

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Захаров Александр Юрьевич

Официальные оппоненты:

Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, акционерная компания «АЛРОСА», Якутский научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности «Якутнипроалмаз», заместитель директора по научной работе

Логов Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, главный научный сотрудник Кемеровского филиала

Ведущая организация: – федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

Защита состоится «10» декабря 2015 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
Факс 8 (384-2) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» и на сайте

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2015/vor/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Семькина
Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Вуеикова, М.Е. Корягин, 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 (простои 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 экскаваторов 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 «Перспективы 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** приводится характеристика ЭАК разрезов Кузбасса и обзор исследований по совершенствованию их работы за счёт оптимизации распределения карьерного автотранспорта по пунктам погрузки.

Общий анализ ЭАК разрезов Кузбасса показал, что они характеризуются большим разнообразием парков экскаваторов (от 2 до 11 типоразмеров на одном разрезе) и однородностью парков карьерных самосвалов (от 1 до 3 типоразмеров). В качестве примера объекта исследований выбраны погрузочно-транспортные процессы и техника разреза «Кедровский».

Выявлено, что работа карьерного автотранспорта по традиционному закрытому циклу (с закреплением самосвалов за экскаваторами) приводит к значительным простоям карьерных самосвалов (на разрезе «Кедровский» эти простои составляют около 30%); снижается и уровень использования экскаваторов. Основные резервы сокращения простоев заключены в повышении эффективности диспетчеризации карьерного автотранспорта в ЭАК, на основе чего были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** проведено параметрическое описание предлагаемой двухуровневой диспетчерской модели ЭАК разреза (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема двухуровневой диспетчерской модели ЭАК разреза

Верхний уровень представляет собой линейную программно-целевую модель (ПЦМ) для определения целевых показателей производительности (выработки) экскаваторов и является основой краткосрочного планирования работы ЭАК разреза. Критерием эффективности диспетчеризации *на верхнем уровне*

является выполнение всеми экскаваторами плана погрузки горной массы, соответствующего оптимальному решению ПЦМ.

Общий план погрузки и перевозок для разреза на рабочую смену, задаваемый для верхнего уровня системы диспетчеризации, может быть ограничен минимально- и максимально-возможной сменной выработкой действующего экскаваторного парка предприятия.

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

$$\sum_j Q_j = 3600 \frac{\rho_{\text{п}} \cdot E_{\text{к}j}^{\text{э}} \cdot k_{\text{нк}}}{t_{\text{ц}j}^{\text{э}} \cdot k_{\text{р}}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{упр}} \cdot k_{\text{кл}} \cdot n_j \cdot T_{\text{см}} \cdot k_{\text{эп}}^{\text{ЭАК}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность горной массы в целике, т/м³; $E_{\text{к}j}^{\text{э}}$ – геометрический объём ковша экскаватора j -й модели, м³; $t_{\text{ц}j}^{\text{э}}$ – продолжительность цикла экскаватора j -й модели, с; $k_{\text{нк}}$ – коэффициент наполнения ковша; $k_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления горной массы; $k_{\text{п}}$ – коэффициент потерь погружаемой горной массы; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент управления, учитывающий несоответствие паспортных и фактических параметров забоя, квалификацию машиниста и т.д.; $k_{\text{кл}}$ – коэффициент влияния климата; n_j – количество экскаваторов j -й модели в составе действующего парка экскаваторов; $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, ч ($T_{\text{см}min} = 9$ ч., $T_{\text{см}max} = 12$ ч.); $k_{\text{эп}}^{\text{ЭАК}}$ – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК.

Коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК $k_{\text{эп}}^{\text{ЭАК}}$ представляет собой отношение времени чистой работы карьерных экскаваторов и самосвалов к продолжительности смены с учётом всех регламентированных и неплановых простоев. После преобразований он может быть представлен как:

$$k_{\text{эп}}^{\text{ЭАК}} = 1 - \frac{\sum_1^{N_{\text{с}}} t_{\text{пр}}^{\text{с}} + \sum_1^{N_{\text{э}}} t_{\text{пр}}^{\text{э}}}{T_{\text{см}}(N_{\text{с}} + N_{\text{э}})}, \quad (2)$$

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

Суммарная выработка $\sum_j Q_j$ с вывозом горной массы на n_k отвалов составляет сменный план погрузки и перевозок для разреза.

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

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{mn_j} \sum_{k=1}^{n_k} l_{ik} \cdot q_{ik} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^{mn_j} q_{ik} = Q_k, k = 1, 2, \dots, n_k; \\ \sum_{k=1}^{n_k} q_{ik} = \sum_j Q_j, i = 1, 2, \dots, n_j; \\ q_{ik} \geq 0, i = 1, 2, \dots, mn_j; k = 1, 2, \dots, n_k, \end{cases} \quad (3)$$

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

На нижнем уровне с использованием имитационного моделирования строится алгоритм оптимального распределения карьерных самосвалов между

экскаваторами в реальном масштабе времени на основе оптимального решения, полученного на верхнем уровне. Обратной связью между нижним и верхним уровнями 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 к этому экскаватору, возрастает.

В **третьей главе** определён критерий принятия решений по распределению карьерных самосвалов по пунктам погрузки и разработана имитационная модель ЭАК разреза.

Критерий распределения карьерных самосвалов *на нижнем уровне* диспетчерской модели ЭАК предлагается следующий: минимум суммарных простоев карьерных экскаваторов и самосвалов с учётом их весомостей и приоритетности различных экскаваторов и соответствующих им маршрутов транспортирования горной массы.

В окончательном виде он выглядит так:

$$J = \arg \min_j \frac{(C_c + C_{эj}) \cdot (T_{освj}^э - t_{н.см} - T_{двj}^c)_+ + \delta}{x_j}, \quad (4)$$

где J – номер экскаватора, к которому нужно будет отправить самосвал; C_c , $C_{эj}$ – стоимость (значимость) простоя применяемого в данной группе типа самосвалов и j -го типа экскаваторов соответственно, руб./ч; $T_{освj}^э$ – 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; $t_{н.см}$ – текущее время, прошедшее с начала смены, ч; $T_{двj}^c$ – 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 приоритетное.

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

$$C_{пр} = \sum_j C_{эj} \cdot t_{прj}^э + \sum_j C_c \cdot t_{прj}^c \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $C_{пр}$ – потери от простоев оборудования, руб.; $t_{прj}^э$ и $t_{прj}^c$ – ожидаемое суммарное время простоя экскаваторов и самосвалов соответственно (за смену), ч.

Стоимость простоев каждого вида оборудования можно приближённо определить по следующей формуле (руб./ч):

$$C = \frac{t_{пр} \cdot P_q}{k_{вскр}} \cdot C_y, \quad (6)$$

где $t_{пр}$ – время простоя единицы техники, ч; P_q – средняя часовая производительность единицы техники по вскрыше, м³/ч; $k_{вскр}$ – плановый коэффициент вскрыши, м³/т; C_y – средняя стоимость угля при его реализации, руб./т.

Зависимость (5) одновременно является и оценкой эффективности диспетчерской модели на нижнем уровне. В качестве такой оценки может быть использован и коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК (2).

Работа ЭАК разреза по закрытому циклу (с закреплением самосвалов за экскаваторами), приводит к образованию очередей самосвалов у отдельных экскаваторов, в то время как другие экскаваторы будут простаивать. Общие простои погрузочно-транспортного оборудования – максимальны. Однако работа ЭАК и по открытому циклу (без закрепления вообще) может не принести ожидаемой выгоды из-за неоднородности парков экскаваторов и самосвалов.

Поэтому работу ЭАК разреза предлагается организовывать по комбинированному (открыто-закрытому) циклу с разделением погрузочно-транспортной техники на «группы диспетчеризации» (ГД). В группы сводятся экскаваторы, работающие с одним типом горной массы, расположенные на одном участке горных работ и связанные маршрутами вывоза горной массы с одним отвалом. В группах рекомендуется использовать однотипные карьерные самосвалы, так как это позволит свести к минимуму простои в ожидании погрузки. Внутри этих групп самосвалы работают по открытому циклу.

Установлено, что традиционные детерминированные и марковские модели для исследования процессов в карьерных ЭАК непригодны. Их использование приводит либо к занижению, либо к завышению эксплуатационной производительности ЭАК (для условий разреза «Кедровский» на 31% и 21,4% соответственно). Неадекватность этих моделей устраняется применением имитационного моделирования.

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» (свидетельство о государственной регистрации №2014620773) и программа «Имитационная модель работы экскаваторно-автомобильного комплекса разреза» (свидетельство о государственной регистрации №2014616483).

В процессе проектирования базы данных были определены объекты (сущности) и их свойства (атрибуты), которые должны храниться в ней. Информация условно разделена на первичную, справочную и расчётную. К первичной относится полученная из хронометражных данных и статистически обработанная информация о времени выполнения технологических операций, а также о периодичности отказов и времени ремонта оборудования. К справочной относится информация о действующих на разрезе участках горных работ; пунктах погрузки, разгрузки и пересмены; карьерных экскаваторах и самосвалах, загружающих и перевозящих горную массу; об актуальных маршрутах перевозок, а также о группах диспетчеризации, в которые сведены эти маршруты. Исходя из этого, можно выделить следующие основные сущности БД: «Пункты», «Временные параметры», «Участки», «Экскаваторы», «Самосвалы»,

«Время погрузки», «Направления диспетчеризации», «Подгруппы диспетчеризации» (рис. 2).

Кроме первичной и справочной информации, в базе данных хранится расчётная (вторичная) информация: ожидаемые простои экскаваторов и самосвалов за смену, ожидаемое количество рейсов, выполняемых за смену от каждого экскаватора, параметры приоритетности маршрутов транспортирования горной массы, а также оптимальное распределение самосвалов между четырьмя экскаваторами в закрытом цикле и потери от простоев, возникающие в результате этого распределения.

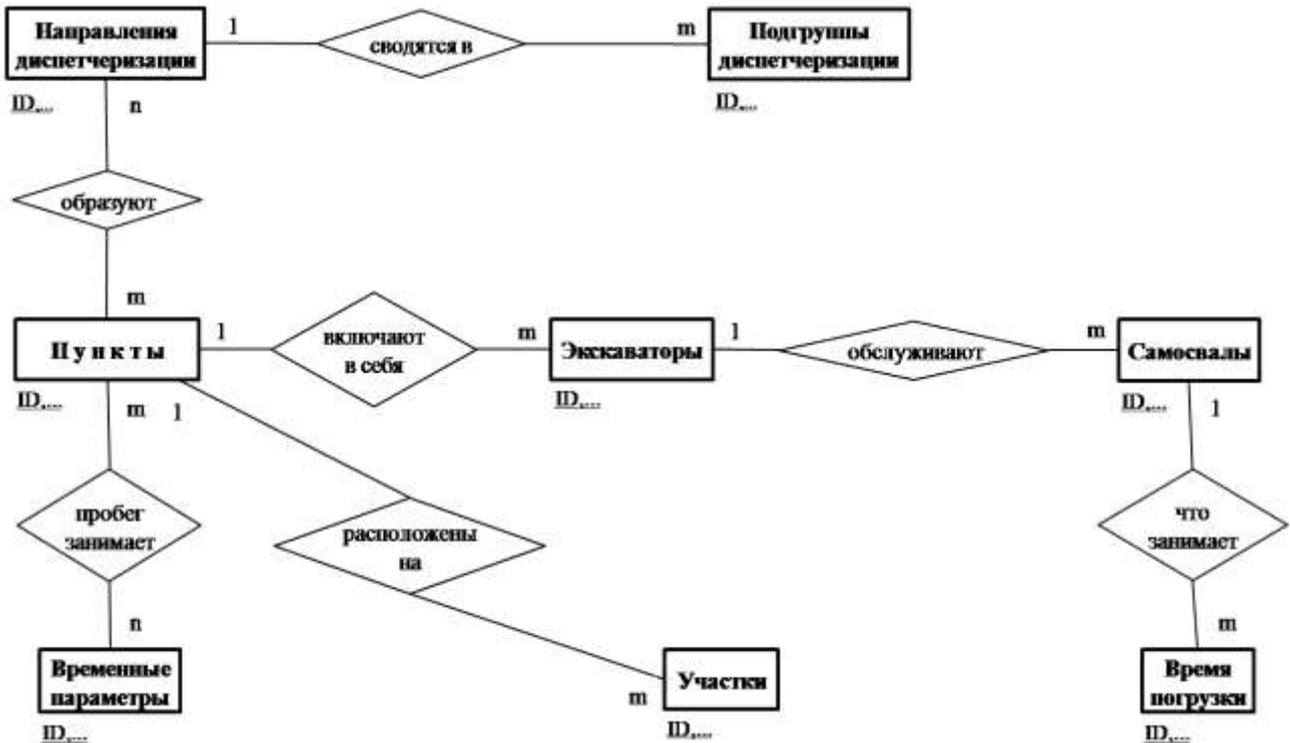


Рисунок 2 – ER-диаграмма базы данных

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 (рис. 3) 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.

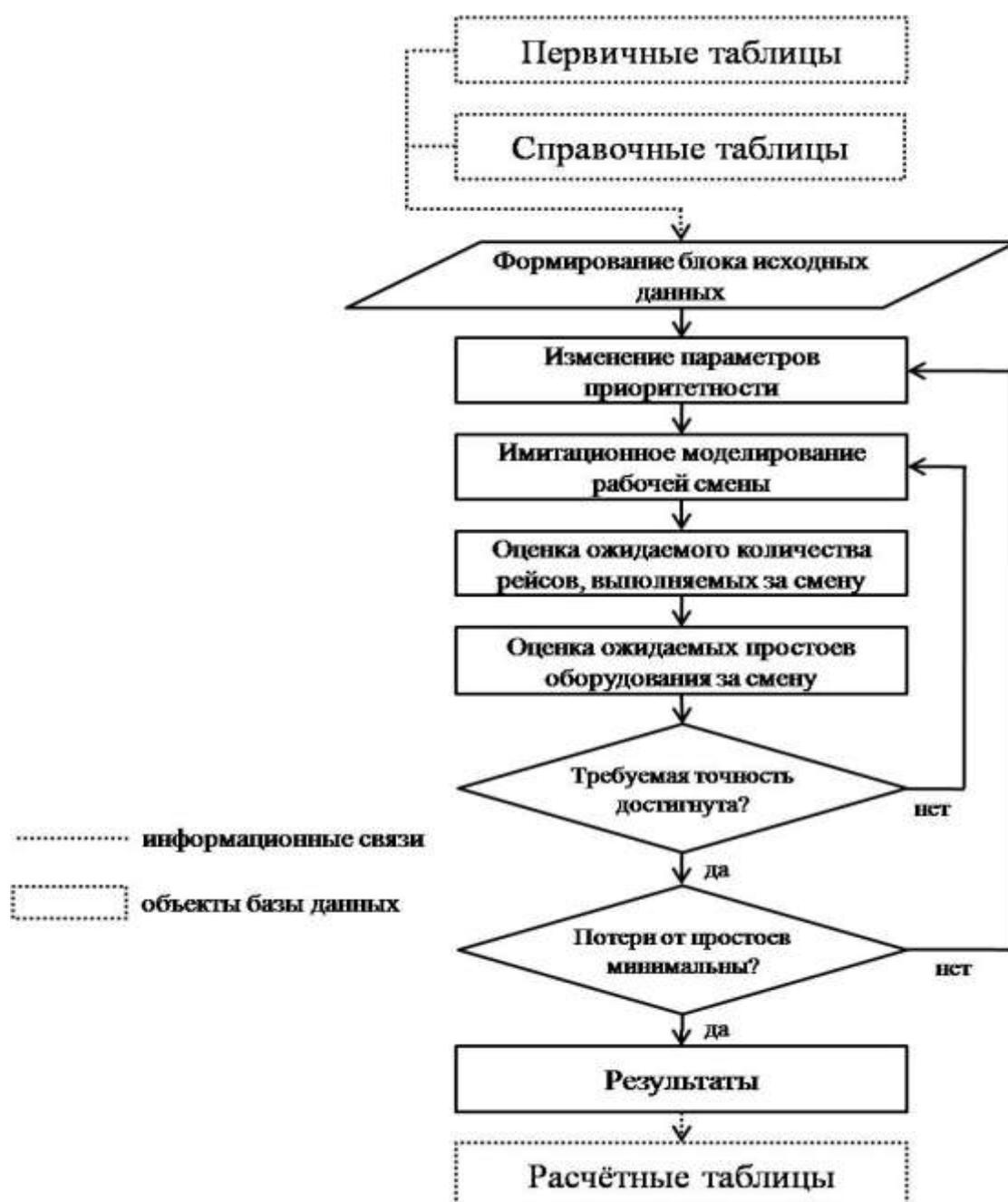


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма оптимизации

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.

Разработанный программный комплекс может использоваться как для моделирования различных ситуаций (изменения числа работающих самосвалов, характеристик маршрутов и т.д.), так и для оптимизации. Алгоритм оптимиза-

ции не учитывает требования к качеству горной массы, поэтому программный комплекс можно применять для оптимизации работы ЭАК только на разрезах. Дальнейшее совершенствование комплекса возможно благодаря разработке математических моделей, учитывающих требования к качеству горной массы.

Предлагаемые в данной работе параметры приоритетности экскаваторов (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 экскаваторов и самосвалов путём некоторого количества «прогонов» имитационной программы. После достижения требуемой точности (доверительная вероятность для сокращения времени расчётов принята равной 90%) имитационная программа выбирает такой набор параметров x_j , который наилучшим образом удовлетворяет критерию (5). При важном изменении в конфигурации ЭАК или разреза в целом эти параметры переоцениваются.

В имитационную модель закладываются фактические значения времени выполнения технологических операций на конкретном разрезе, в которых отражаются все факторы, влияющие на эффективность функционирования ЭАК. Для принятых в данной работе критериев важнейшие факторы следующие: мощность экскаваторов (влияющая на скорость загрузки); соответствие самосвала тому или иному экскаватору; расстояние транспортирования; скоростные характеристики самосвалов, зависящие, в том числе, от их технического состояния и квалификации водителей; возможность и закономерности выхода из строя и восстановления работоспособности оборудования; показатели внешней горной среды. Может оказаться, что при прочих равных условиях учёт параметра приоритетности x_j будет иметь решающее значение для направления самосвала именно к этому экскаватору. До настоящего времени параметр приоритетности в критериях принятия диспетчерских решений по распределению карьерного автотранспорта не учитывался.

Для описания стохастических временных характеристик погрузочно-транспортного процесса по разрезу «Кедровский» предпочтительным является гамма-распределение, что подтверждено оценкой по критерию согласия χ^2 . Незначительные расхождения между модельными и фактическими значениями выбранных для сравнения показателей количества рейсов карьерных самосвалов за смену (1,65%), и времени их простоев (5,2%) свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели работы ЭАК разреза.

В **четвёртой главе** проанализированы результаты имитационного моделирования работы ЭАК разреза по предложенному алгоритму, а также сформулированы рекомендации по реализации разработанного программного комплекса, подкреплённые экономическим обоснованием.

Для условий разреза «Кедровский» предлагается выделить две группы диспетчеризации. Это группа №1 в составе экскаваторов ЭКГ-15 №42 и ЭКГ-12ус №12, и группа №2 в составе экскаваторов Р&Н-2800 №152 и ЭКГ-12ус №9, работающих на отвал «Центральный». Различие ГД №1 и №2 состоит в том, что в ГД №1 экскаваторы близки по мощности, а в ГД №2 – существенно

различаются. Стоимости 1 часа простоя 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. Качество распределения машин оценивалось по критериям (5) и (2).

Подтверждено преимущество комбинированного цикла по сравнению с закрытым и открытым циклами. Потери от простоев в ГД №1 при оптимальном количестве самосвалов по сравнению с закрытым циклом сокращаются на 3,1% (рис. 4, а). Оценка по коэффициенту эксплуатационной производительности ЭАК (2) даёт его увеличение в ГД №1 на 0,94%. В ГД №2 (рис. 4, б) улучшение более значительно: по простоям – на 12,6%; по $k_{\text{ЭП}}^{\text{ЭАК}}$ – на 2,65%. По сравнению с открытым комбинированный цикл сокращает потери от простоев на 3,7%.

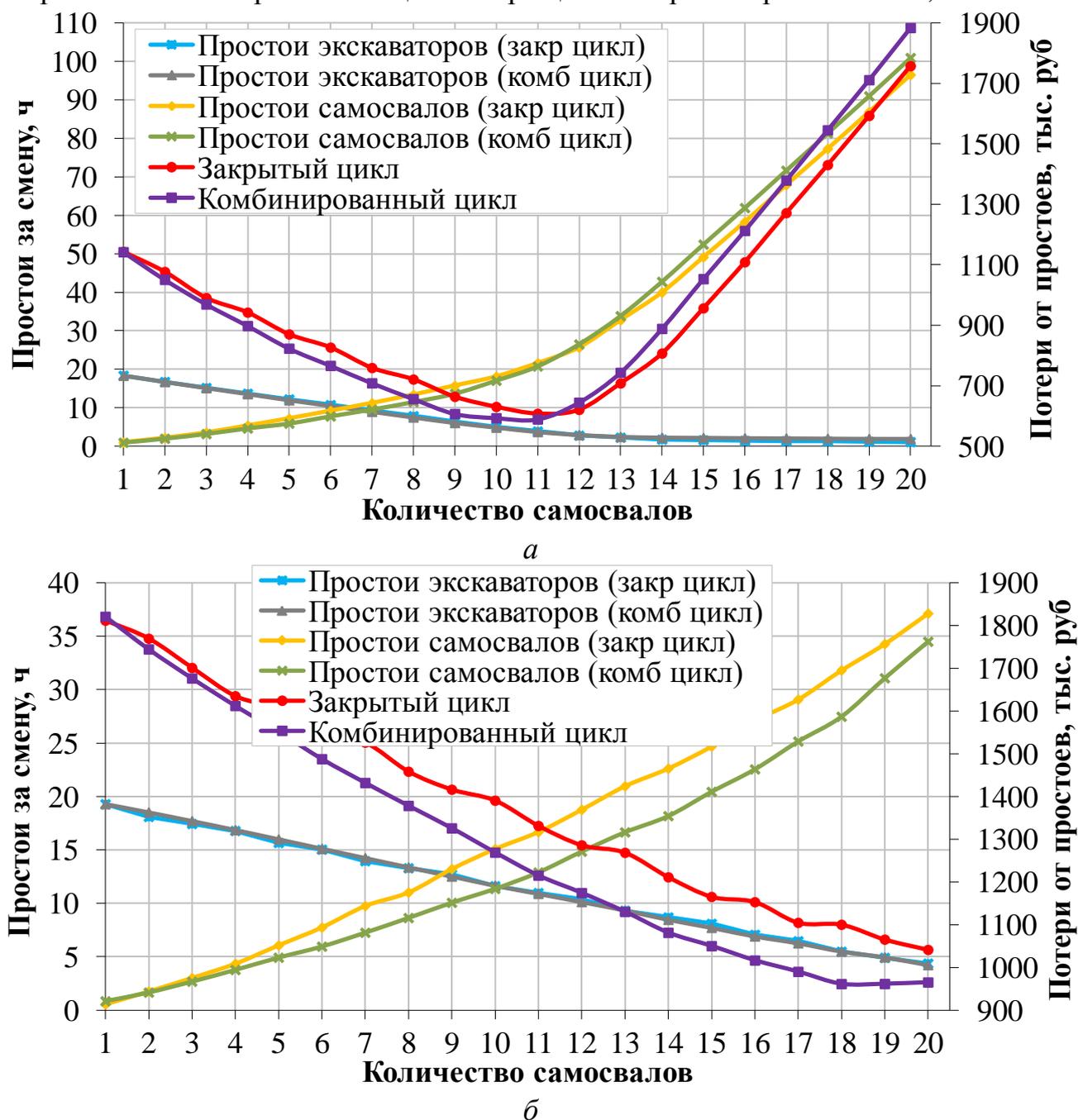


Рисунок 4 – Зависимость финансовых потерь от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (а – для ГД №1; б – для ГД №2)

Как видно из графиков, приведённых на рис. 4, зависимости потерь за смену от количества самосвалов в ЭАК всегда имеют минимум. Слева от минимума располагается зона недогруженности ЭАК самосвалами; справа – перегруженности.

Исследования приоритетности экскаваторов (маршрутов) показывают, что большей приоритетностью обладают, как правило, экскаваторы более производительные, даже вне зависимости от расстояния транспортирования. Отсюда следует, что мощность экскаватора является главным фактором, влияющим на текущее распределение самосвалов. Пример изменения параметра приоритетности для ГД №2 показан на рис. 5.

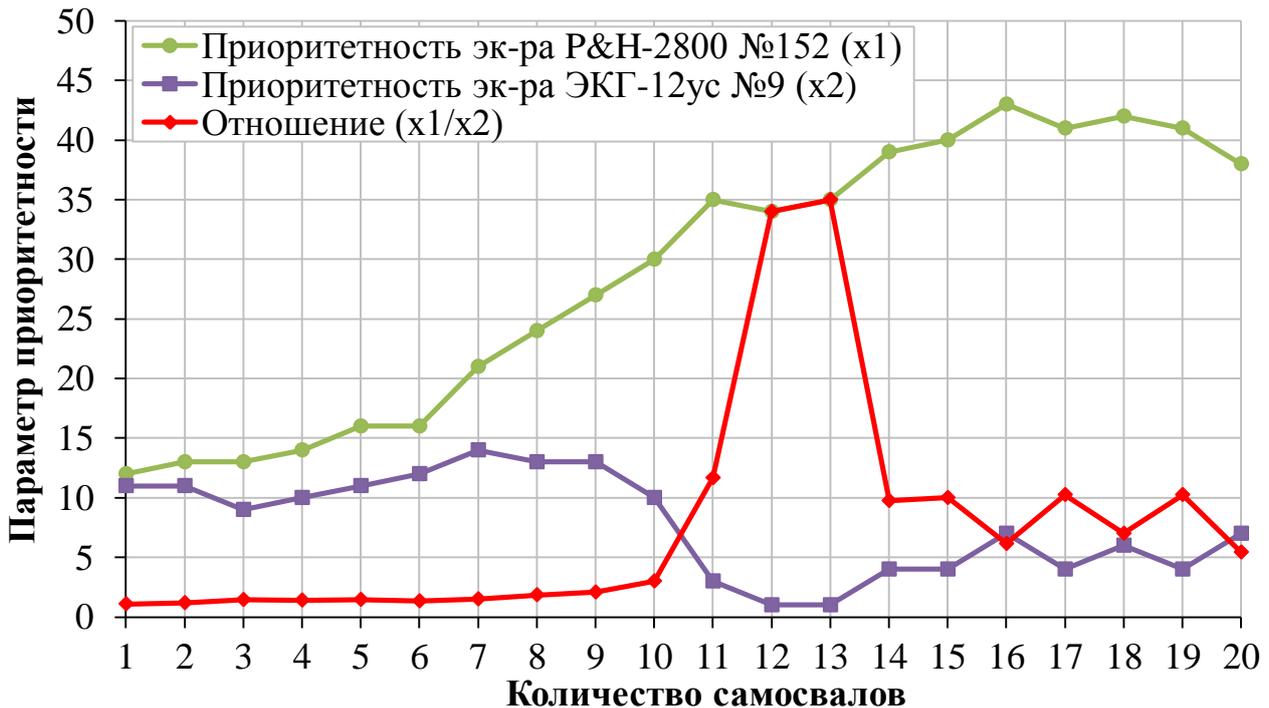
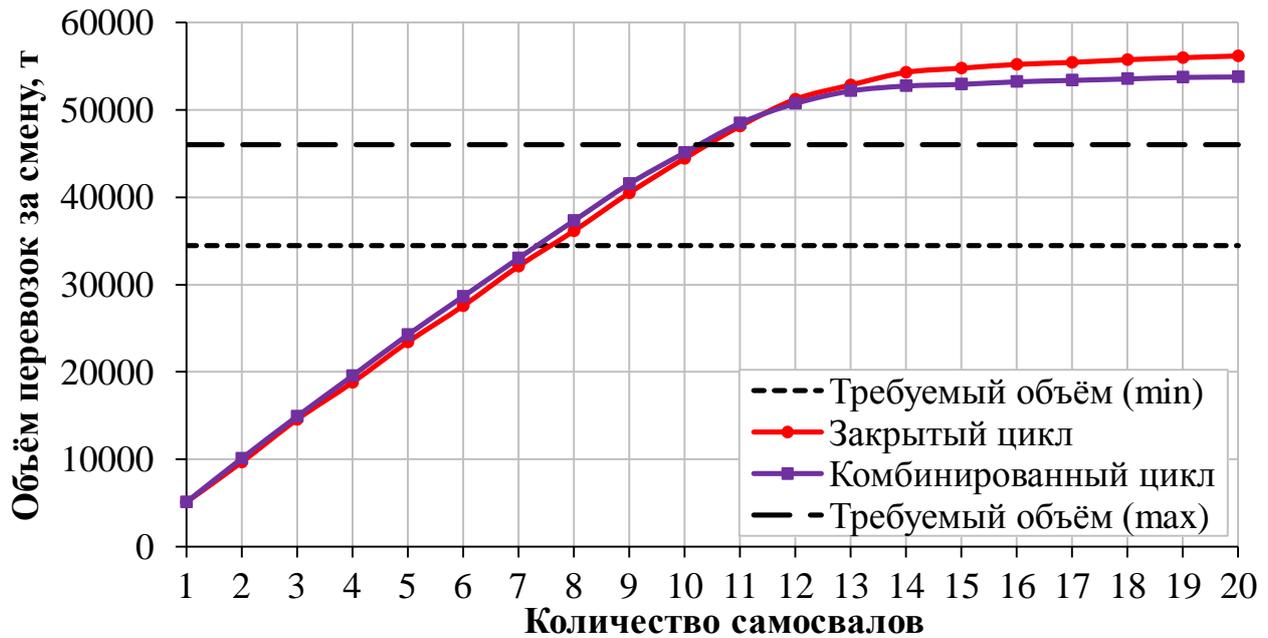


Рисунок 5 – Зависимость приоритетности маршрутов от количества самосвалов при комбинированном цикле работы для ГД №2

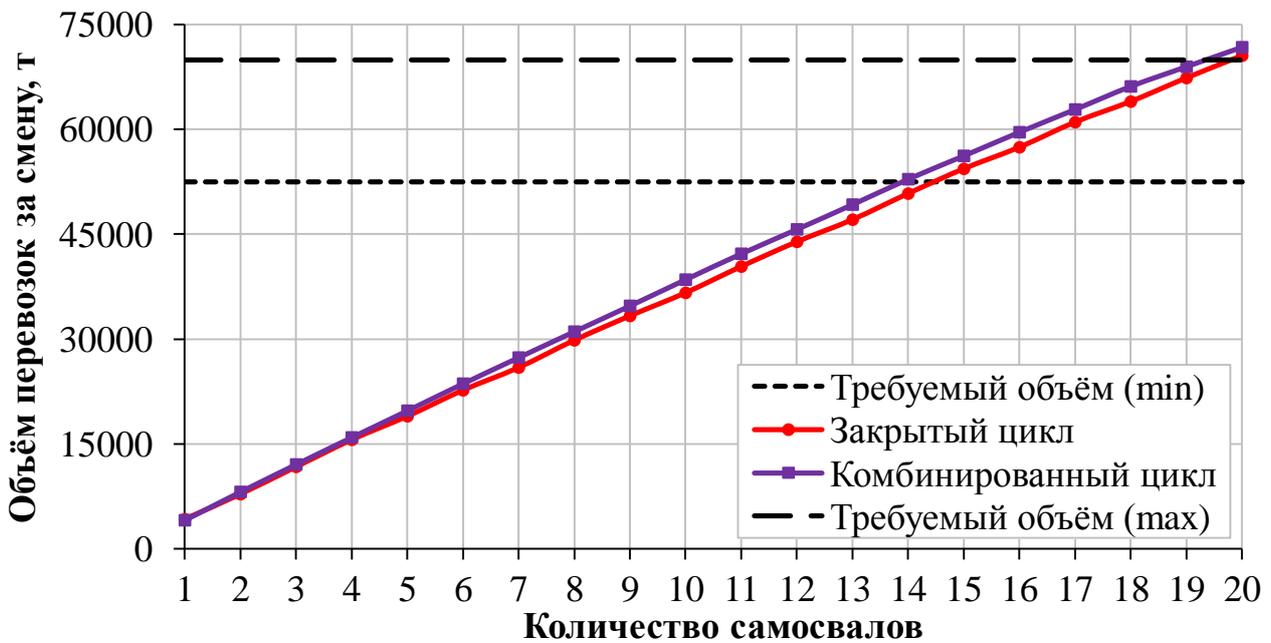
Оптимальный состав парка работающих самосвалов не всегда достижим на практике, поскольку на предприятии может не быть в наличии требуемого количества самосвалов необходимого типоразмера. Поэтому придётся ограничиться числом машин, обеспечивающим выполнение минимальной требуемой сменной выработки, которая примерно соответствует реальной производительности экскаваторов (рис. 6).

Следовательно, в случае отсутствия срочных заказов на уголь имеет смысл не повышать производительность ЭАК, а сокращать издержки.

Оценка экономической эффективности предлагаемой организации работы ЭАК разреза «Кедровский» и численности парка карьерных самосвалов проводится при следующих условиях. Рассматривается базовый вариант, когда ЭАК работает по закрытому циклу с количеством самосвалов в группах, работавшим фактически («базовый»), а также проектный вариант – с количеством самосвалов, обеспечивающим выполнение минимального сменного задания погрузки и вывоза горной массы по комбинированному циклу («проект»).



а



б

Рисунок 6 – Зависимость сменной выработки от количества самосвалов при закрытом и комбинированном циклах работы (а – для ГД №1; б – для ГД №2)

Экономия от внедрения комбинированного цикла рассчитывается как:

$$E = (C_{\text{пр}}^{\text{баз}} - C_{\text{пр}}^{\text{проект}}) \cdot N_{\text{см}}^{\text{пер}}, \quad (7)$$

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:

$$\mathcal{E} = E - \frac{C_0 \cdot N_{\text{с}}^{\text{треб}}}{T_{\text{ок}}^{\text{норм}}}, \quad (8)$$

где C_0 – стоимость нового карьерного самосвала с учётом доставки, руб. (для БелАЗ-75306 по данным предприятия равна 67,438 млн. руб.); $N_c^{\text{треб}}$ – количество самосвалов, которые требуется приобрести для выполнения условий проектного варианта; $T_{\text{ок}}^{\text{норм}}$ – нормативный срок окупаемости капитальных вложений, мес.

Величина наработки на 90%-й ресурс для самосвала БелАЗ-75306, согласно паспорту, 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.

Для обеих ГД, когда по варианту «проект» высвобождается один самосвал, и если считать, что его можно реализовать по цене нового, или не приобретать при обновлении парка, экономический эффект можно определить следующим образом:

$$\mathcal{E} = E + \frac{C_0}{T_{\text{ок}}^{\text{норм}}} \cdot \quad (9)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу 1.

Высвобождение одного самосвала в ГД №1 приводит к небольшому сокращению потерь от простоев карьерного 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. В ГД №2 сокращение парка самосвалов даёт значительную экономию в плане 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.

Таблица 1 – Основные технико-экономические показатели работы 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 $C_{\text{пр}}$, 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

Таким образом, комбинированный цикл (режим) работы ЭАК разреза способен дать экономический эффект не только за счёт сокращения потерь от простоев, но и за счёт сокращения числа используемых самосвалов.

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 различные 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Захаров А.Ю. О возможности и перспективах выбора рациональных парков экскаваторно-автомобильных комплексов / А.Ю. Захаров, **А.Ю. Воронов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 05. – С. 32-39.

2. Захаров А.Ю. Алгоритм оперативной диспетчеризации карьерного автотранспорта / А.Ю. Захаров, **А.Ю. Воронов** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №5. – С. 107-111.

3. 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.

Свидетельства о регистрации баз данных и программ для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2014620773 РФ. Экскаваторно-автомобильный комплекс разреза / **А.Ю. Воронов**, М.Е. Корягин. – № 2014620463 ; заявл. 14.04.14 ; опубл. 28.05.14.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014616483 РФ. Имитационная модель работы экскаваторно-автомобильного комплекса разреза / М.Е. Корягин, **А.Ю. Воронов**. – № 2014613317 ; заявл. 14.04.14 ; опубл. 25.06.14.

Прочие публикации по теме исследования

6. Воронов А.Ю. Анализ критериев оптимизации непрерывного распределения карьерных автосамосвалов по пунктам погрузки // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-2010). Т. 1: материалы XIII межд. науч.-практ. конф., ГУ КузГТУ, 28-29 окт. 2010 г. – Кемерово, 2010. – С. 188-192.

7. 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 межд. науч.-практ. конф., 18-21 сент. 2012 г. – Кемерово, 2012. – С. 166-168.

8. 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 межд. науч.-практ. конф., ГУ КузГТУ, 1-2 нояб. 2012 г. – Кемерово, 2012. – С. 120-123.

9. 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 межд. науч.-практ. конф., 28-30 нояб. 2013 г. – Новокузнецк: Филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2013. – С. 23-26.

10. Воронов А.Ю. Разработка имитационной модели диспетчеризации карьерного автотранспорта // Сборник материалов VI Всерос., 59-й науч.-практ. конф. с междунар. участием «Россия молодая», 22-25 апр. 2014 г. / 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>.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 2, 3, 7] – разработка теоретических положений, выполнение расчётов;

[4, 5] – разработка моделей и алгоритмов, их программная реализация;

[8, 9] – проведение вычислительных экспериментов, обработка результатов, общий анализ.