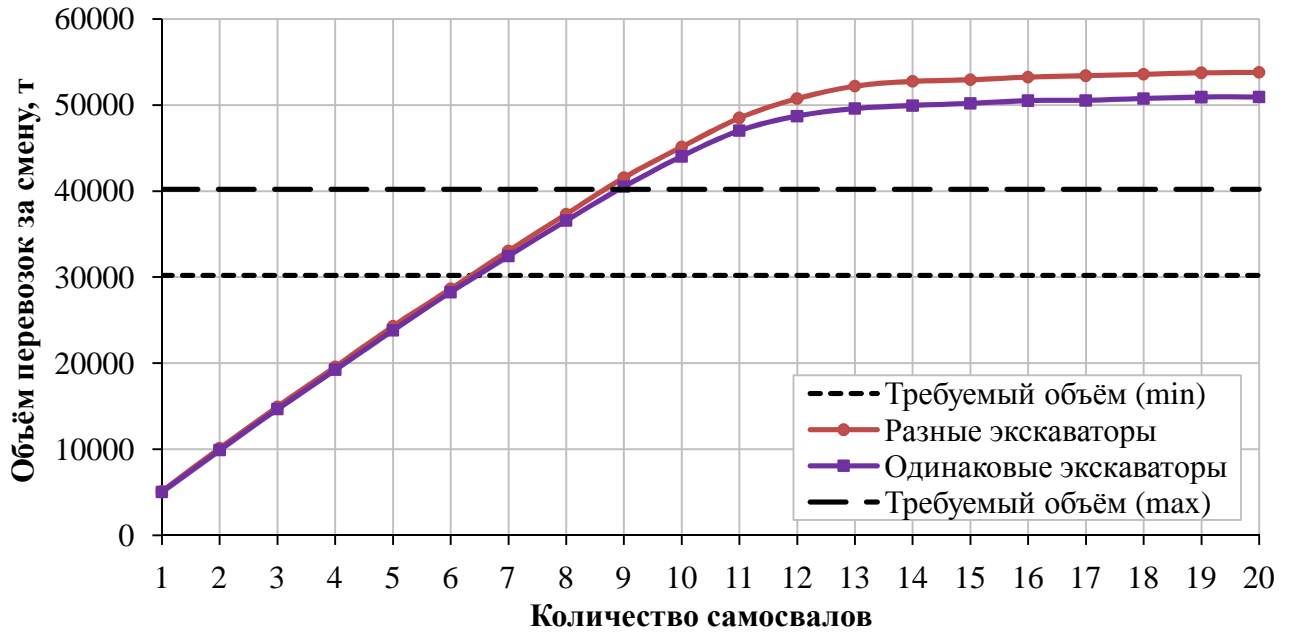


Рисунок 4.10 – Зависимость сменного объёма перевозок от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭЖГ-12ус)

На рисунках 4.11 и 4.12 сравниваются случаи разномарочного состава экскаваторов в ГД №2 и их однородного состава (оба экскаватора – модели Р&Н-2800, то есть суммарная мощность экскаваторов увеличивается значительно).

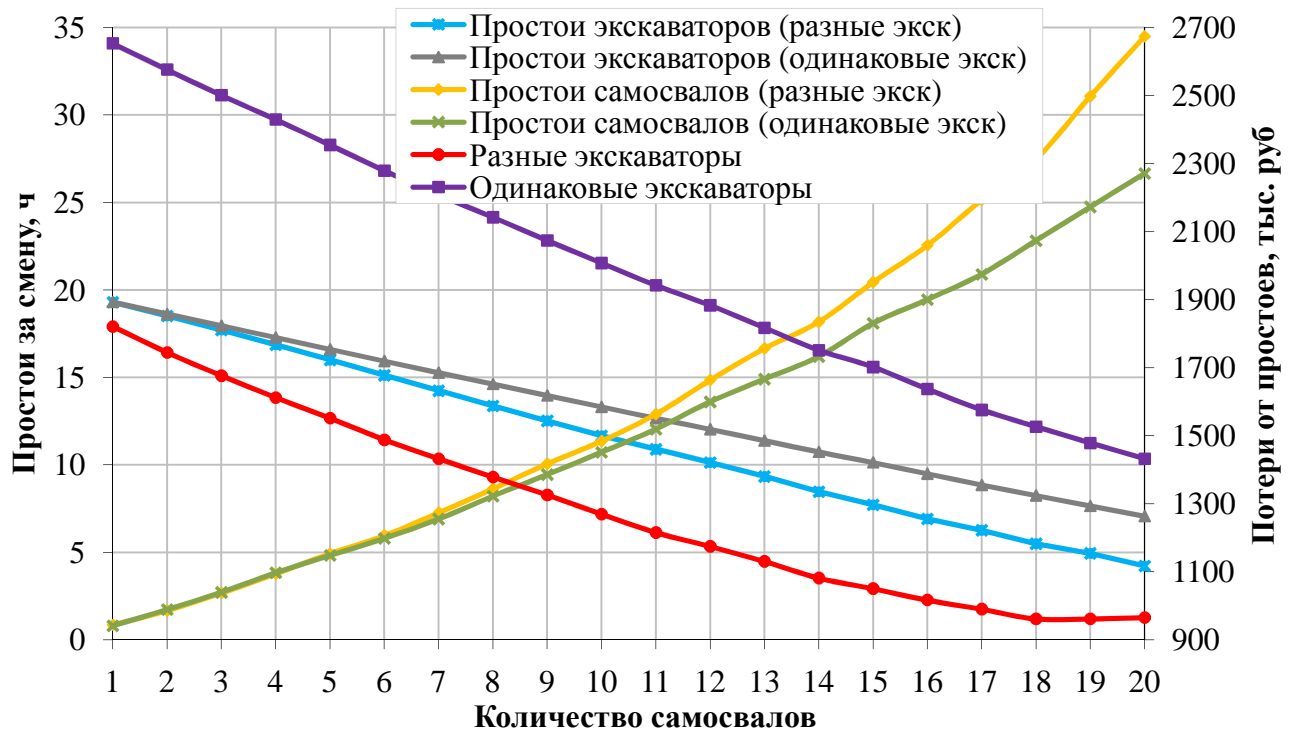


Рисунок 4.11 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели Р&Н-2800)

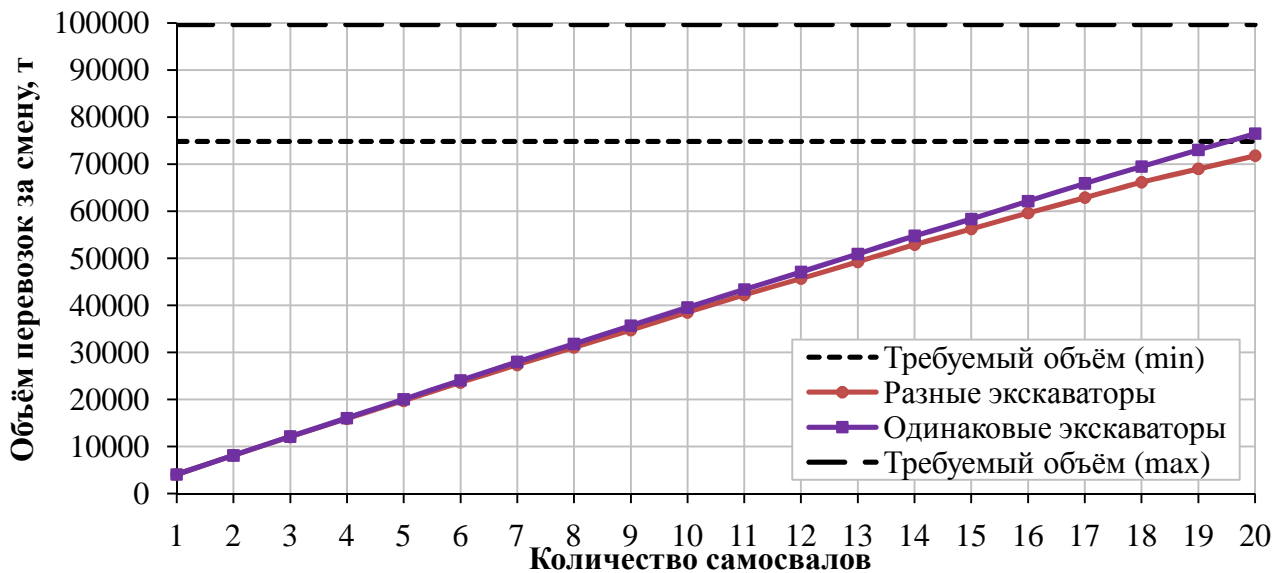


Рисунок 4.12 – Зависимость сменного объёма перевозок от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели Р&Н-2800)

Ситуация во многом схожа с ГД №1, вся разница лишь в величине роста потерь от простоев (до 62% при однородном парке) и повышения производительности (до 6,5%). Такая разница объясняется большим «перекосом» мощностей (а значит, и стоимостей простоев) экскаваторов Р&Н-2800 и ЭКГ-12ус.

В том случае, если оба экскаватора в ГД №2 – модели ЭКГ-12ус (рисунки 4.13 и 4.14), то есть при резком сокращении суммарной мощности экскаваторов, ситуация практически аналогична ГД №1. Сначала (до 18 самосвалов) потери от простоев для однородного парка ниже, чем для смешанного (до 47,3%), после 18 самосвалов – выше (до 33,8%). Производительность однородного парка ниже всегда – от 6,5 до 24,2%. Причины – те же.

Таким образом, если смешанный парк экскаваторов сравнивается с однородным, суммарная мощность которого незначительно выше мощности смешанного, выгоднее использовать однородный парк; если ниже – смешанный. Если суммарная мощность однородного парка существенно выше мощности смешанного, ситуация меняется на прямо противоположную.

Исследования показали, что величины простоев карьерных самосвалов и экскаваторов зависят от количества самосвалов в составе ЭАК нелинейно, причём с ростом этого количества простои экскаваторов, как правило, снижаются, а про-

стои самосвалов – увеличиваются. Зависимости суммарных потерь за смену от количества самосвалов в ЭАК всегда имеют минимум. Соответствующее этому минимуму количество самосвалов является оптимальным для соответствующих условий и критериев оценки эффективности функционирования ЭАК.

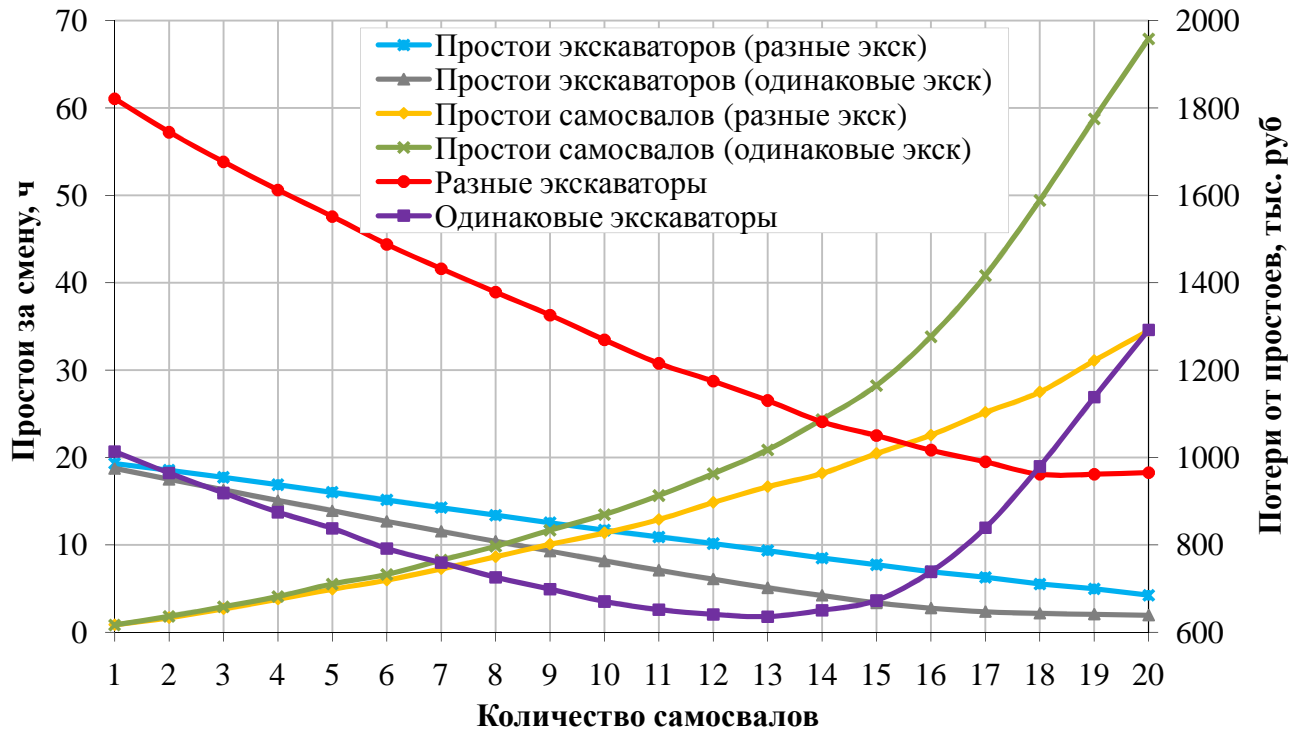


Рисунок 4.13 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели ЭКГ-12ус)

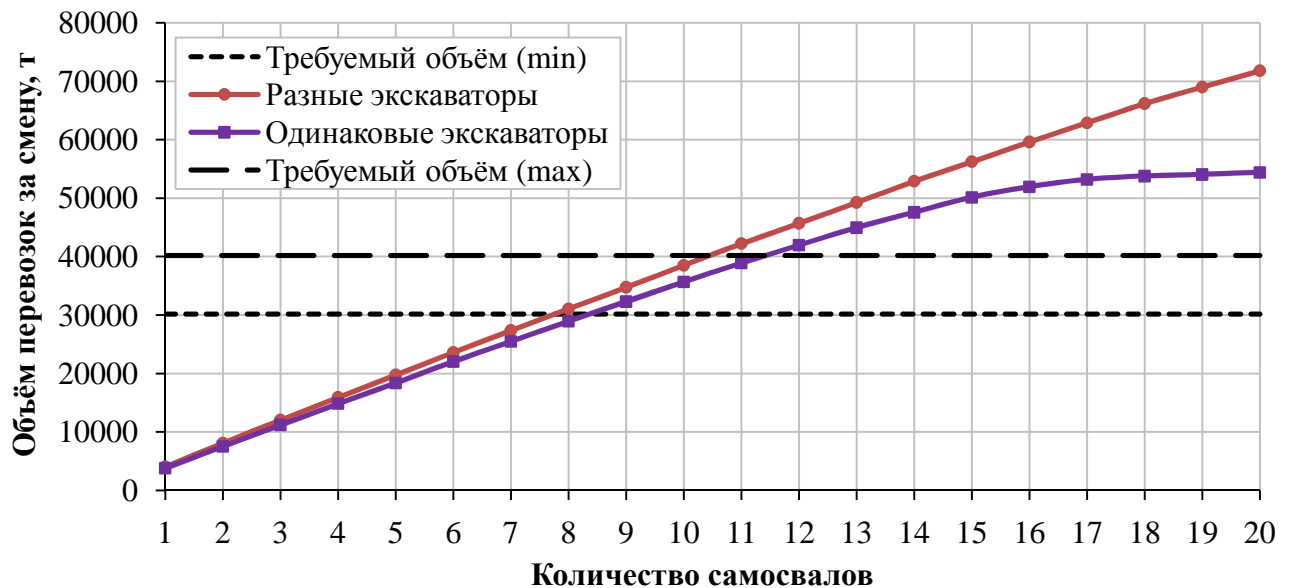


Рисунок 4.14 – Зависимость сменного объема перевозок от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного и смешанного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели ЭКГ-12ус)

Слева от минимума располагается зона недогруженности ЭАК самосвалами, справа – перегруженности. В обоих случаях потери от простоев возрастают: в случае недогруженности – за счёт простоев экскаваторов, в случае перегруженности – самосвалов. Можно отметить также, что в зоне перегруженности потери растут интенсивнее, чем в зоне недогруженности. Объясняется это тем, что с появлением в ЭАК новых карьерных самосвалов резко возрастают простои их в очередях и объём горной массы, которую они могли бы вывезти, а значит, и финансовые потери, несмотря на то, что простой экскаватора стоит дороже простоя самосвала. Как уже указывалось выше, соотношение простоев самосвалов и экскаваторов на разрезе «Кедровский» составляет 4:35, то есть на каждый час простоев экскаваторов приходится почти 9 часов простоев самосвалов.

Для разреза «Кедровский» оптимальное количество самосвалов для рекомендованного комбинированного цикла работы ЭАК составляет: для ГД №1 – 11, для ГД №2 – 18. Как было указано в гл. 2, на экскаваторы, задействованные в ГД №1, приходится 6 самосвалов БелАЗ-75306; на экскаваторы ГД №2 – 10 самосвалов, то есть имеет место явно выраженная недогруженность обеих групп диспетчеризации самосвалами. Об этом же свидетельствует и индикатор оптимальности структуры парков горной техники – сравнительный фактор F . Его величина для фактических парков разреза «Кедровский» составляет 0,49 и 0,48 для ГД №1 и ГД №2 соответственно (таблица 2.12). Это означает, что интенсивность поступления самосвалов в 2 раза ниже, чем интенсивность их обслуживания экскаваторами. Попробуем проверить оптимальность количества самосвалов, установленную в результате ИМ, при помощи фактора F . Результаты расчётов приведены в таблице 4.1.

Рассчитанные значения сравнительного фактора значительно ближе к идеальному значению $F = 1$. То, что полученные значения всё-таки меньше единицы, несмотря на оптимальность решения, обусловлено тем, что критерием оптимизации парка самосвалов в данной работе является не максимум их производительности, а минимум потерь от простоев.

Таблица 4.1 – Результаты расчёта фактора F для оптимального парка самосвалов

Показатели	Пары «экскаватор-самосвал»			
	ГД №1		ГД №2	
	ЭКГ-15 №42 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №12 – БелАЗ-75306	P&H-2800 №152 – БелАЗ-75306	ЭКГ-12ус №9 – БелАЗ-75306
Оптимальное количество самосвалов	11		18	
Время загрузки самосвала экскаватором, $t_{пij}^э$, мин	4,22	4,68	2,23	4,38
Время цикла самосвала, $t_{ц}^c$, мин	23,28	25,51	29,53	32,46
Усреднённое время цикла самосвала, $\bar{t}_{ц}^c$, мин	24,4		31,0	
НОК времени погрузки, Z_{t_n} , мин ²	987,48		976,74	
$\sum_j \left[\frac{N_{эj} \cdot Z_{t_n}}{t_{пj}^э} \right]$	445		661	
Сравнительный фактор F	0,98		0,86	

На это в горной промышленности часто идут, как уже указывалось в гл. 2, для того чтобы уменьшить парк самосвалов, а значит и капитальные, и эксплуатационные затраты на них. А сравнительный фактор F является как раз индикатором оптимальности соотношения производительностей самосвалов и экскаваторов. Если бы максимизировалась производительность, оптимальное количество самосвалов в ГД было бы другим (большим).

4.1.2 Исследование приоритетности экскаваторов (маршрутов)

Зависимость приоритетности различных экскаваторов (и соответствующих маршрутов) от количества самосвалов при работе разномарочного парка экскаваторов по комбинированному циклу приведена на рисунках 4.15 – 4.16. Несмотря на то, что параметр приоритетности – величина нестабильная (ввиду вероятностных колебаний времени) и может изменяться от одного запуска имитационной модели к другому, некоторые общие тенденции проследить всё же возможно.

Зависимость для ГД №1 представлена на рисунке 4.15. Более мощный экскаватор ЭКГ-15 №42 сначала (до точки в 13 самосвалов) по приоритетности имеет

хоть и небольшое, но всё же преимущество перед вторым экскаватором – ЭКГ-12ус №12. Объясняется это просто: чем мощнее экскаватор, тем быстрее он осуществляет загрузку самосвалов и тем быстрее освобождается. А чем меньше время освобождения экскаватора, тем меньше значение критерия принятия решений (см. зависимость (3.16)), что и требуется. Особенно это заметно при небольшом количестве самосвалов, поскольку при этом время освобождения экскаваторов достаточно мало, и числитель в критерии принятия решений (3.16) зачастую приравнивается к δ (если время освобождения экскаватора меньше времени движения до него). В таком случае на первый план выходят стоимости простоев экскаваторов: простой ЭКГ-15, как более мощного, стоит больше, и итоговые потери от простоев будут тем меньше, чем меньше будет простаивать этот более мощный экскаватор. Следовательно, к нему нужно отправлять больше самосвалов.

В диапазоне 13-16 самосвалов, когда самосвалов хотя и больше, чем нужно (оптимум – 11 машин), но ещё не намного, появляются различные варианты: где-то приоритетен более мощный экскаватор, где-то менее мощный, а где-то приоритета ни одного, ни другого нет вовсе. Это происходит потому, что при таком количестве самосвалов всё большую роль начинает играть не фактор потерь от простоев экскаваторов (они невелики) или фактор времени погрузки (он становится малозначимым), а третий фактор – расстояние перевозки. С увеличением длины маршрута растёт время возвращения порожнего самосвала к экскаватору, следовательно, уменьшается значение критерия принятия решений (3.16). Поэтому менее мощный экскаватор вполне может оказаться даже более приоритетным, если он расположен дальше от пункта разгрузки. Но это возможно только при небольшой разнице в мощности экскаваторов (например, ЭКГ-15 и ЭКГ-12ус).

После 16 самосвалов приоритетным становится снова более мощный экскаватор. Расстояние транспортирования снова становится малозначимым, на первый план выходит фактор времени погрузки.

В ГД №2 (рисунок 4.16) ситуация иная. Здесь экскаватор Р&Н-2800 №152 всегда предпочтительнее менее мощного ЭКГ-12ус №9 (на рассмотренном интервале количества самосвалов). Это объясняется большой разницей в мощности

экскаваторов: P&H-2800 загружает (и освобождается) настолько быстрее мало-мощного ЭКГ-12ус, что даже увеличение количества самосвалов и расстояния транспортирования не способны кардинально изменить ситуацию. В этих условиях в параметре приоритетности преобладающим становится фактор потерь от простоев экскаватора.

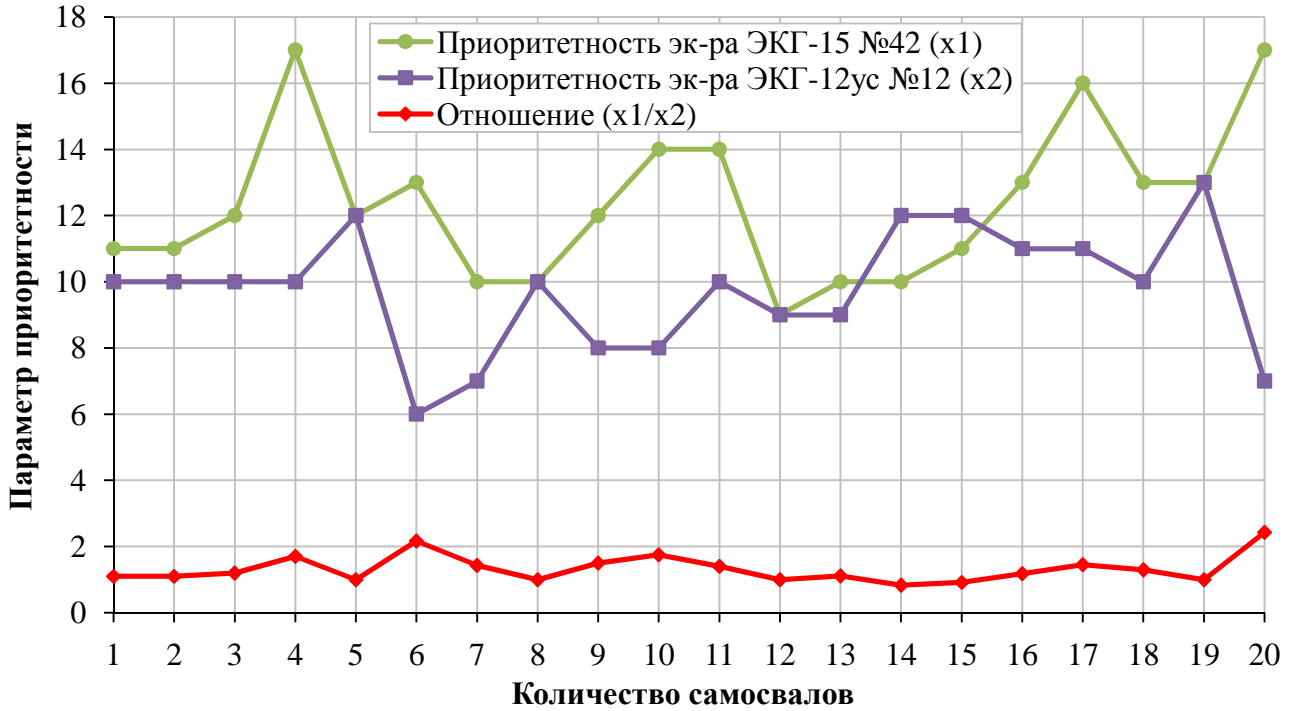


Рисунок 4.15 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы (ГД №1)

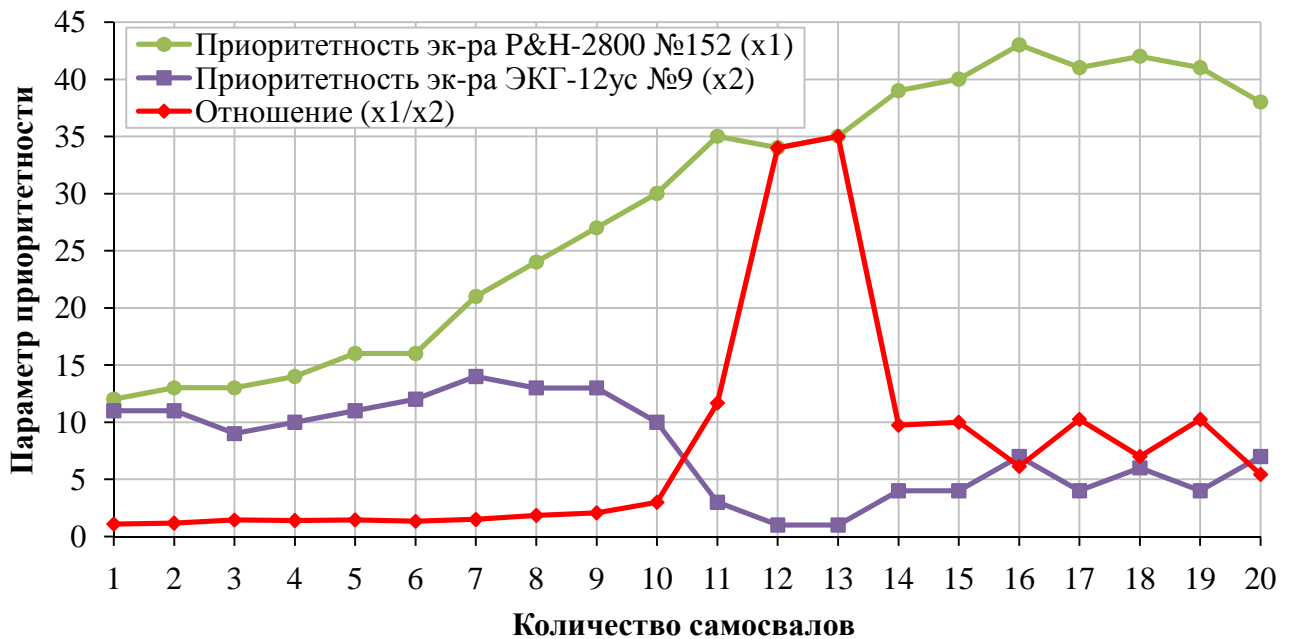


Рисунок 4.16 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы (ГД №2)

На рисунках 4.17 – 4.20 представлены зависимости приоритетностей различных экскаваторов (и соответствующих им маршрутов) от количества самосвалов при работе однородного парка экскаваторов по комбинированному циклу. Из графиков видно, что в большинстве случаев экскаватор, расположенный ближе к отвалу (при прочих равных условиях) заведомо приоритетен только при сравнительно небольшом количестве самосвалов, то есть при малой вероятности образования очередей. Затем, по мере увеличения количества самосвалов в ГД, происходит некий «перелом», после которого приоритетность ведёт себя по-разному.

Если однородный парк составляется из экскаваторов большей мощности (рисунок 4.17 для ГД №1 и рисунок 4.19 для ГД №2), приоритетным остаётся более близкий к отвалу экскаватор. Дело в том, что чем мощнее экскаватор и чем ближе он расположен к отвалу, тем он предпочтительнее в плане минимизации простоев самосвалов (поскольку освобождается быстрее). По мере роста числа самосвалов растёт вероятность их скапливания возле этого экскаватора, и тогда либо более приоритетным однозначно становится дальний экскаватор (рисунок 4.18), либо имеет место ситуация, при которой ни о какой закономерности в распределении приоритетностей говорить вообще не приходится (рисунок 4.20).

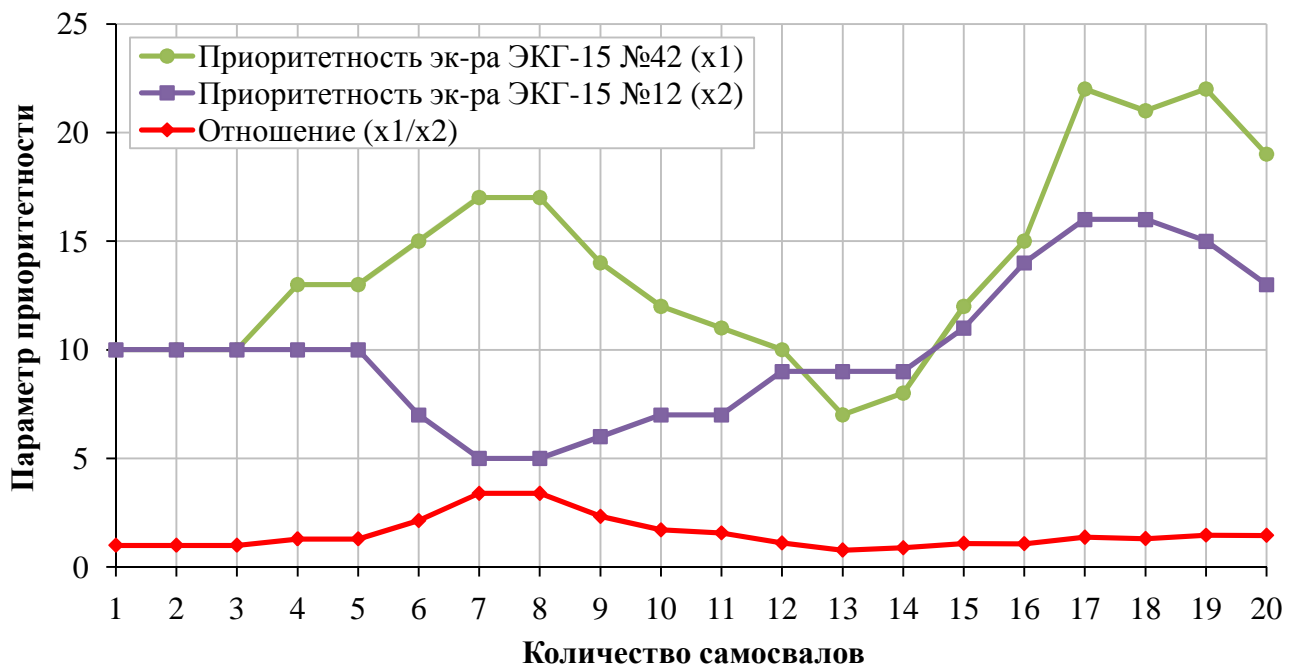


Рисунок 4.17 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭКГ-15)

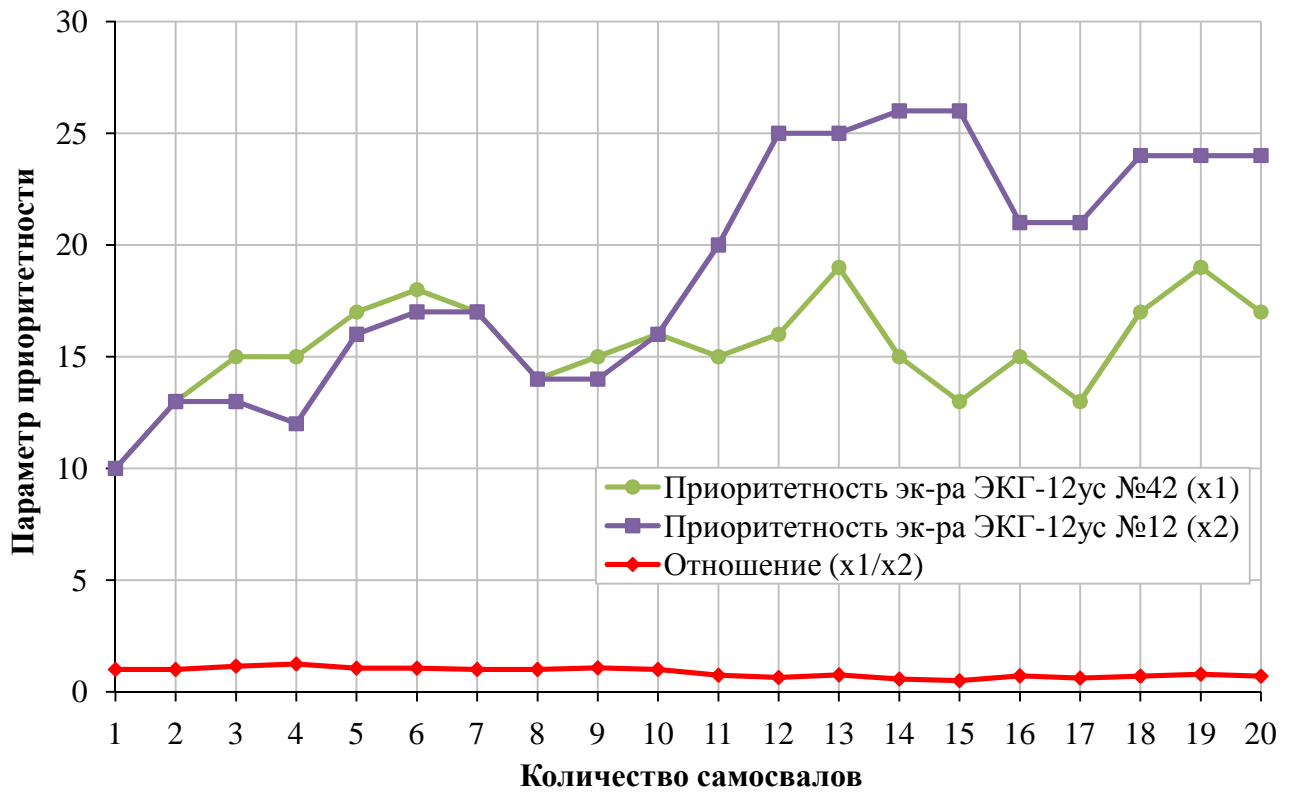


Рисунок 4.18 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного парка экскаваторов (ГД №1, оба экскаватора – модели ЭКГ-12ус)

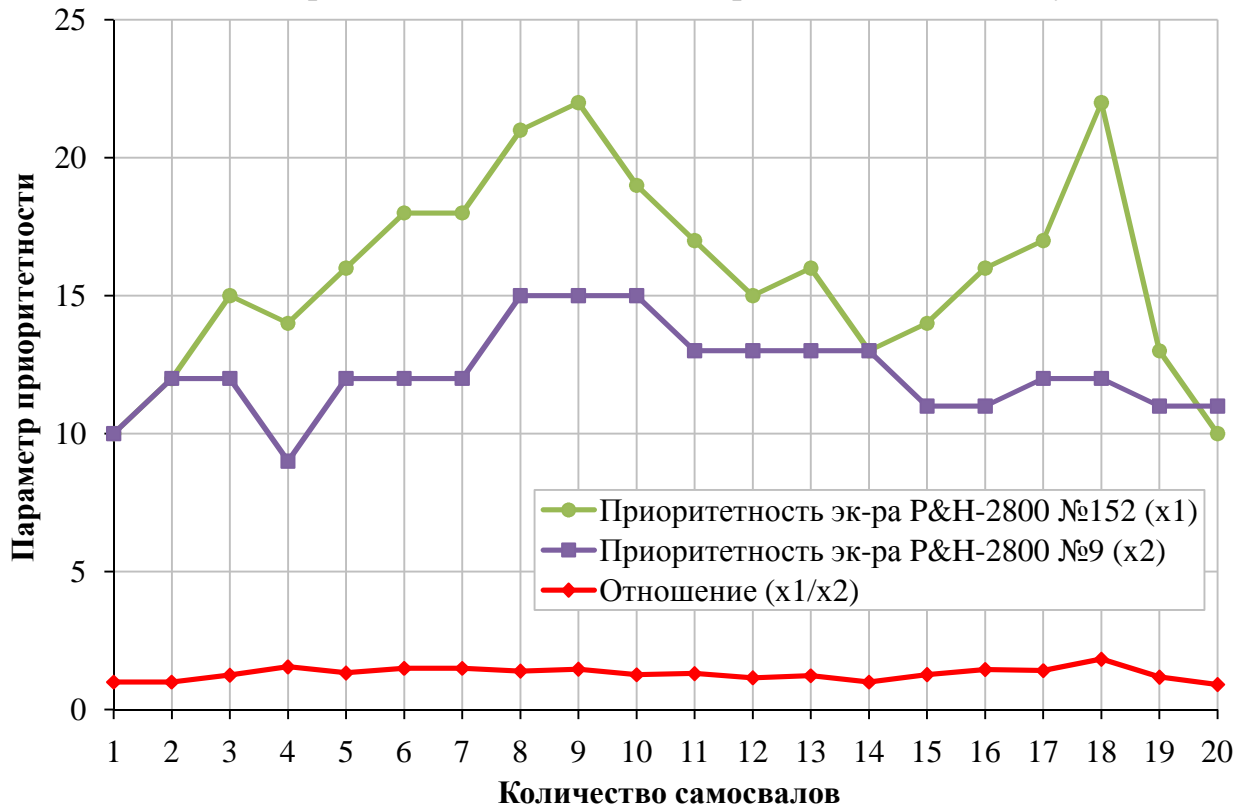


Рисунок 4.19 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели P&H-2800)

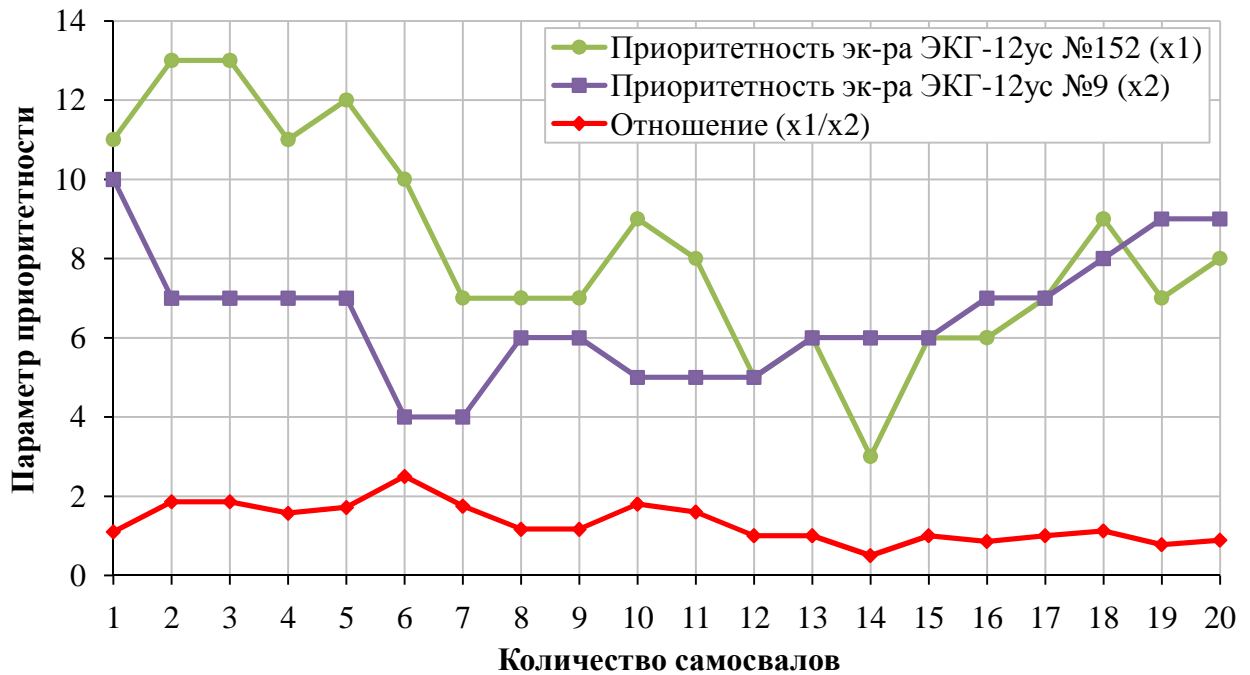


Рисунок 4.20 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для однородного парка экскаваторов (ГД №2, оба экскаватора – модели ЭКГ-12ус)

То, что после достижения точки «перелома» не просматривается уже никакой закономерности, объясняется тем, что преобладающих во влиянии на приоритетность факторов нет. Они фактически уравнивают друг друга, и нестабильность параметра приоритетности ввиду стохастических колебаний времени начинает проявлять себя в полной мере.

Так или иначе, введение понятия параметра приоритетности и учёт его влияния на критерий принятия решения по текущему распределению самосвалов, позволяет более полно учесть весь комплекс факторов, влияющих на эффективность функционирования ЭАК разреза.

4.2 Разработка рекомендаций по повышению эффективности функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса разреза

4.2.1 Особенности реализации алгоритма оптимального распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки

Непосредственное использование алгоритма оперативной диспетчеризации в предложенном виде внутри действующих АСД невозможно по причине того,

что в различных системах используются различные программные среды. Однако, имея алгоритм диспетчеризации, записанный в универсальной форме (в виде блок-схем), можно достаточно легко встроить его в практически любую систему диспетчеризации и даже расширить его возможности. Для этого действующая на предприятии АСД должна иметь:

- возможность встраивания в неё дополнительных модулей;
- функцию постоянного мониторинга транспортных и погрузочных средств, а также быстродействующие и надёжные средства связи для своевременной передачи диспетчерских указаний;
- функцию сбора и анализа статистических данных;
- вычислительные мощности, подходящие для непрерывного анализа меняющейся ситуации в карьере.

Работу ЭАК в условиях разреза «Кедровский» предполагается организовывать по комбинированному циклу. Вначале формируются группы диспетчеризации из нескольких экскаваторов, которые будут работать на один отвал (это может сделать диспетчер или сама система, если есть такая возможность). После этого вызывается имитационная программа, которая оценивает приоритетность различных маршрутов и выдаёт рекомендацию – сколько карьерных самосвалов использовать в каждой группе диспетчеризации. По ходу работы система непрерывно обрабатывает информацию о времени погрузки и пробегов, пересчитывая параметры гамма-распределения и непрерывно корректируя приоритетности маршрутов. АСД автоматически вычисляет критерии распределения транспорта (принятия решений), исходя из текущей ситуации в карьере, и выдаёт диспетчеру (или непосредственно водителю самосвала) номер экскаватора, к которому нужно направить тот или иной самосвал.

Решение задачи распределения карьерных самосвалов проще всего продемонстрировать на примере группы диспетчеризации №1, состоящей из экскаваторов ЭКГ-15 №42 и ЭКГ-12 №12, а также отвала «Центральный» (рисунок 4.21). В группе работают однотипные самосвалы БелАЗ-75306. Среднее (фактическое) время загрузки у ЭКГ-15 №42 составляет 253 с (0,07 ч), время подъезда порожне-

го самосвала – 485 с (0,135 ч), стоимость 1 ч простоя – 70 800 руб. Время загрузки у ЭКГ-12 №12 – 281 с (0,078 ч), время подъезда порожнего самосвала – 522 с (0,145 ч), стоимость 1 ч простоя – 53 300 руб. Стоимость 1 ч простоя самосвалов БелАЗ-75306 – 17 500 руб.

На рисунке 4.21 показана примерная ситуация при принятии решения по распределению карьерного самосвала в случае фактической загруженности системы. В группе действует 9 самосвалов (по 2 порожних и по столько же гружёных на каждом маршруте, один ждёт указаний на отвале). Гружёные самосвалы на схеме не показаны, поскольку при принятии диспетчерского решения они не важны. У обоих экскаваторов находится под погрузкой по одному самосвалу; будем считать, что оба загружаемых самосвала поступили под погрузку только что (в реальных условиях степень загрузки можно отследить).

Согласно результатам имитационного моделирования, параметры приоритетности для экскаваторов ЭКГ-15 №42 и ЭКГ-12 №12 при 9 действующих карьерных самосвалах равны 12 и 8 соответственно.

Ожидаемое время подъезда (включая маневрирование) карьерного самосвала, уже направляющегося к экскаватору ЭКГ-15 №42 – 4 мин (0,067 ч). Это меньше ожидаемого времени загрузки самосвала, поэтому два цикла погрузки двух направленных к данному экскаватору самосвалов будут идти непрерывно. Следовательно, ожидаемое время освобождения данного экскаватора – 0,14 ч. Значение критерия принятия решений (3.16) будет равняться 36,875. Ожидаемый простой распределяемого самосвала, таким образом, составит 0,005 ч (0,3 мин).

Ожидаемое время подъезда карьерного самосвала, идущего к экскаватору ЭКГ-12 №12 – 4,5 мин (0,075 ч). Это меньше ожидаемого времени загрузки самосвала, поэтому два цикла погрузки будут идти непрерывно, то есть ожидаемое время освобождения экскаватора – 0,156 ч. Значение критерия принятия решений равно 97,475. Простой распределяемого самосвала – 0,011 ч (0,66 мин).

По минимальному значению критерия делаем вывод, что направлять рассматриваемый карьерный самосвал нужно к экскаватору ЭКГ-15 №42.

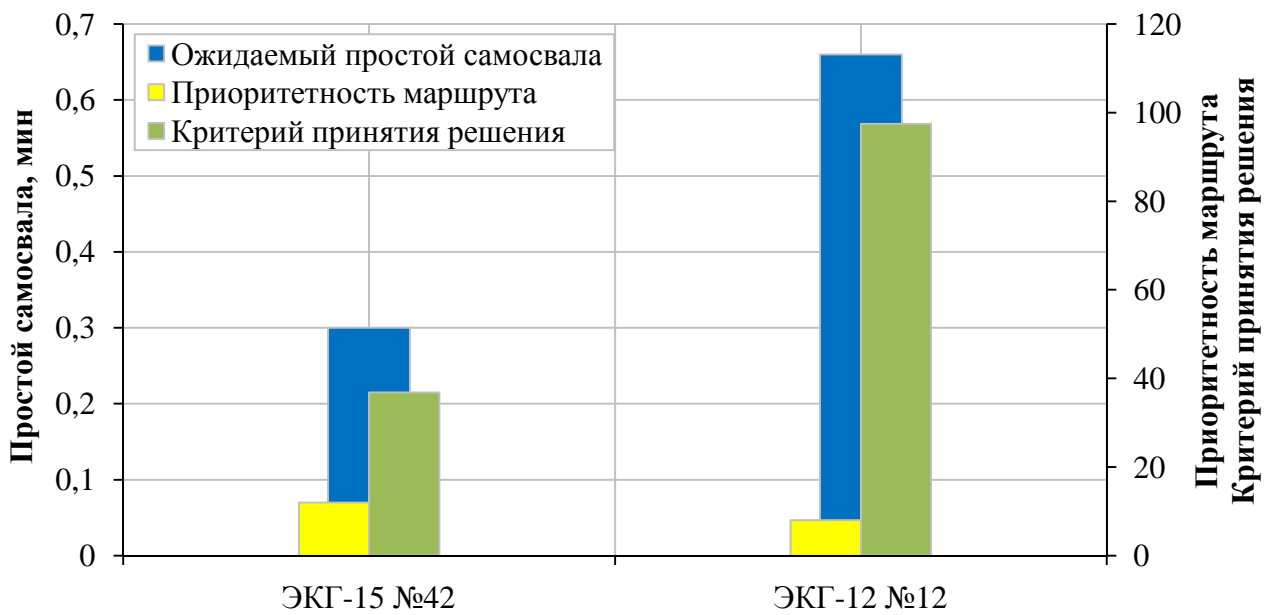
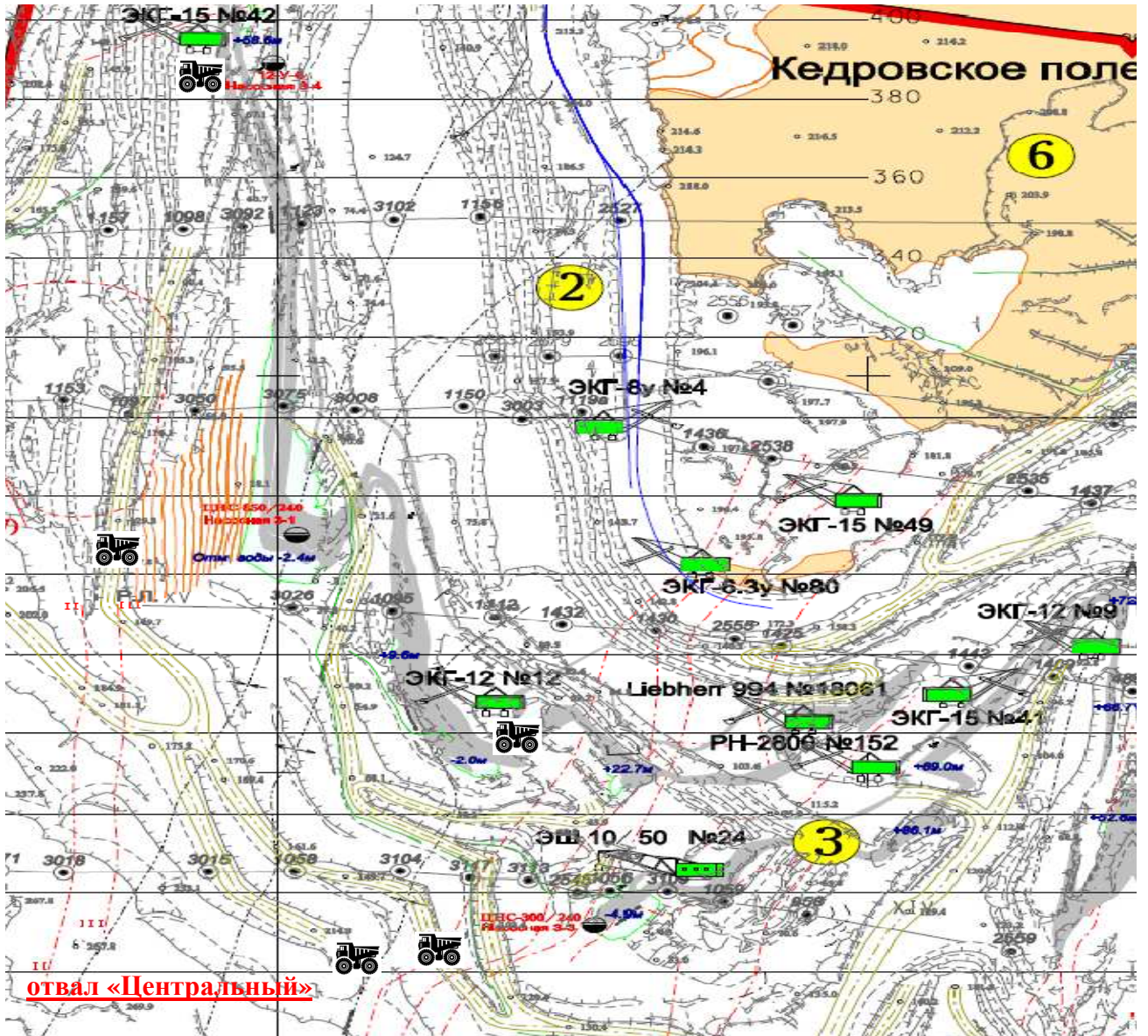


Рисунок 4.21 – Пример принятия диспетчерского решения при фактически работающем количестве самосвалов

Данный пример показывает, что экскаватор ЭКГ-15, даже являясь более мощным (и обладая более высокой стоимостью простоя), оказывается предпочтительнее экскаватора ЭКГ-12. При небольших различиях в значениях ожидаемых простоев карьерных самосвалов определяющее влияние на значение критерия принятия решений оказывают параметры приоритетности маршрутов, найденные с помощью имитационной модели.

Если на предприятии нет вычислительных мощностей, позволяющих непрерывно переоценивать приоритетности маршрутов, целесообразно установить периодичность запуска имитационной программы. Для этого можно произвести приблизительный аналитический расчёт количества карьерных самосвалов, требуемых для бесперебойной работы нескольких экскаваторов, сведённых в одну группу, – при изменяющихся расстояниях транспортирования.

Требуемое количество карьерных самосвалов i -го типа для обслуживания j -го экскаватора определяется по следующей формуле:

$$N_{cij} = \frac{T_{rij}}{t_{погр_{ij}} + t_{ман_{ij}}}$$

или

$$N_{cij} = \frac{t_{погр_{ij}} + \frac{\bar{L}_j}{v_{гр_{ij}}} + t_{разгр_i} + \frac{\bar{L}_j}{v_{пор_{ij}}}}{t_{погр_{ij}} + t_{ман_{ij}}}, \quad (4.1)$$

где T_{rij} – время полного оборота самосвала i -го типа, работающего с j -м экскаватором, ч;

$t_{погр_{ij}}$ – время загрузки самосвала i -го типа j -м экскаватором, ч;

$t_{ман_{ij}}$ – время манёвров самосвала i -го типа перед загрузкой j -м экскаватором,

ч;

\bar{L}_j – среднее расстояние транспортирования от j -го экскаватора до пункта разгрузки, км;

$\overline{v}_{гр_{ij}}, \overline{v}_{пор_{ij}}$ – средние скорости движения самосвала i -го типа между пунктом разгрузки и j -м экскаватором в гружёном и порожняковом направлениях, км/ч;

$t_{разгр_i}$ – время разгрузки самосвала i -го типа, ч.

Скорости движения карьерных самосвалов зависят от многих (в том числе неконтролируемых) факторов: климатических условий, качества дорог, изношенности машин, квалификации водителей и др., и могут различаться даже для самосвалов одной модели. Поэтому в данном случае можно говорить лишь о некой средней скорости на маршруте.

Полученное значение $N_{c_{ij}}$ округляется до целых в большую сторону (округление в меньшую сторону означает простои экскаваторов, которые обойдутся предприятию дороже). Округление производится для каждого маршрута в отдельности, если ЭАК работает по закрытому циклу; при открытом и комбинированном циклах округляется сумма по всем маршрутам.

Как показывает практика, аналитическое определение составляющих рабочего цикла самосвала зачастую приводит к некорректным результатам. Поэтому рекомендуется использовать фактические (или нормативные) значения, тем более что действующие на большинстве предприятий АСД способны записывать время выполнения операций с точностью до секунды.

Длины маршрутов транспортирования имеют свойство изменяться во времени из-за подвигания экскаваторов в забоях, в результате чего забойные участки дорог удлиняются либо укорачиваются. Очевидно, что при изменении расстояний будет изменяться и требуемое число самосвалов. Зная величину подвигания забоя экскаваторов за какой-либо период, можно проследить зависимость требуемого числа самосвалов от расстояния транспортирования. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.22. В качестве периода изменения расстояния был выбран 1 месяц. Отрицательные значения «дней месяца» означают подвигание забоя по направлению к отвалу.

На графике отчётливо видны интервалы, на которых требуемое количество карьерных самосвалов не изменяется.

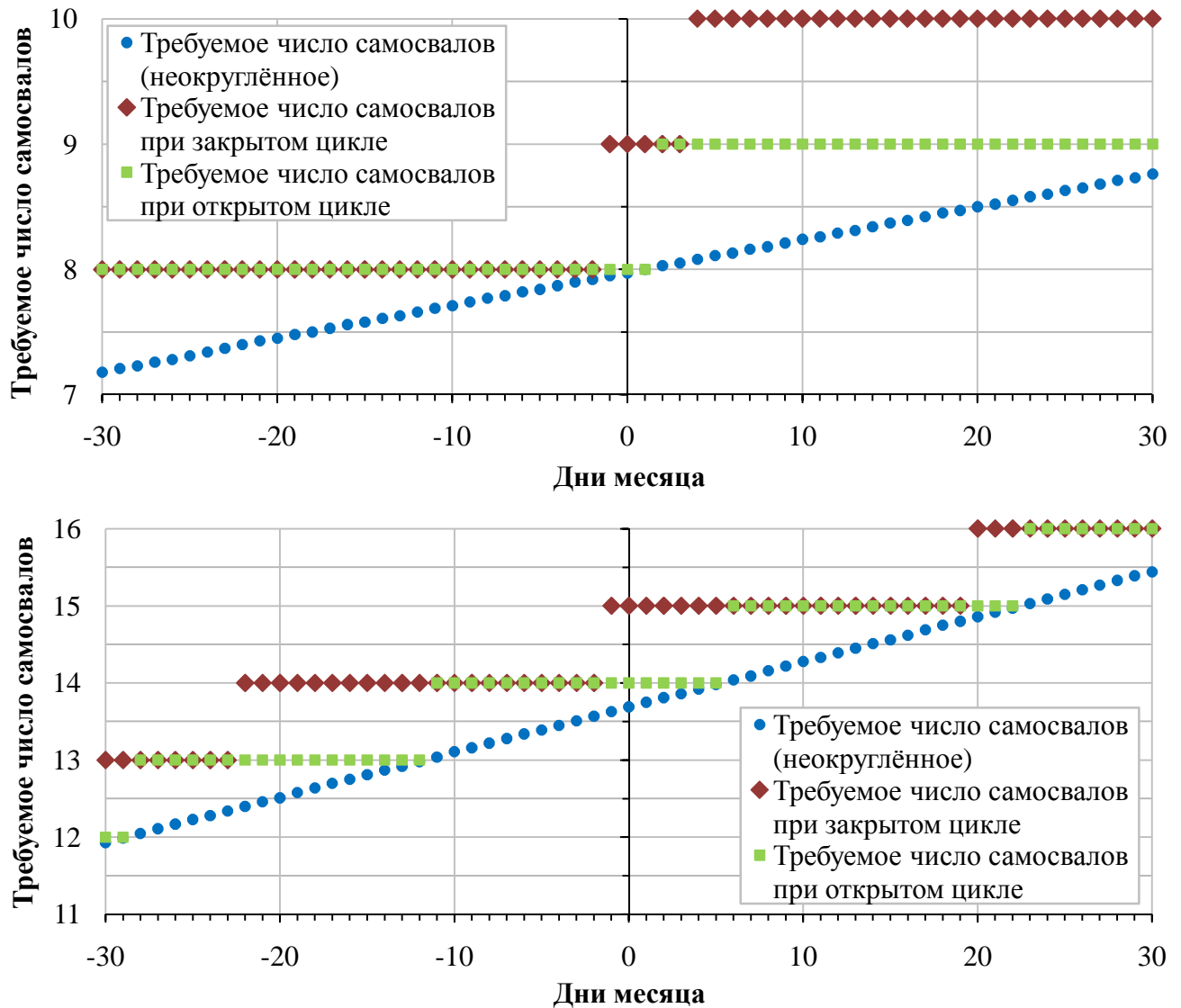


Рисунок 4.22 – Изменение требуемого числа карьерных самосвалов во времени для ГД №1 и ГД №2

Это означает, что на протяжении этих временных периодов расстояния транспортирования изменяются не настолько значительно, чтобы кардинально повлиять на работу ЭАК, и переоценку приоритетностей маршрутов проводить не обязательно. Но если требуемое число карьерных самосвалов уменьшается или увеличивается, то переоценка необходима, поскольку количество работающих самосвалов – это один из главных факторов, влияющих на эффективность работы ЭАК. Теоретически возможно спланировать горные работы (в частности, перемещение экскаваторов) таким образом, чтобы количество требуемых карьерных самосвалов оставалось постоянным в течение достаточно длительного периода времени (до ввода в действие нового горизонта или уступа). Это позволит более

планомерно увеличивать автомобильный парк и более эффективно использовать не только каждый самосвал, но и наличный парк экскаваторов [126].

В общем же случае значительность изменений можно оценивать и в процентах; величина её будет зависеть от требуемой точности.

В случае любого критичного изменения в конфигурации ЭАК (например, перемещения экскаватора на новую позицию) составы групп диспетчеризации пересматриваются. Если группа сформирована только что, то имеет смысл некоторое время обслуживать экскаваторы в её составе по закрытому циклу – чтобы получить необходимые данные о временных параметрах погрузочно-транспортного процесса, которые затем будут подвергнуты статистической обработке. Данные, получаемые из карьера и обрабатываемые системой, должны быть как можно более свежими – это даст определённую гарантию того, что за время их обработки ситуация в карьере изменится не слишком значительно.

4.2.2 Оценка экономической эффективности мероприятий по внедрению алгоритма оптимального распределения карьерных самосвалов

Внедрение комбинированного цикла работы ЭАК и его оптимизация могут быть сопряжены с необходимостью увеличения количества карьерных самосвалов, обслуживающих экскаваторы. В частности, оптимальное количество самосвалов по критерию минимума потерь от простоев оборудования в ГД №1 составляет 11 машин, в ГД №2 – 18. Фактически в этих группах работает соответственно 9 и 15 машин БелАЗ-75306, – по закрытому циклу (базовый вариант).

В то же время, из рисунков 4.2 и 4.4 видно, что количество карьерных самосвалов, необходимых для выполнения минимального требуемого объёма перевозок (примерно соответствующего реальной производительности экскаваторов), составляет 8 машин для ГД №1 и 14 – для ГД №2. Это меньше, чем фактически работавшее количество машин (которое обычно оказывается выше требуемого); высвободившиеся самосвалы можно переместить в резерв или использовать на других экскаваторах. Действительно, зачем использовать больше самосвалов, если план выполняется и меньшим их количеством. При этом уменьшаются капи-

тальные и эксплуатационные затраты на «лишние» самосвалы. Вместе с тем, могут увеличиться потери от простоев.

Нужно отметить, что необходимости привлечения (а тем более – приобретения) дополнительных карьерных самосвалов вообще желательно избегать, поскольку на разрезах (в том числе и на «Кедровском») нередко наблюдается нехватка технологического автотранспорта, и при организации производства приходится ограничиваться имеющимся парком. Это ещё одна причина, по которой с каждым экскаватором (или их группой) должно работать количество самосвалов, не превышающее потенциальные возможности экскаваторов.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что оптимальное по результатам ИМ количество самосвалов в ГД далеко не всегда достижимо на практике. Необходимо установить, насколько экономически целесообразно использование того или иного варианта формирования парка карьерных самосвалов.

Оценка экономической эффективности предлагаемого режима работы ЭАК разреза «Кедровский» и численности парка карьерных самосвалов проводится при следующих условиях. Рассматривается базовый вариант, когда ЭАК разреза функционирует по закрытому циклу с количеством самосвалов в группах, фактически работавшим («базовый»), а также предлагается проектный вариант – с количеством самосвалов, обеспечивающим выполнение сменного задания погрузки и вывоза горной массы, при работе по комбинированному циклу («проект»).

Экономия от внедрения комбинированного цикла находится как

$$E = (C_{\text{пр}}^{\text{баз}} - C_{\text{пр}}^{\text{проект}}) \cdot N_{\text{см}}^{\text{пер}}, \quad (4.2)$$

где $C_{\text{пр}}^{\text{баз}}$, $C_{\text{пр}}^{\text{проект}}$ – потери от простоев по базовому и проектному вариантам соответственно, руб./смену;

$N_{\text{см}}^{\text{пер}}$ – количество рабочих смен за рассматриваемый период времени.

Экономический эффект от внедрения комбинированного цикла вычисляется по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = E - \frac{C_0 \cdot N_{\text{с}}^{\text{треб}}}{T_{\text{ок}}^{\text{норм}}}, \quad (4.3)$$

где C_0 – цена нового карьерного самосвала с учётом доставки с завода-изготовителя, руб. (для БелАЗ-75306 принималась по фактическим данным предприятия равной 67,438 млн. руб.);

$N_c^{\text{треб}}$ – количество карьерных самосвалов, которые требуется приобрести для выполнения условий проектного варианта;

$T_{\text{ок}}^{\text{норм}}$ – нормативный срок окупаемости капитальных вложений, мес.

Величина наработки на 90%-ный ресурс для самосвала БелАЗ-75306, согласно паспорту ТС, предоставленному заводом-изготовителем, составляет 800 тыс. км (то есть $T_{\text{ок}}^{\text{норм}}$ составляет примерно 7 лет, или 84 месяца).

Наиболее адекватным периодом времени представляется 1 месяц, поскольку группы диспетчеризации вряд ли будут оставаться в неизменных составах в течение малого (неделя) или большого (год) периода. Количество рабочих смен $N_{\text{см}}^{\text{пер}}$ при этом составляет 60.

Срок окупаемости капитальных вложений (если они есть) определится как

$$T_{\text{ок}} = \frac{KB}{E} = \frac{C_0 \cdot N_c^{\text{треб}}}{E}. \quad (4.4)$$

Для обеих ГД, когда по варианту «проект» высвобождается один карьерный самосвал, и если считать, что его можно реализовать по цене нового, или не приобретать при обновлении парка, экономический эффект можно определить следующим образом:

$$\mathcal{E} = E + \frac{C_0}{T_{\text{ок}}^{\text{норм}}}. \quad (4.5)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу 4.2.

Как показывают расчёты, высвобождение одного карьерного самосвала в ГД №1 приводит к небольшому (в пределах погрешности) сокращению потерь от простоев оборудования, но уменьшение затрат на эксплуатацию дополнительного самосвала делает экономический эффект более значительным. Ожидаемый эффект от использования проектного варианта составит 14,95 млн. рублей в год по сравнению с базовым вариантом.

Таблица 4.2 – Основные технико-экономические показатели для ГД №1 и №2

Показатель	ГД №1		ГД №2	
	Базовый	Проект	Базовый	Проект
Количество самосвалов в группе, шт.	9	8	15	14
Потери от простоев $C_{пр}$, тыс. руб./смену	663,929	656,545	1165,141	1081,104
Экономия E , тыс. руб./мес		443,04		5042,22
Экономический эффект \mathcal{E} , тыс. руб./мес		1245,873		5845,053

В ГД №2 наблюдается несколько иная ситуация. Здесь сокращение парка карьерных самосвалов даёт значительную экономию за счёт сокращения потерь от простоев, которая ещё более увеличивается благодаря исключению из группы дополнительного самосвала. Годовой экономический эффект от использования проектного варианта, как ожидается, составит 70,14 млн. рублей.

Отсюда следует, что рациональным количеством самосвалов в обеих ГД будет то, которое обеспечивает выполнение сменного задания по погрузке и вывозу горной массы – 8 машин БелАЗ-75306 в ГД №1 и 14 машин БелАЗ-75306 в ГД №2. Оценка по коэффициенту эксплуатационной производительности ЭАК (п. 2.2) показывает улучшение на 1,5% и 3,3% для ГД №1 и №2 соответственно.

В данном случае экономическая эффективность может быть оценена лишь приблизительно, поскольку состав групп диспетчеризации и взаимное расположение пунктов погрузки и разгрузки с течением времени могут изменяться, а величина экономического эффекта от снижения простоев может колебаться как в сторону увеличения, так и в сторону снижения от приведённых расчётов.

Чтобы продемонстрировать непостоянство величины экономического эффекта, вернёмся к формуле (4.1). Округление требуемого количества карьерных самосвалов в большую сторону означает, что в ЭАК заранее закладываются простои самосвалов (простои экскаваторов условно отсутствуют). Простой, условно приходящийся на один рейс одного карьерного самосвала, равен знаменателю правой части выражения (4.1), то есть $(t_{погр_{ij}} + t_{ман_{ij}})$. Зная зависимость размера

карьерного автопарка, требуемого для бесперебойной работы экскаваторов, от изменяющихся расстояний транспортирования (рисунок 4.22) и учитывая возможность экономии некоторого количества самосвалов при переходе на открытый цикл, можно спрогнозировать изменение получаемого суточного экономического эффекта при изменении длин маршрутов.

Результаты расчётов показаны на рисунке 4.23.

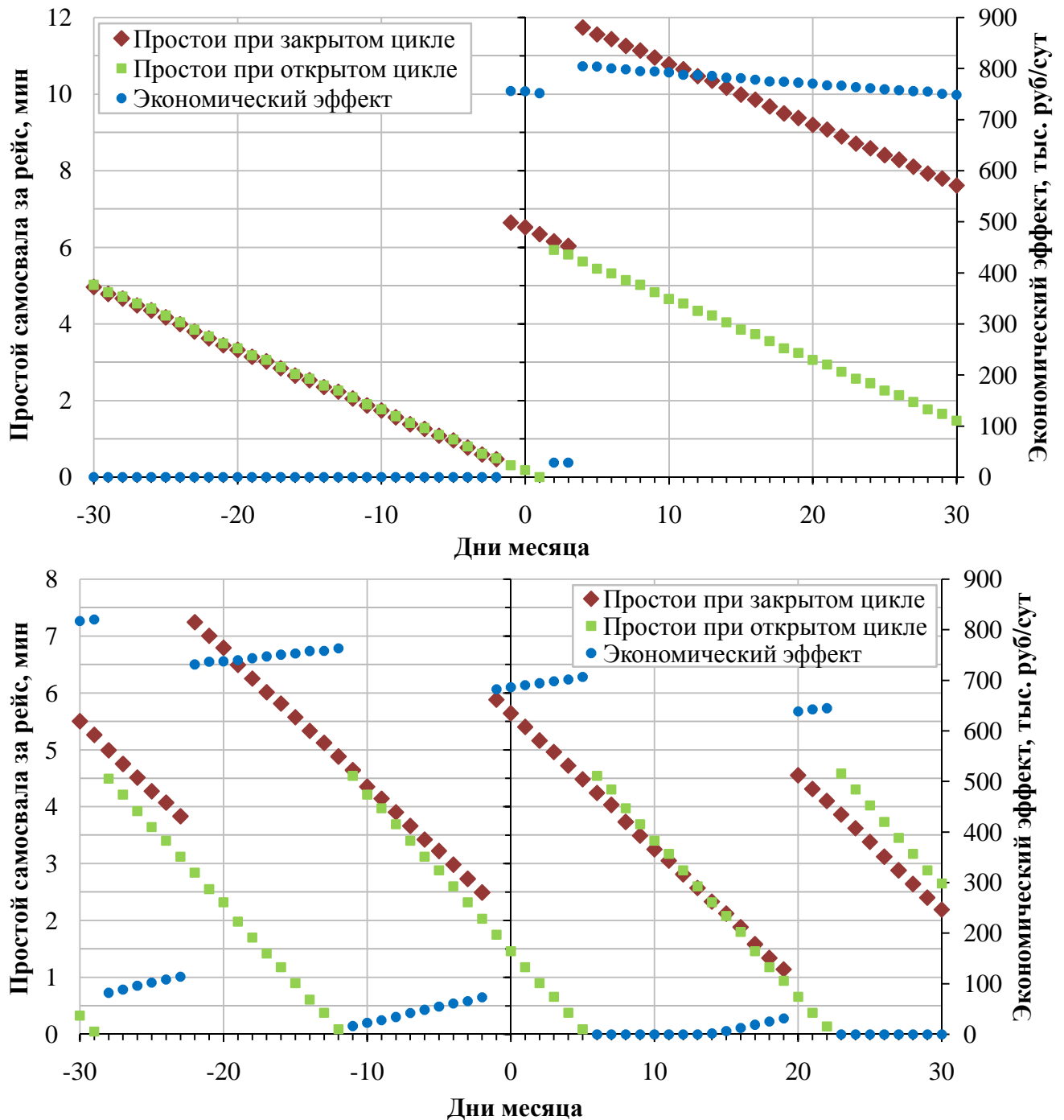


Рисунок 4.23 – Изменение величины суточного экономического эффекта во времени при переходе ЭАК на работу по открытому циклу для ГД №1 и ГД №2

Максимально возможное число сэкономленных карьерных самосвалов равно $(M - 1)$, где M – количество маршрутов (экскаваторов), объединяемых в единую подсистему при переходе на организацию работы ЭАК по открытому (комбинированному) циклу.

Полученные результаты весьма условны, так как при аналитическом определении характеристик работы ЭАК не принимаются во внимание вероятностные факторы технологических процессов ОГР. С помощью данной методики можно получить лишь примерное представление об экономической эффективности; точное её определение в рамках данной работы не представляется возможным.

Выбранные проектные варианты режимов работы ЭАК, полученные по результатам ИМ и использования разработанного алгоритма оптимального распределения карьерных самосвалов по пунктам погрузки, можно считать приемлемыми. Разработанные на основе проведённых исследований научно-технические материалы и рекомендации переданы ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»». Таким образом, можно утверждать, что поставленная в работе цель достигнута.

ВЫВОДЫ

1. Доказано, что работу ЭАК на разрезе «Кедровский» целесообразно организовывать по комбинированному циклу с разделением погрузочно-транспортной техники на группы диспетчеризации, а критерием оценки качества распределения карьерных самосвалов должен быть минимум финансовых потерь от суммарных простоев экскаваторов и самосвалов. Потери от простоев оборудования при работе ЭАК по комбинированному циклу в среднем на 7,9% (в сумме – на 15,7%) ниже, чем по закрытому, и на 3,7% – чем по открытому циклу. Эксплуатационная производительность при комбинированном цикле в среднем на 2,1% (суммарно на 4,2%) выше, чем при закрытом. По коэффициенту эксплуатационной производительности комбинированный цикл предпочтительнее закрытого в среднем на 1,8% (в сумме – на 3,6%).

2. Установлено, что зависимости суммарных денежных потерь за смену от количества самосвалов в ЭАК всегда имеют минимум. Слева от минимума располагается зона недогруженности ЭАК самосвалами, справа – перегруженности. В обоих случаях потери от простоев возрастают: в случае недогруженности – за счёт простоев экскаваторов, в случае перегруженности – самосвалов, причём в зоне перегруженности потери растут интенсивнее, чем в зоне недогруженности. Соответствующее минимуму количество карьерных самосвалов является оптимальным для соответствующих условий и критериев оценки эффективности работы ЭАК. Для групп диспетчеризации №1 и №2 оно составляет 11 и 18 единиц соответственно.

3. Оптимальный состав парка работающих самосвалов не всегда достижим на практике, поскольку на предприятии может не быть в наличии требуемого количества самосвалов. Поэтому предлагается ограничиться количеством машин, обеспечивающим выполнение необходимой сменной выработки. Аналитическая оценка требуемого количества самосвалов при изменяющихся расстояниях транспортирования подтверждает возможность сокращения числа работающих самосвалов при работе без закрепления их за экскаваторами. Поэтому экономически целесообразным является использование в ГД №1 8 самосвалов, в ГД №2 – 14 самосвалов.

4. Сравнение вариантов работы ЭАК по комбинированному циклу с достаточным для обеспечения необходимой производительности количеством самосвалов («проект»), а также с закрытым циклом и фактически работавшим количеством самосвалов («базовый»), показывает, что проектный вариант является экономически более предпочтительным. Ожидаемый экономический эффект от его использования составит в среднем 42,5 млн. рублей в год по сравнению с базовым вариантом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой дано новое решение актуальной научной задачи оптимизации распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки, имеющей существенное значение для повышения эксплуатационной производительности ЭАК разрезов.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Установлено, что эксплуатационная производительность ЭАК современных разрезов во многом зависит от эффективности использования карьерных экскаваторов и самосвалов, определяемой величиной их простоев в течение смены в ожидании работы. Основные резервы сокращения этих простоев заключены в повышении эффективности применяемой системы диспетчеризации карьерного автотранспорта в составе ЭАК разреза.

2. Разработана двухуровневая диспетчерская модель ЭАК разреза, на верхнем уровне которой устанавливается оптимальный план погрузки и перевозок, являющийся целевой установкой для нижнего уровня. На нижнем уровне применяется алгоритм оптимального распределения карьерных самосвалов для достижения установки верхнего уровня. В качестве критерия принятия решений по распределению предложен комплексный критерий, учитывающий разную стоимость простоев карьерного погрузочно-транспортного оборудования, а также разную приоритетность экскаваторов и соответствующих им маршрутов транспортирования горной массы.

3. Обосновано, что традиционные детерминированные и марковские методы для исследования процессов в карьерных ЭАК непригодны. Неадекватность этих методов устраняется использованием имитационного моделирования с учётом дискретно-событийного и вероятностного характера погрузочно-транспортного процесса в ЭАК разрезов, а также подчинённости вероятностных распределений временных характеристик этого процесса гамма-закону. На основе имитационной модели разработан программный комплекс, который позволяет моделировать раз-

личные ситуации в работе ЭАК разреза, определять простои погрузочно-транспортного оборудования и приоритетность экскаваторов (маршрутов), на основе чего оптимизировать распределение карьерных самосвалов по пунктам погрузки.

4. Для повышения точности принятия решений по текущему распределению карьерных самосвалов в работе предложены параметры приоритетности экскаваторов (маршрутов), которые оказывают существенное влияние на распределение самосвалов по пунктам погрузки и определяются в результате многокритериального имитационного моделирования, учитывающего мощность экскаваторов, соответствие карьерных экскаваторов и самосвалов друг другу, расстояния транспортирования, скоростные характеристики самосвалов, возможность и закономерности отказов и восстановления работоспособности оборудования, показатели внешней горной среды.

5. Доказано, что работу ЭАК разрезов целесообразно организовывать по комбинированному открыто-закрытому циклу с разделением погрузочно-транспортного оборудования на группы диспетчеризации по принципу расположения экскаваторов на одном участке горных работ и однородности парка работающих с ними самосвалов – с вывозом горной массы на один отвал.

Установлено, что потери от простоев при работе ЭАК по комбинированному циклу в условиях разреза «Кедровский» суммарно на 15,7% ниже, чем по закрытому, и на 3,7% – чем по открытому циклу. Эксплуатационная производительность при комбинированном цикле в сумме на 4,2% выше, чем при закрытом, что составляет около 2600 т/смену.

6. Сравнение вариантов работы ЭАК по комбинированному циклу с требуемым количеством самосвалов (8 и 14 машин по группам диспетчеризации; «проект»), а также закрытым циклом и фактическим количеством самосвалов (9 и 15 машин соответственно; «базовый»), показало, что комбинированный цикл способен дать экономический эффект не только за счёт сокращения потерь от простоев, но и за счёт сокращения числа работающих самосвалов. Ожидаемый экономический эффект от использования проектного варианта составит для условий разреза

«Кедровский» в среднем 42,5 млн. рублей в год по сравнению с базовым вариантом.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

– расширить область применения диспетчерской модели за счёт введения в неё функции контроля качества горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К.Н. Современные системы управления горно-транспортными комплексами // К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров / под ред. акад. РАН К.Н. Трубецкого. – СПб.: Наука, 2007. – 306 с.
2. Анистратов К.Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // Горная промышленность. – 2011. – №6. – С. 22-26.
3. Твердов А.А. Современные системы транспортировки полезных ископаемых и вскрышных пород / А.А. Твердов, А.В. Жура, С.Б. Никишичев // Горная промышленность. – 2012. – №2. – С. 96-98, 100.
4. Ганицкий В.Н. Совершенствование организации производства – ключевой фактор повышения эффективности работы карьеров / В.Н. Ганицкий, А.М. Макаров, В.А. Пикалов, В.Н. Лапаев, А.В. Соколовский // Горный журнал. – 2009. – №11. – С. 34-36.
5. Ильин С.А. Повышение экономической эффективности открытых горных работ / С.А. Ильин, В.С. Коваленко, Д.В. Пастихин // Горный журнал. – 2012. – №6. – С. 56-65.
6. Инструкция по учёту рабочего времени технологического автотранспорта. – Кемерово: ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»». – 2004. – 11 с.
7. Корницкая Е.А. Анализ влияния простоев на эффективность работы технологического автотранспорта // Профессиональные знания и навыки молодежи – будущий капитал компании: Сб. докладов III молодёжной научно-практической конференции / ООО «УГМК-Холдинг». – Верхняя Пышма, 2008. – С. 61-65.
8. Мелвин Дж. Гордон. Система управления предприятиями в горной промышленности / Дж. Гордон Мелвин, В.В. Квитка // Горный журнал. – 2005. – №3. – С. 28-31.
9. Carter R.A. Fleet management: challenges and choices // Engineering and Mining Journal. – March 2012. – P. 28-30, 32.
10. Lumley G. Trends in performance of open cut mining equipment // GBI Mining Intelligence white paper. – 20 Feb 2012. – 36 p.

11. Munirathinam M. A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations / M. Munirathinam, J.C. Yingling // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 1994. – 8, №1. – P. 1-15.
12. Alarie S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / S. Alarie, M. Gamache // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2002. – 16, №1. – P. 59-76.
13. Сысоев А.А. Управление количественным составом транспортного звена экскаваторно-автомобильных комплексов / А.А. Сысоев, О.И. Литвин // *Уголь*. – 2009. – №2. – С. 24-25.
14. Глебов А.В. Методика формирования парка карьерных самосвалов // *Горный журнал*. – 2012. – №1. – С. 75-78.
15. Kappas G. An application of closed queuing networks theory in truck-shovel systems / G. Kappas, T.M. Yegulalp // *International Journal of Surface Mining and Reclamation*. – 1991. – 5, №1. – P. 45-53.
16. Kesimal A. Applying the queuing theory approach to determine the most economical number of trucks matching shovel for overburden removal in a coal mine // *Mineral Resources Engineering*. – 1998. – 7, №1. – P. 29-38.
17. Blackwell G.H. Estimation of large open pit haulage truck requirements // *CIM Bulletin*. – 1999. – Vol. 92 (1028). – P. 143-148.
18. Czaplicki J.M. A new method of truck number calculation for shovel-truck system // *Mineral Resources Engineering*. – 1999. – 8, №4. – P. 391-404.
19. Ta C.H. A stochastic optimization approach to mine truck allocation / C.H. Ta, J.V. Kresta, J.F. Forbes, H.J. Marquez // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2005. – 19, №3. – P. 162-175.
20. Krause A. Modelling open pit shovel-truck systems using the machine repair model / A. Krause, C. Musingwini // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – Aug 2007. – Vol. 107. – P. 469-476.
21. Bonates E. A combined approach to solve truck dispatching problems / E. Bonates, Y. Lizotte // *Computer Applications in the Mineral Industry*. – Rotterdam: Balkema, 1988. – P. 403-412.

22. Cetin N. Open-pit truck/shovel haulage system simulation // Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Turkey. – 2004. – 133 p.
23. Воронов А.Ю. Анализ критериев оптимизации непрерывного распределения карьерных автосамосвалов по пунктам погрузки // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-2010). Т. 1: материалы XIII международной научно-практической конференции, Кемерово, ГУ КузГТУ, 28-29 октября 2010 г. – Кемерово, 2010. – С. 188-192.
24. Vemba M.M. Loading and transport system at SMC – Optimization // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2004. – P. 139-147.
25. Burt C.N. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets / C.N. Burt, L. Caccetta // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2007. – 21, №4. – P. 262-270.
26. Burt C.N. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets (corrigendum) / C.N. Burt, L. Caccetta // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 22, №1. – 2008. – P. 84-85.
27. Krzyzanowska J. The impact of mixed fleet hauling on mining operations at Venetia mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2007. – Vol. 107. – P. 215-224.
28. Mkhathswa S.V. Optimization of the loading and hauling fleet at Mamatwan open pit mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2009. – Vol. 109. – P. 223-232.
29. Зарипова С.В. Оптимизация работы экскаваторно-автомобильных комплексов // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – №3. – С. 105-108.
30. Tan S. Evaluation of computer truck dispatching criteria / S. Tan, R.V. Ramani // SME AIME Annual Meeting, Phoenix, USA. – 1992.
31. Kolonja B. Simulation analysis of dispatching strategies for surface mining operations using SIMAN // M.Sc. Thesis, Pennsylvania State University, USA. – 1992.

32. Cross B.K. Digital simulation of an open pit truck haulage system / B.K. Cross, G.B. Williamson // A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry. – New York: Weiss, A., (Ed), AIME, 1969. – P. 385-400.
33. Brake J.D. Evaluation of truck dispatching and simulation methods in large-scale open pit operations / J.D. Brake, K.P. Chatterjee // 16th APCOM, AIME. – 1979. – P. 375-381.
34. Chatterjee K.P. Truck dispatching and simulation methods in open-pit operations / K.P. Chatterjee, J.D. Brake // CIM Bulletin. – 1981. – Vol. 74 (835). – P. 102-107.
35. Kim Y.C. Truck dispatching by computer simulation / Y.C. Kim, M.A. Ibarra // Bulk Solids Handling. – 1981. – Vol. 1, №1. – P. 137-147.
36. Tu J.H. Analysis of open-pit truck haulage system by use of a computer model / J.H. Tu, V.J. Hucka // CIM Bulletin. – 1985. – Vol. 78 (879). – P. 53-59.
37. Billette N.R. Haulage system capacity: analytical and simulation models revisited / N.R. Billette, B.P. Seka // 19th APCOM, AIME, Littleton, Colorado. – 1986. – P. 377-396.
38. Bonates E. A computer simulation model to evaluate the effect of dispatching / E. Bonates, Y. Lizotte // SME AIME Annual Meeting, Phoenix, Arizona. – 1987.
39. Lizotte Y. Truck and shovel dispatching rules assessment using simulation / Y. Lizotte, E. Bonates // Mining Science and Technology. – 1987. – 5, №1. – P. 45-58.
40. Sadler W.M. Practical truck dispatching – A micro computer based approach // Computer Applications in the Mineral Industry. – Rotterdam: Balkema, 1988. – P. 495-500.
41. Bonates E. The development of assignment procedures for semi-automated truck/shovel system // Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada. – 1992.
42. Tan S. Production planning and operational control; new algorithms with application to the mining industry // Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, USA. – 1992.
43. Forsman B. Using METAFORA to evaluate the transport system in a Swedish open pit mine / B. Forsman, N. Vagenas // 23rd APCOM, SME. – 1992. – P. 733-738.

44. Forsman B. Truck dispatch computer simulation in Aitik open pit mine / B. Forsman, E. Ronnkvist, N. Vagenas // *International Journal of Surface Mining and Reclamation*. – 1993. – 7, №3. – P. 117-120.
45. Youdi Z. System simulation of optimal truck dispatching criteria in open cut mining / Z. Youdi, S. Jing, L. Shuguang, Z. Daxian // *Mine Planning and Equipment Selection*. – Rotterdam: Balkema, 1994. – P. 307-311.
46. Panagiotou G.N. BEdisp – A computer-based truck dispatching system for small-medium scale mining operations / G.N. Panagiotou, T.N. Michalakopoulos // *Mine Planning and Equipment Selection*. – Rotterdam: Balkema, 1995. – P. 481-486.
47. Kolonja B. Computer simulation of open-pit transportation systems / B. Kolonja, N. Vasiljevic // *Mine Planning and Equipment Selection*. – Rotterdam: Balkema, 2000. – P. 613-618.
48. Arelovich A. Heuristic rule for truck dispatching in open-pit mines with local information-based decisions / A. Arelovich, F. Masson, O. Agamennoni, S. Worrall, E. Nebot // *13th International IEEE, Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, Madeira Island, Portugal*. – Sep 19-22, 2010. – P. 1408-1414.
49. Wilke F.L. Simulation studies on truck dispatching / F.L. Wilke, K. Heck // *17th APCOM, AIME, New York*. – 1982. – P. 620-626.
50. Li Z. A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining // *Mining Science and Technology*. – 1990. – 10, №3. – P. 337-340.
51. Xi Y. Optimum dispatching algorithms for Anshan open-pit mine / Y. Xi, T.M. Yegulalp // *24th APCOM Proceedings*. – 1993. – Vol. 3. – P. 426-433.
52. White J.W. Automated open-pit truck dispatching at Tyrone / J.W. White, M.J. Arnold, J.G. Clevenger // *Engineering and Mining Journal*. – 1986. – 183 (6). – P. 76-84.
53. Arnold M.J. Computer-based truck dispatching / M.J. Arnold, J.W. White // *World Mining*. – 1983. – 36 (4). – P. 53-57.
54. White J.W. Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives / J.W. White, J.P. Olson // *Mining Engineering*. – 1986. – 38 (11). – P. 1045-1054.

55. White J.W. On improving truck/shovels productivity on open pit mines / J.W. White, J.P. Olson, S.I. Vohnout // *CIM Bulletin*. – 1993. – Vol. 86 (973). – P. 43-49.
56. Таха Х.А. Введение в исследование операций, 7-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
57. Hauck R.F. A real-time dispatching algorithm for maximizing open-pit mine production under processing and blending requirements // *Proceedings, Seminar on Scheduling in Mining, Smelting and Metallurgy*. – Canada Institute of Mining and Metallurgy, Montreal, Canada. – 1973.
58. Hauck R.F. Computer-controlled truck dispatching in open-pit mines // *Computer Methods for the 80's in The Mineral Industry*. – New York: Society of Mining Engineers, 1979. – P. 735-742.
59. Elbrond J. Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines / J. Elbrond, F. Soumis // *International Journal of Surface Mining*. – 1987. – 1, №1. – P. 1-6.
60. Soumis F. Evaluation of the new truck dispatching in the Mount Wright mine / F. Soumis, J. Ethier, J. Elbrond // *21st APCOM Proceedings*. – 1990. – P. 674-682.
61. Temeng V.A. Real-time truck dispatching using a transportation algorithm / V.A. Temeng, F.O. Otunoye, J.O. Friendewey // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 1997. – 11, №4. – P. 203-207.
62. Temeng V.A. A nonpreemptive goal programming approach to truck dispatching in open pit mines / V.A. Temeng, F.O. Otunoye, J.O. Friendewey // *Mineral Resources Engineering*. – 1998. – 7, №2. – P. 59-67.
63. Ercelebi S.G. Optimization of shovel-truck system for surface mining / S.G. Ercelebi, A. Bascetin // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – Jul 2009. – Vol. 109. – P. 433-439.
64. Bissiri Y. Application of agent-based modeling to truck-shovel dispatching systems in open pit mines // *Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, Canada*. – 2002. – 128 p.

65. Клебанов Д.А. Применение высокоточной спутниковой навигации в горнодобывающей отрасли / Д.А. Клебанов, М.А. Макеев // Недропользование-XXI век. – 2010. – №5. – С. 34-36.
66. Состав и функциональные возможности систем диспетчеризации ГТК. – URL: <http://library.stroit.ru/articles/disgtk/> (дата обращения: 11.09.15).
67. Топунов Д.В. Автоматизированные системы, повышающие эффективность управления карьерным транспортом / Д.В. Топунов, В.В. Аверкин, С.М. Шляга // Проблемы карьерного транспорта: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: 2005. – С. 201-204.
68. Владимиров Д.Я. Система управления горно-транспортным комплексом «КАРЬЕР»: основные направления модернизации и развития / Д.Я. Владимиров, А.Ф. Клебанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – №8. – С. 10-17.
69. Клебанов А.Ф. Система диспетчеризации большегрузных автосамосвалов «КАРЬЕР» на разрезе «Черниговский»: структура, функциональность, экономическая эффективность / А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров, Л.В. Рыбак // Горная промышленность. – 2003. – №1. – С. 52, 54-56.
70. Трубецкой К.Н. Автоматизированная система управления горно-транспортным комплексом на Стойленском ГОКе / К.Н. Трубецкой, А.Ю. Горшков, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров // Горный журнал. – 2007. – №11. – С. 77-81.
71. Трубецкой К.Н. Система диспетчеризации горно-транспортного комплекса «КАРЬЕР» на предприятиях ОАО «Угольная компания «Южный Кузбасс»» / К.Н. Трубецкой, С.Е. Малышев, Д.Я. Владимиров, А.Ф. Клебанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – №11. – С. 6-10.
72. Бордюг Ю.И. Опыт внедрения системы диспетчеризации и обеспечение её интеграции с корпоративной информационной системой / Ю.И. Бордюг, А.В. Сидоров // Профессиональные знания и навыки молодежи – будущий капитал компании: Сб. докладов III молодёжной научно-практической конференции / ООО «УГМК-Холдинг». – Верхняя Пышма, 2008. – С. 230-232.

73. Владимиров Д.Я. Система диспетчеризации «КАРЬЕР»: от мониторинга большегрузных самосвалов к управлению горно-транспортным комплексом и оптимизации горных работ в карьере / Д.Я. Владимиров, А.Ф. Клебанов, А.И. Перепелицын // Горная промышленность. – 2004. – №4. – С. 34-39.

74. Одинцев Н. Информационные технологии для горнодобывающей промышленности / Н. Одинцев, О. Стагурова, Е. Абрамова // Горная промышленность. – 2005. – №4. – С. 13-15.

75. Бондаренко А.В. Автоматизированная система диспетчеризации «КАРЬЕР» для решения комплекса задач управления карьерным транспортом // Проблемы карьерного транспорта: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2005. – С. 69-71.

76. Трубецкой К.Н. Автоматизация управления горнотранспортными комплексами в карьерах / К.Н. Трубецкой, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров // Горный журнал. – 2009. – №11. – С. 38-41.

77. Борболин Д.М. Внедрение системы диспетчеризации «Карьер» на Воронцовском месторождении / Д.М. Борболин, А.Г. Рыльников, А.А. Пудов, А.В. Новиков, Н.В. Волгина // Горный журнал. – 2011. – №7. – С. 89-93.

78. Трубецкой К.Н. Результаты внедрения оперативной системы диспетчеризации транспорта на предприятиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / К.Н. Трубецкой, А.Г. Рыльников, Н.В. Одинцев // Недропользование-XXI век. – 2007. – №6. – С. 65-68.

79. Бондаренко А.В. Совершенствование системы управления горнотранспортным комплексом на угольных разрезах Кузбасса / А.В. Бондаренко, А.Г. Рыльников // Недропользование-XXI век. – 2009. – №4. – С. 71-73.

80. Репецкий А.А. Снижение себестоимости добычи угля за счёт внедрения автоматизированного комплекса системы диспетчеризации горнотранспортного оборудования // Профессиональные знания и навыки молодежи – будущий капитал компании: Сб. докладов III молодёжной научно-практической конференции / ООО «УГМК-Холдинг». – Верхняя Пышма, 2008. – С. 90-92.

81. Поляков А.Г. Комплексная автоматизированная система управления производством горно-добывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – №8. – С. 23-28.

82. Никитин К.В. Результаты промышленного внедрения автоматизированной системы диспетчеризации на Восточном руднике ОАО «Апатит» / К.В. Никитин, А.Ю. Звонарь, Д.Е. Козлов, С.В. Маркитан // Горная промышленность. – 2012. – №4. – С. 20-24.

83. Фоминов А.С. Сделайте с нами шаг в мир передовых технологий! // Горная промышленность. – 2014. – №2. – С. 14-16.

84. Галиев С.Ж. «АДИС» – автоматизированная система диспетчеризации процессов горно-транспортных работ на карьерах / С.Ж. Галиев, Д.Ш. Ахмедов, Е.А. Шабельников // Проблемы карьерного транспорта: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: 2005. – С. 93-96.

85. Астафьев Ю.П. Практика диспетчеризации автотранспорта в карьерах за рубежом / Ю.П. Астафьев, А.В. Максимов // Горный журнал. – 1985. – №4. – С. 58-61.

86. Batchelor D.H. The implementation of a computerised truck dispatch system at Palabora // 20th APCOM Proceedings. – 1987. – P. 389-401.

87. Кроуз Э. Эволюция диспетчерского управления // Горная промышленность. – 2013. – №1. – С. 95-98.

88. Мачулов В.Н. Системы управления горнотранспортных комплексов // Горная промышленность. – 2013. – №6. – С. 88-92.

89. Jarosz A.P. GPS guidance system and reduction of open pit mining costs and revenue loss / A.P. Jarosz, R. Finlayson // Inaugural Conference of Spatial Sciences Institute, Australia. – 2003.

90. Ульянов В.Г. Автоматизация управления горно-транспортным комплексом на карьере «Нюрбинский» АК «АЛРОСА» / В.Г. Ульянов, Б.И. Димант, И.В. Зырянов, В.А. Пархоменко, И.Б. Табакман, Д.П. Антоненко // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №7. – С. 39-44.

91. Авдеев С.Е. Автоматизированная система управления горно-транспортными работами на карьере «Юбилейный» / С.Е. Авдеев, В.Г. Ульянов, Г. Коннал, И.Б. Табакман, Д. Каппс // Горный журнал. – 2005. – №7. – С. 124-128.
92. Совмен В.К. Опыт внедрения АСУ Wenco на горнотранспортном комплексе Олимпиадинского ГОКа / В.К. Совмен, А.В. Поляков, Д.Ю. Шакин, Г. Коннал, И.Б. Табакман, Д.П. Антоненко // Горный журнал. – 2009. – №11. – С. 105-109.
93. Зырянов И.В. Эффективность внедрения автоматизированных систем управления на карьерном транспорте в АК «Алроса» / И.В. Зырянов, Б.И. Димант, В.Г. Ульянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №3. – С. 76-82.
94. Carter R.A. Fleet dispatch systems accelerate mine productivity // Engineering and Mining Journal. – 2010. – 221 (1). – P. 30-33.
95. Cat launches new MineStar system with expanded features and capabilities // Engineering and Mining Journal. – 2011. – 212 (6). – P. 146-147.
96. Coyle R. Smart mining systems / R. Coyle, S. Holmes // Australian Mining Technology Conference Proceedings. – 2-4 Oct 2007. – P. 1-6.
97. Carter R.A. Location, location, location // Coal Age. – May 2008. – P. 22-24.
98. Carter R.A. Mining with precision // Engineering and Mining Journal. – May 2005. – P. 42-46.
99. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining // Engineering and Mining Journal. – January 2012. – P. 30-32.
100. Клебанов Д.А. Роботизированные технологии добычи полезных ископаемых рождаются в недрах инновационного центра «Сколково» / Д.А. Клебанов, М.А. Макеев // Горная промышленность. – 2012. – №4. – С. 132-133.
101. Герике Б.Л. Фазы развития систем организации и управления карьерным автотранспортом / Б.Л. Герике, П.В. Артамонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 116-119.
102. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 512 с.

103. Вуейкова О.Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горнорудного карьера // Автореф. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2013. – 15 с.

104. Douglas J. Prediction of shovel-truck production: a reconciliation of computer and conventional estimates // Technical report no. 37. – Department of Civil Engineering, Stanford University, USA. – 1964.

105. Morgan W. Determining shovel-truck productivity / W. Morgan, L. Peterson // Mining Engineering. – 1968. – P. 76-80.

106. Kuo Y. Highway earthwork and pavement production rates for construction time estimation // Ph.D. Thesis, University of Texas, USA. – 2004.

107. Захаров А.Ю. О возможности и перспективах выбора рациональных парков экскаваторно-автомобильных комплексов / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 065. – С. 32-39.

108. Справочник. Открытые горные работы / К. Н. Трубецкой [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

109. Анистратов Ю.И. Справочник по открытым горным работам / Ю.И. Анистратов, К.Ю. Анистратов, М.И. Щадов. – М.: НТЦ «ГОРНОЕ ДЕЛО», 2010. – 700 с.

110. Bastos G.S. Methods for truck dispatching systems for open pit mines // Ph.D. Thesis, Aeronautics Institute of Technology, Brazil. – 2010.

111. Bastos G.S. A single-dependent agent approach for stochastic time-dependent truck dispatching in open-pit mining / G.S. Bastos, L.E. Souza, F.T. Ramos, C.H. Ribeiro // 14th Int. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. – Washington DC, USA, 5-7 Oct 2011. – P. 1057-1062.

112. Захаров А.Ю. Возможность реализации непрерывной диспетчеризации на основе решения оптимизационной задачи / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: материалы XIV международной научно-практической конференции, Кемерово, 18-21 сентября 2012 г. – Кемерово, 2012. – С. 166-168.

113. Захаров А.Ю. Алгоритм оперативной диспетчеризации карьерного автотранспорта / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №5. – С. 107-111.
114. Baafi E.Y. Using ARENA to simulate truck-shovel operation / E.Y. Baafi, N. Ataеepour // Mineral Resources Engineering. – 1998. – 7, №3. – P. 253-266.
115. Ataеepour N. ARENA simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes / N. Ataеepour, E.Y. Baafi // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1999. – 13, №3. – P. 125-129.
116. Веретенова Т.А. Планирование транспортных работ на карьере на основе автоматизации расчетов параметров систем массового обслуживания / Т.А. Веретенова, В.Н. Вокин, В.Е. Кисляков // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – №2. – С. 54-57.
117. Журба А.В. Моделирование транспортного процесса на участке угольного разреза / А.В. Журба, М.Е. Корягин, А.В. Хохрин // Труды КГТУ. – 2006. – №4. – С. 126-132.
118. Максимов А.В. Повышение эффективности использования сменного карьерного автопарка // Автореф. ... канд. техн. наук. – Кривой Рог, 1986. – 24 с.
119. Салахияев Р.Г. Имитационное моделирование и автоматизированное управление горнотранспортными работами в карьерах / Р.Г. Салахияев, А.В. Дедюхин, Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлёв // Горный журнал. – 2012. – №1. – С. 82-85.
120. Бахтурин Ю.А. Моделирование работы сложных транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №1. – С. 82-90.
121. Subtil R.F. A practical approach to truck dispatch for open pit mines / R.F. Subtil, D.M. Silva, J.C. Alves // 35th APCOM Symposium. – 2011. – P. 765-777.
122. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.
123. Захаров А.Ю. Исследование транспортного цикла карьерных автосамосвалов / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-2012). Т. 1: материалы XIV международной научно-

практической конференции, Кемерово, ГУ КузГТУ, 1-2 ноября 2012 г. – Кемерово, 2012. – С. 120-123.

124. Корягин М.Е. О возможностях повышения эффективности управления карьерным автотранспортом / М.Е. Корягин, А.Ю. Воронов, Д.Е. Скударнов // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы III международной научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 28-30 ноября 2013 г. – Новокузнецк: Филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2013. – С. 23-26.

125. Воронов А.Ю. Разработка имитационной модели диспетчеризации карьерного автотранспорта // Сборник материалов VI Всероссийской, 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 22-25 апреля 2014 г., Кемерово / ФГБОУ ВПО «Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2014/materials/pdf1/GI/STM/voronov/index.html> (дата обращения: 11.09.15).

126. Захаров А.Ю. Влияние некоторых факторов на производительность карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 74-76.