

На правах рукописи



Воронов Антон Юрьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-
АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ
(на примере АО «УК «Кузбассразрезуголь»)**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2022

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

Научный руководитель: **Хорешок Алексей Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор, директор
Горного института

Официальные оппоненты: **Комиссаров Анатолий Павлович,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры горных машин и комплексов Федераль-
ного государственного бюджетного образова-
тельного учреждения высшего образования
«Уральский государственный горный универси-
тет» (г. Екатеринбург)

Хажиев Вадим Аслямович,
кандидат технических наук, заведующий лабора-
торией эффективной эксплуатации оборудования
ООО «Научно-исследовательский институт эф-
фективности и безопасности горного производ-
ства» (г. Челябинск)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологиче-
ский университет «МИСиС» (г. Москва)

Защита состоится «25» марта 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Куз-
басский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва» по ад-
ресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 68-23-23, e-mail:
haa.omit@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государствен-
ного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбас-
ский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва» и на сайте
<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2021/vor/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Непша
Федор Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для выполнения вскрышных работ на карьерах широко используются мощные экскаваторно-автомобильные комплексы (ЭАК). Одной из основных проблем ЭАК является невысокий уровень качества их функционирования. От качества выполнения погрузочно-транспортных работ зависят технико-экономические показатели открытых горных работ (ОГР) в целом, поскольку транспортные затраты в настоящее время составляют свыше 50% общих затрат на добычу полезного ископаемого. Стремление увеличивать единичную мощность карьерных самосвалов и экскаваторов, характерное для современного этапа развития карьерных ЭАК, не сопровождается, однако, соответствующим ростом их производительности и показателей использования. Это приводит лишь к количественному росту экскаваторного и автотранспортного парков без существенного улучшения качества их работы. Связано это в основном с недостаточным учётом влияния совместной работы экскаваторов и самосвалов на эффективность ЭАК.

Известно, что мощным средством повышения эффективности и качества технических объектов является оптимизация их работы. В связи с этим задача оптимизации параметров ЭАК разрезов для повышения качества их функционирования и создания на этой основе погрузочно-транспортных комплексов нового поколения представляется актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности. Существенный вклад в развитие теории и практики использования ЭАК на ОГР внесли К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, М.Г. Потапов, А.Ю. Захаров, И.В. Зырянов, Ю.И. Лель, А.П. Комиссаров, А.А. Хорешок, О.Н. Вуейкова, С.Н. Зарипова, Ц. Нанзад, С. Burt, S. Alarie и др. Они в своих работах обобщили опыт эксплуатации ЭАК, определили область рационального использования их на ОГР, отразили вопросы технико-экономического анализа эффективности применения данных комплексов на карьерах. Однако несогласованность совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК оставляет качество функционирования ЭАК на невысоком уровне. Связано это с недостаточной разработанностью теории оптимального проектирования горных комплексов.

Цель работы – обоснование и определение оптимальных параметров ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезуголь».

Идея работы заключается в использовании для оптимизации работы ЭАК разрезов критериев качества.

Объект исследования – экскаваторно-автомобильные комплексы разрезов УК «Кузбассразрезуголь».

Предмет исследования – совместная работа экскаваторных и автотранспортных парков в составе ЭАК разреза.

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

1. Разработать методику и провести сравнительную интегральную оценку качества работы ЭАК на разрезах УК «Кузбассразрезуголь».
2. Разработать на основе системного подхода и методов интегральной оценки методику оптимизации параметров ЭАК.

3. Провести оптимизацию параметров совместной работы карьерных экскаваторов и автосамосвалов и разработать методику формирования на их основе оптимальных парков техники ЭАК.

Методология и методы исследований. В работе использовались как общенаучные, так и специальные методы исследований: научное обобщение, методы интегральной оценки качества, оптимизационное моделирование и линейное программирование. Для установления зависимостей оптимизационной математической модели использованы методы статистической обработки данных, анализа и синтеза.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Критерии оценки качества и оптимизации совместной работы экскаваторного и автотранспортного парков в составе ЭАК разреза представляются в виде соотношения интенсивностей поступления карьерных самосвалов под погрузку и обслуживания их экскаваторами.

2. Оптимальный уровень качества работы ЭАК разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь» обеспечивается достижением значений параметров в следующих пределах: количество самосвалов на один экскаватор – $4,9 \div 6,3$; время загрузки самосвала экскаватором – $3,2 \div 3,9$ мин; продолжительность рейса самосвала – $17,6 \div 28,8$ мин. Это позволяет сократить численность экскаваторного и автотранспортного парков (или увеличить производительность) ЭАК на 9%.

Достоверность научных результатов подтверждается выбором представительных критериев, характеризующих качество работы ЭАК, достаточным объёмом аналитических исследований, выполненных с применением апробированных методов статистического и системного анализа.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- предложен новый критерий оценки качества и оптимизации совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК разреза;
- установлены диапазоны оптимальных значений параметров ЭАК, достижение которых обеспечивает оптимальный уровень качества работы действующих и вновь проектируемых ЭАК;
- предложен метод формирования оптимальных парков погрузочно-транспортной техники, базирующийся на системном рассмотрении функционирования ЭАК в целом и взаимодействия парков техники внутри ЭАК.

Личный вклад автора заключается: в определении цели, постановке задач исследования и разработке методов их решения; в разработке методик интегральной оценки качества и оптимизации параметров ЭАК разрезов. В рамках отдельных разделов диссертации личный вклад автора состоит в установлении закономерностей формирования и разработке регрессионных моделей оптимизационной модели функционирования ЭАК.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке нового подхода к оптимизации параметров и формированию оптимальных парков погрузочно-транспортной техники ЭАК разрезов по критерию качества и создании комплекса методик для их реализации. Разработанный аппарат оптимизации позволяет за счёт оптимального согласования параметров расширить функциональные и эксплуатационные возможности ЭАК.

Научно-практические рекомендации по оценке качества, оптимальному проектированию и совершенствованию ЭАК могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными и эксплуатирующими организациями как механизм выбора из предлагаемой техники перспективных моделей, создания карьерных погрузочно-транспортных комплексов нового поколения с возможностью адаптации их к конкретным условиям эксплуатации.

Научные положения, разработанные в диссертации, могут быть использованы для оптимизации не только карьерных ЭАК, но и комплексов другого технологического назначения.

Реализация результатов работы. Основные научные результаты работы внедрены в проектной новационной фирме «КУЗБАСС-НИИОГР», эксплуатирующей организации (АО «УК «Кузбассразрезуголь»). К их числу относятся методические материалы по оценке качества и установлению оптимальных параметров ЭАК разрезов, рекомендации по совершенствованию ЭАК.

Апробация работы. Работа и её отдельные части докладывались и получили одобрение на III Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2019 г.), на XI Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных «Россия молодая» (г. Кемерово, 2020 г.), на 4-м, 5-м и 6-м Международных инновационных горных симпозиумах (г. Кемерово, 2019, 2020, 2021 гг.), на VII Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (г. Прокопьевск, 2020 г.), на XXIX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2021» (г. Москва, 2021 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, в том числе 6 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, 3 работы в изданиях, индексируемых в международных базах.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 171 странице машинописного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 117 наименований, содержит 16 рисунков, 37 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены актуальность темы, степень ее разработанности, на основе чего сформулированы цель, идея и задачи исследования. Приведены основные научные положения, выносимые на защиту, их обоснованность и достоверность полученных результатов, теоретическая и практическая значимость работы, ее апробация и реализация.

В **первой главе** изложено современное состояние и проблемы функционирования карьерных ЭАК. Приводится характеристика ЭАК разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь», проведен анализ состояния и перспективы развития техники карьерных ЭАК, указаны основные проблемы оценки качества их функционирования и проектирования.

Большие объёмы горной массы на разрезах, разрабатываемой ЭАК, непосредственное влияние погрузочно-транспортного процесса на темпы открытой угледобычи и его высокая трудоёмкость обуславливают постоянное ведение широкомасштабных работ по совершенствованию средств карьерной экскаваторно-автомобильной техники и организации их совместной работы.

Увеличение единичной мощности погрузочно-транспортной техники, которое является основной тенденцией развития ЭАК, не сопровождается пропорциональным ростом их производительности и улучшением качественных показателей использования. Несогласованность совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК оставляет качество функционирования ЭАК на невысоком уровне. Связано это с недостаточной разработанностью теории оптимального проектирования горных машин и комплексов (в том числе и ЭАК).

Основы такой теории заложены в работах В.В. Аксёнова, В.Д. Буткина, Б.Л. Герике, С.Н. Зариповой, И.В. Зырянова, Л.И. Кантовича, А.П. Комиссарова, В.И. Нестерова, В.А. Перетолчина, Р.Ю. Подэрни, Н.М. Скорнякова, В.И. Солода, Г.И. Солода и др., однако в аппарате проектирования карьерных ЭАК отсутствуют процедуры синтеза оптимальных решений. Лежащий в основе такого синтеза системный подход при проектировании карьерных ЭАК и оптимизации их работы до настоящего времени практически не использовался.

В работе рассматриваются ЭАК разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь», занятые только на вскрышных работах. Добычные и смешанные ЭАК не рассматривались.

Во **второй главе** разработана методика и проведена интегральная оценка качества работы ЭАК разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Анализ существующих методик оценки качества показал, что для карьерных ЭАК наиболее приемлемым аналогом является методика безэкспертной оценки, позволяющая оценивать функционально-однородные горные машины различной сложности, типов и конструктивных исполнений, известная как методика Г.И. Солода.

Являющийся основой этой методики функциональный критерий (ФК), исходя из системного подхода и специфики работы ЭАК, представляется как отношение интенсивности поступления самосвалов под погрузку к интенсивности обслуживания их экскаваторами. Он в наибольшей степени характеризует согласованность их совместной работы, и определяется по впервые полученным автором зависимостям для однородных и смешанных парков техники:

$$\lambda = \frac{N_c}{\frac{N_{\Sigma}}{t_{\Pi}^{\Sigma}} \cdot t_p \cdot k_{\text{ЭАК}}}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{N_c}{\sum_1^{N_{\Sigma}} \left[\frac{N_{\Sigma j}}{\sum_1^{N_c} (t_{\Pi ij}^{\Sigma} \cdot N_{ci})} \right] \cdot \sum_1^{N_c} (t_{pi} \cdot N_{ci}) \cdot k_{\text{ЭАК}}}. \quad (2)$$

где N_c , N_{ci} – общая численность автотранспортного парка ЭАК и количество самосвалов i -го типоразмера соответственно; N_{Σ} , $N_{\Sigma j}$ – общая численность экскава-

торного парка ЭАК и количество экскаваторов j -го типоразмера; $t_{п}^э, t_{п_{ij}}^э$ – время полной загрузки средневзвешенного самосвала средневзвешенным экскаватором и время загрузки j -м экскаватором i -го самосвала, мин; t_p, t_{p_i} – продолжительность рейса средневзвешенного самосвала и каждого i -го самосвала, мин; $k_{ЭАК}$ – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК, представляющий собой отношение чистого времени работы экскаваторов и самосвалов к продолжительности смены с учётом всех внутрисменных простоев; $k_{ЭАК} = 1 - \frac{t_{пр\Sigma}^э + t_{пр\Sigma}^с}{T_{см}(N_э + N_с)}$, где $t_{пр\Sigma}^э, t_{пр\Sigma}^с$ – суммарные простои $N_э$ экскаваторов и $N_с$ самосвалов в течение рабочей смены $T_{см}$ соответственно, мин.

Важным вопросом оценки является также обоснованный выбор необходимой и достаточной номенклатуры показателей качества работы ЭАК. Эта номенклатура должна учитывать специфику функционирования ЭАК и соответствовать цели оценки качества, которая определена нами в виде ФК. В результате сформирован комплекс из 7 единичных показателей качества, которые охватывают и детализируют все основные показатели ФК, и включают в себя специфические для ЭАК показатели состава и структуры, производительности, величины и структуры простоев, а также производительного использования экскаваторного и автотранспортного парков (рисунок 1). Показатели качества на рисунке выделены жирным шрифтом и красным цветом.

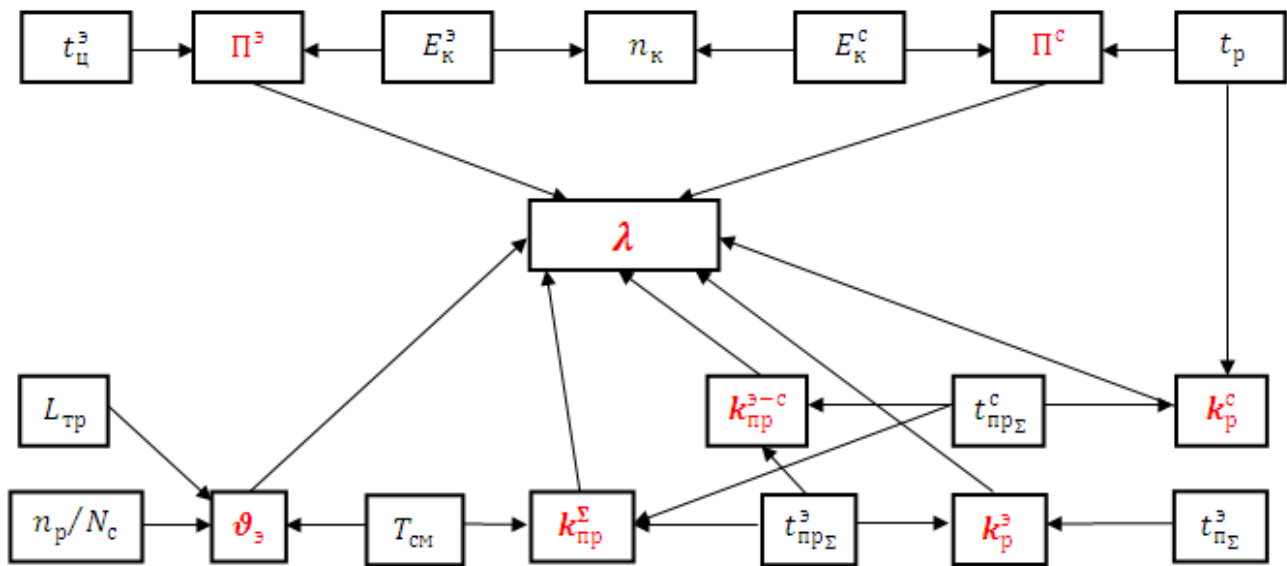


Рисунок 1 – Комплекс показателей качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезв

На рисунке 1: λ – функциональный критерий; $\Pi^э = E_к^э/t_ц^э$ – показатель производительности экскаваторного парка, м³/мин; $\Pi^с = E_к^с/t_p$ – показатель производительности автотранспортного парка, м³/мин; $\theta_э = 2L_{тр}n_p/N_сT_{см}$ – эксплуатационная скорость самосвалов, км/ч; $k_{пр}^Σ = (t_{пр\Sigma}^э + t_{пр\Sigma}^с)/T_{см}$ – доля простоев погрузочно-транспортной техники в продолжительности рабочей смены; $k_{пр}^{э-с} = t_{пр\Sigma}^э/t_{пр\Sigma}^с$ – соотношение простоев экскаваторов и самосвалов;

$k_p^a = t_{\text{пс}}^a / t_{\text{прс}}^a$ – уровень производительного использования экскаваторного парка; $k_p^c = t_{\text{пс}}^c / t_{\text{прс}}^c$ – уровень производительного использования автотранспортного парка; E_k^a – вместимость ковша экскаватора, м^3 ; $t_{\text{ц}}^a$ – время цикла экскаватора, мин; E_k^c – вместимость кузова самосвала, м^3 ; t_p – продолжительность рейса самосвала, мин; n_k – количество загружаемых в кузов самосвала ковшей экскаватора; $L_{\text{тр}}$ – расстояние транспортирования, км; $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, мин; n_p / N_c – количество рейсов, выполненных каждым самосвалом в течение смены; n_p – количество рейсов, выполненных автотранспортным парком в течение смены; N_c – число самосвалов в составе автотранспортного парка; $t_{\text{пс}}^a$ – суммарное время загрузки самосвалов экскаваторами в течение смены, мин; $t_{\text{прс}}^a$, $t_{\text{прс}}^c$ – суммарные простои экскаваторного и автотранспортного парков в течение смены соответственно, мин.

По выбранным показателям произведена сравнительная оценка качества работы ЭАК разрезов, входящих в состав УК «Кузбассразрезуголь» и Компании в целом, на основании сводных отчётов об их работе, составленных по фактическим данным предприятий.

Диаграмма комплексного показателя качества работы ЭАК разрезов k с указанием функционального критерия λ приведена на рисунке 2.

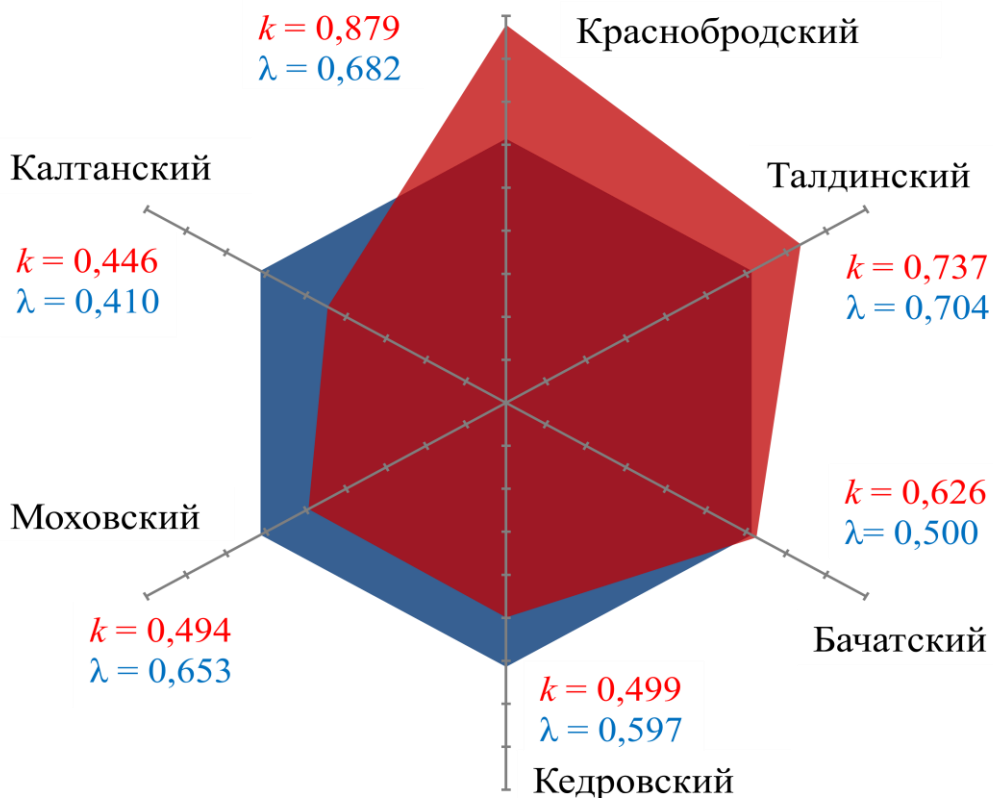


Рисунок 2 – Диаграммы комплексного показателя качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов (синим цветом – в целом по АО «УК «Кузбассразрезуголь»; $k^{\text{кпу}} = 0,614$)

Анализ диаграммы показывает, что у трёх («Краснобродский», «Талдинский» и «Бачатский») из шести разрезов он выше значения 0,614, как общего по

УК «Кузбассразрезуголь», и у трёх («Моховский», «Кедровский» и «Калтанский») – довольно сильно отстаёт. Причина – большое различие в значениях единичных показателей качества из-за разной степени согласованности совместной работы экскаваторных и автотранспортных парков ЭАК. Разрез «Краснобродский» является эталонным по четырём из семи единичных показателей качества, в результате чего он и занимает 1-е место в ранжированном списке. Разрез «Талдинский» является первым по двум единичным показателям и занимает 2-е место. И завершает тройку лидеров разрез «Бачатский», который является лучшим по одному единичному показателю. Разрезы-аутсайдеры не являются эталонными ни по одному единичному показателю.

На диаграмме видно также, что величина комплексного показателя качества k во многом зависит от ФК, который, согласно зависимости (1), определяется соотношением численности автотранспортного и экскаваторного парков в составе ЭАК разреза (N_c/N_Σ), их простоями ($k_{\text{ЭАК}}$), временем погрузки ($t_{\text{п}}^{\text{э}}$) и продолжительностью рейса самосвалов (t_p). Одни из них надо увеличивать, другие – уменьшать, а вот какими конкретно должны быть значения этих параметров, притом, что качество работы ЭАК должно быть наивысшим, установить при оценке качества не представляется возможным. Их можно определить только в результате оптимизации параметров ЭАК.

Таким образом, анализ качества работы ЭАК разрезов позволяет сделать вывод о том, что его повышение может быть достигнуто за счёт оптимального проектирования ЭАК, которое позволяет определить и оптимально сбалансировать указанные выше параметры ЭАК. Решение этих вопросов может служить серьёзным средством повышения качества работы существующих и вновь создаваемых ЭАК для предприятий открытой угледобычи.

В **третьей главе** разработана оптимизационная модель функционирования и проектирования карьерных ЭАК.

Основой оптимального проектирования является системный подход, позволяющий удерживать объект как целое, когда проектируются его отдельные элементы. Системный подход при определении показателей функционирования ЭАК заключается в том, что они, во-первых, должны соотноситься друг с другом оптимальным образом, и, во-вторых, получаемые на их основе выходные эксплуатационные показатели – отвечать требуемым значениям (рисунок 3).

Карьерный ЭАК как система характеризуется структурой и параметрами. Структура комплекса определяет его составные части и связи между ними и должна обеспечивать оптимальное функционирование, для чего характеризующие работу ЭАК параметры должны быть оптимизированы. В качестве критерия оптимизации удобно использовать уже рассмотренные выше комплексные оценки качества работы ЭАК, поскольку это напрямую связывает режимы работы ЭАК с качеством его функционирования. Соответственно, оптимизируемыми параметрами являются основные параметры ЭАК. Это $k_N = \frac{N_c}{N_\Sigma \cdot k_{\text{ЭАК}}}$ – коэффициент эффективного состава ЭАК; $t_{\text{п}}^{\text{э}}$ – время загрузки самосвала экскаватором, мин; t_p – продолжительность рейса самосвала, мин (см. формулу 1 и рисунок 3).

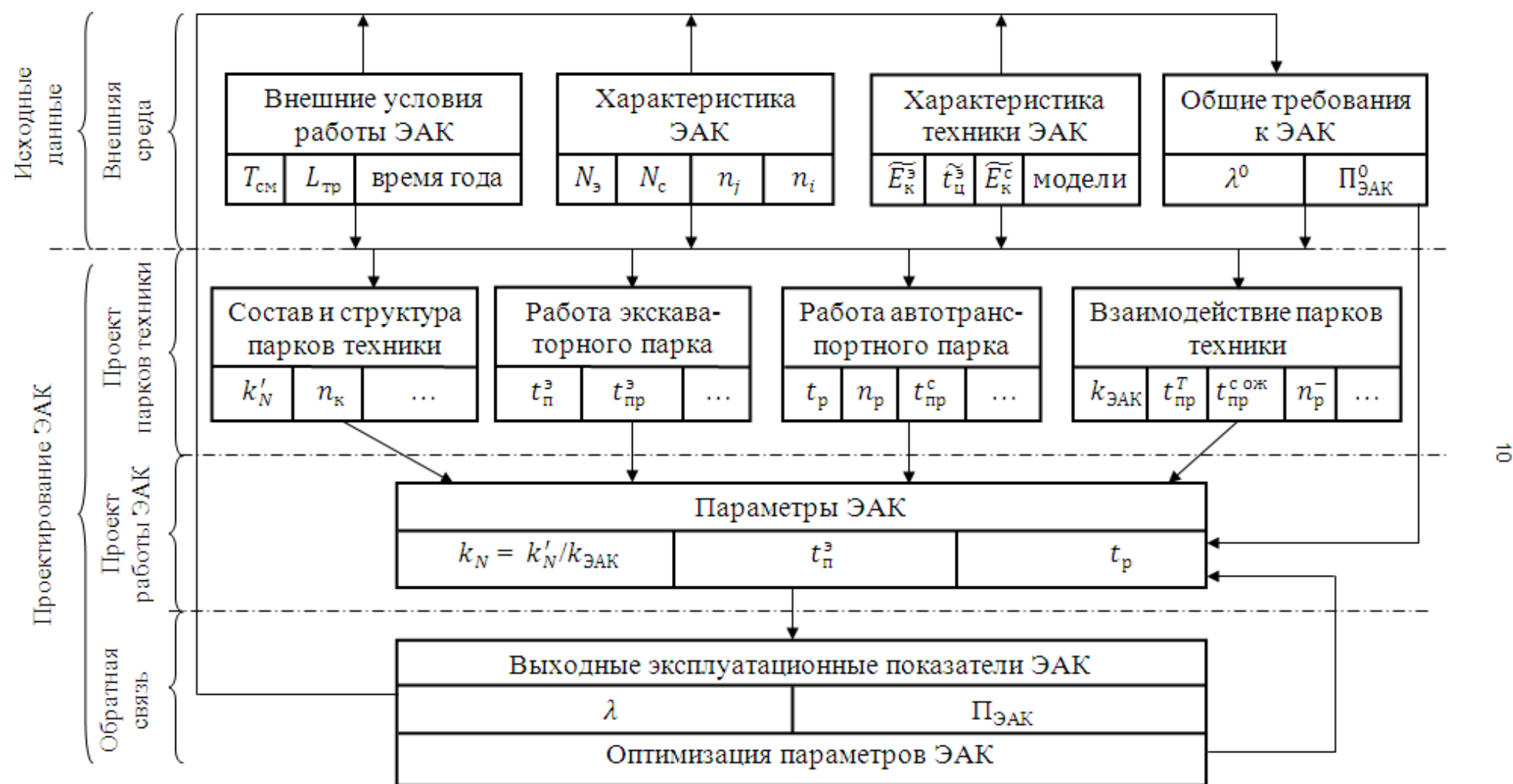


Рисунок 3 – Структурная схема проектирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса и его оптимизации

Поскольку целевой оптимизационный критерий k во многом определяется величиной ФК оценки качества работы ЭАК λ , указанный ФК является по существу и критерием оптимизации параметров ЭАК.

Таким образом, можно утверждать, что **критерии оценки качества и оптимизации совместной работы экскаваторного и автотранспортного парков в составе ЭАК разреза определяются соотношением интенсивностей поступления карьерных самосвалов под погрузку и обслуживания их экскаваторами.**

При решении задачи оптимизации параметров ЭАК действуют следующие ограничения.

1. Ограничения по соответствию фактических значений эксплуатационных показателей λ (ФК), $\Pi_{\text{ЭАК}}$ (производительность ЭАК) требуемым значениям λ^0 , $\Pi_{\text{ЭАК}}^0$ (рисунок 3).

2. Ограничение по взаимосвязи оптимизируемых параметров $t_{\text{п}}^{\text{э}}$ и $t_{\text{р}}$. Уравнение взаимосвязи имеет вид: $t_{\text{п}}^{\text{э}} = 4,978 - 0,0619t_{\text{р}}$ ($r = 0,792$; $F = 211,67 > F_{\text{кр}} = 6,94$; $t = 2,597 < t_{\text{кр}} = 2,776$). Данное ограничение включено ввиду того, что надёжной связи между этими параметрами нет, так как не подтверждена надёжность коэффициента корреляции по t -критерию Стьюдента.

3. Граничные условия, отражающие диапазон изменения оптимизируемых параметров. Анализ показывает, что для всех параметров может быть задано только нижнее граничное условие – и это условие их неотрицательности, то есть $k_N \geq 0$; $t_{\text{п}}^{\text{э}} \geq 0$; $t_{\text{р}} \geq 0$.

Предполагаем линейную связь между целевым критерием и ограничениями и оптимизируемыми параметрами. В результате получена математическая модель оптимизации параметров ЭАК, представляющая собой задачу линейного программирования.

$$\left\{ \begin{array}{l} k = a_0 + a_1 k_N + a_2 t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_3 t_{\text{р}} \rightarrow \max; \\ a_{11} k_N + a_{12} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{13} t_{\text{р}} \geq \lambda^0 - S_0^{\lambda} - a_{10}; \\ a_{11} k_N + a_{12} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{13} t_{\text{р}} \leq \lambda^0 + S_0^{\lambda} - a_{10}; \\ a_{21} k_N + a_{22} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{23} t_{\text{р}} \geq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 - S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}} - a_{20}; \\ a_{21} k_N + a_{22} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{23} t_{\text{р}} \leq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 + S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}} - a_{20}; \\ a_{31} k_N + a_{32} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{33} t_{\text{р}} \geq (t_{\text{п}}^{\text{э}} \div t_{\text{р}})^0 - S_0^t - a_{30}; \\ a_{31} k_N + a_{32} t_{\text{п}}^{\text{э}} + a_{33} t_{\text{р}} \leq (t_{\text{п}}^{\text{э}} \div t_{\text{р}})^0 + S_0^t - a_{30}; \\ k_N \geq 0; t_{\text{п}}^{\text{э}} \geq 0; t_{\text{р}} \geq 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

В результате исследования модели (3) будут получены оптимальные значения коэффициента эффективного состава автотранспортного и экскаваторного парков ЭАК k_N^* , времени загрузки самосвалов экскаваторами $t_{\text{п}}^{\text{э}*}$, продолжительности рейса самосвала $t_{\text{р}}^*$, а также функционального критерия λ^* и комплексного показателя качества k^* . Из этих значений можно синтезировать конкретные оптимальные параметры ЭАК, а также сформулировать принципы

формирования по ним оптимальных парков техники, которые и рекомендовать для совершенствования или проектирования ЭАК разрезов.

Синтез оптимальных параметров ЭАК и формирование на их основе парков погрузочно-транспортной техники базируется на обеспечении оптимального функционирования ЭАК как единой системы с учётом существующих оптимальных взаимосвязей параметров между собой. Порядок формирования оптимальных парков экскаваторов и самосвалов показан ниже.

Данная методика разработана применительно к условиям разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь», однако может быть использована для оптимизации работы ЭАК и для других внешних условий, которые могут задаваться заказчиками. Она предлагает качественно новый подход к формированию основных показателей работы ЭАК с оптимальными параметрами и принята к использованию АО «УК «Кузбассразрезуголь», а также новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» как средство создания карьерных ЭАК нового поколения.

В четвертой главе проведена оптимизация параметров, оценено её влияние на качество работы ЭАК АО «УК «Кузбассразрезуголь», предложен принцип формирования смешанных экскаваторно-автомобильных парков техники с оптимальными параметрами, проведена экономическая оценка результатов оптимизации функционирования ЭАК разреза «Талинский».

Для установления констант линейных моделей целевой функции и ограничений был проведён математический эксперимент по плану полного факторного эксперимента ПФЭ 2^3 . В результате получена математическая модель оптимизации (3) в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k = -0,268 + 0,209k_N + 0,397t_{\Pi}^3 - 0,0415t_p \rightarrow \max; \\ 0,130k_N + 0,230t_{\Pi}^3 - 0,0250t_p \geq 0,917; \\ 0,130k_N + 0,230t_{\Pi}^3 - 0,0250t_p \leq 1,083; \\ t_{\Pi}^3 + 0,0619t_p \geq 4,822; \\ t_{\Pi}^3 + 0,0619t_p \leq 5,134; \\ k_N \geq 5,124; \\ k_N \leq 6,653; \\ k_N \geq 0; t_{\Pi}^3 \geq 0; t_p \geq 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Эксперимент подтвердил линейность моделей целевой функции и ограничений. Она обусловлена тем, что все взаимосвязи между показателями качества работы ЭАК с достаточной степенью точности можно считать линейными, о чём свидетельствуют достаточная значимость параметров регрессии и надёжность коэффициентов корреляции.

В результате решения задачи (4), проведённого с использованием симплекс-метода, установлено, что оптимизируемые параметры могут составлять:

$$k_N = 5,124 \div 6,653; t_{\Pi}^3 = 3,2 \div 3,9; t_p = 17,6 \div 28,8,$$

и их изменение в указанных пределах не повлияет на структуру оптимального решения. Изменяться может только соотношение оптимизируемых параметров, величина функционального критерия λ^* и комплексный показатель качества

работы ЭАК k^* . Это означает, что в указанных пределах при необходимости оптимальные значения можно варьировать, но не произвольно, а с учётом существующих взаимосвязей между ними. Указанные вариационные расчёты представляют довольно простую задачу, что позволяет достаточно быстро и легко оценивать принимаемые решения. Значения оптимизируемых параметров, выходящие за пределы указанных диапазонов, не являются оптимальными, поскольку не отвечают существующим взаимосвязям параметров ЭАК, то есть принципу системности.

Учитывая, что $k'_N = \frac{N_c}{N_g} = k_N \cdot k_{\text{ЭАК}}$, а оптимальное значение коэффициента эксплуатационной производительности ЭАК $k_{\text{ЭАК}}^* = 0,946$, количество самосвалов, приходящихся на каждый экскаватор, будет составлять $k'_N = 4,9 \div 6,3$.

Таким образом, можно утверждать, что **оптимальный уровень качества работы ЭАК разрезов АО «УК «Кузбассразрезуголь» обеспечивается достижением значений параметров в следующих пределах: количество самосвалов на один экскаватор – $4,9 \div 6,3$; время загрузки самосвала экскаватором – $3,2 \div 3,9$ мин; продолжительность рейса самосвала – $17,6 \div 28,8$ мин.**

Оптимальным решением при этом будет следующее сочетание значений оптимизируемых параметров, функционального критерия и критерия оптимизации:

$$k_N^* = 6,60; t_{\text{п}}^* = 3,6 \text{ мин}; t_{\text{р}}^* = 24,5 \text{ мин}; \lambda^* = 0,983; k^* = 1,355 \quad (5)$$

для всех разрезов УК «Кузбассразрезуголь».

Надо отметить, что при изменении горнотехнических условий разрезов (численный и типоразмерный состав парков техники, расстояния транспортирования, уровень простоев, и т.д.) приведённые оптимальные решения могут корректироваться.

Установлено, что оптимальное согласование параметров повышает уровень качества работы ЭАК k по сравнению с лучшим из ЭАК действующего разреза «Краснобродский» с 0,879 до 1,355 (на 33%), и на 53% – по сравнению с уровнем качества работы ЭАК по УК «Кузбассразрезуголь» в целом ($k = 0,614$). Функциональный критерий при этом составляет $\lambda = 0,983$ и близок к оптимальному значению $\lambda = 1$.

Структурная схема формирования парков техники ЭАК с оптимальными параметрами приведена на рисунке 4.

Оптимизация работы ЭАК однозначно сопровождается возможностью сокращения парка самосвалов, и иногда и экскаваторов. Корректировка существующих парков экскаваторов и самосвалов под работу в оптимальном режиме производится следующим образом.

1. Производится сравнение оптимальных и фактических значений вместимостей ковша экскаватора $\tilde{E}_k^{\text{э}}$ и кузова самосвала $\tilde{E}_k^{\text{с}}$. Если фактические значения вместимости ковша экскаватора или кузова самосвала меньше оптимальных значений, сокращать надо менее мощные машины, и наоборот.

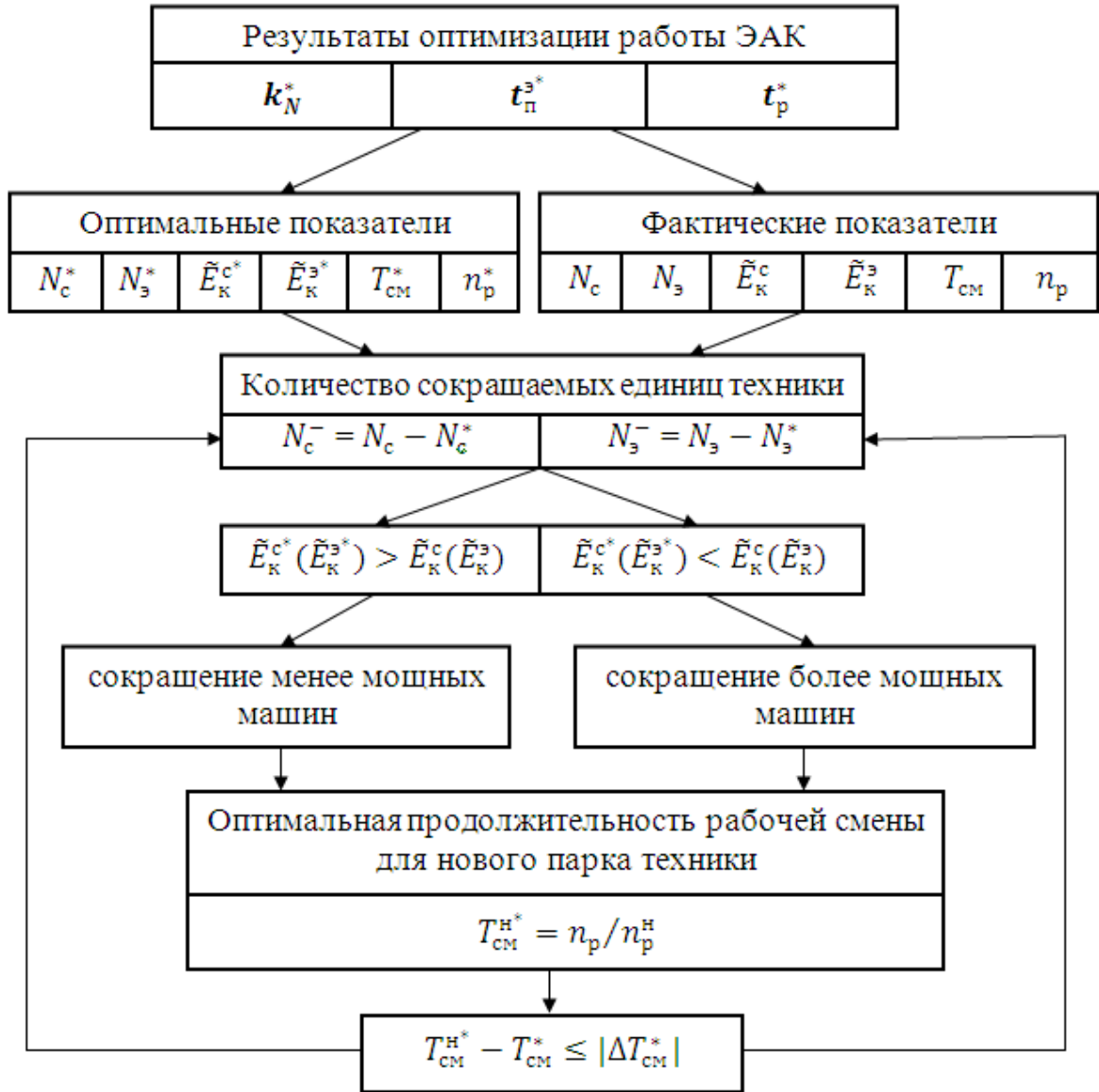


Рисунок 4 – Структурная схема формирования парков техники ЭАК с оптимальными параметрами

На схеме 4: k_N^* , $t_{п}^э$, t_p^* – оптимизированные параметры ЭАК; $\tilde{E}_K^c$, $\tilde{E}_K^э$ – средневзвешенные вместимости кузова самосвала и ковша экскаватора; N_c^- , $N_э^-$ – количество сокращаемых автосамосвалов и экскаваторов соответственно; $n_p^н$ – количество рейсов, выполненных несокращёнными самосвалами ЭАК (новый парк); $|\Delta T_{см}^*|$ – модуль оптимального диапазона изменения продолжительности рабочей смены $T_{см}^*$.

2. По формуле $T_{см}^н = n_p^н / n_p^н$, где $n_p^н$ – количество рейсов, выполненных несокращёнными самосвалами (новый парк), определяется оптимальная продолжительность рабочей смены для нового парка машин.

3. Производится сравнение оптимальных продолжительностей рабочей смены для старого и нового парков ($T_{см}^н - T_{см}^* \leq |\Delta T_{см}^*|$), где $|\Delta T_{см}^*|$ – модуль оптимального диапазона изменения $T_{см}^*$. Если неравенство выполняется, коррек-

тировка заканчивается; если не выполняется – число сокращаемых машин надо уменьшить.

4. В последующем скорректированные парки техники надо перераспределить по полям разреза (если их несколько) таким образом, чтобы новый парк машин на каждом поле обеспечивал погрузку и вывоз тех же объёмов горной массы, что и до корректировки (сокращения).

Очевидно таким же будет порядок формирования только проектируемых ЭАК. Он будет даже проще, поскольку можно будет сразу подбирать необходимые численность и структуру парков техники, а не подстраиваться под уже существующие парки.

В качестве разреза-аналога для сравнения фактических и оптимальных показателей работы ЭАК и необходимой корректировки парков техники выбран разрез «Талдинский», как наиболее близкий к оптимальному по численному составу экскаваторного и автотранспортного парков.

Разрез «Талдинский» относится к сложным для проектирования ЭАК предприятиям, поскольку вскрышные работы ведутся не на одном, а на трёх обособленных полях – Талдинском, Таёжном и Ерунаковском. При этом расстояния транспортирования различаются не только для каждого поля, но и для каждого типа самосвалов. Планируются также требуемые объёмы погрузки и перевозок для самосвалов каждого типоразмера на каждом поле.

Поскольку продолжительность рейса однозначно определяется дальностью транспортирования, а сокращение дальности транспортирования представляет при организации работы ЭАК (и для разреза в целом) наибольшие затруднения, продолжительность рейса самосвалов оставим равной фактическому значению для разреза «Талдинский». Оно составляет 28,2 мин, что попадает в указанный выше диапазон оптимальных значений (17,6 ÷ 28,8 мин). Для получения сопоставимых результатов суточные объёмы погрузки и перевозок также оставлены без изменения. Требуемая численность парков техники составляет 13 экскаваторов и 83 самосвала по оптимальному варианту, вместо 14 экскаваторов и 91 самосвала – по базовому, то есть имеется возможность сократить один экскаватор и 8 самосвалов. Предложен следующий вариант корректировки парков: удаляется один самосвал БелАЗ-75131 с Таёжного поля и 7 таких же самосвалов с Ерунаковского поля. Подлежащий сокращению один экскаватор (ЭКГ-12) удаляется с Таёжного поля, но вместо него с Ерунаковского поля перебрасывается экскаватор меньшего типоразмера (РС 1250SP-7).

В результате исследований установлено, что оптимизация параметров **позволяет сократить численность экскаваторного и автотранспортного парков (или увеличить производительность) ЭАК на 9%.**

Комплексный показатель качества работы оптимального ЭАК для условий разреза-аналога «Талдинский» составил $k^* = 1,100$ вместо фактического значения $k = 0,737$ (превышение 33%). Функциональный критерий при этом составляет $\lambda^* = 0,793$, что превышает аналогичный фактический показатель для разреза «Талдинский» ($\lambda = 0,704$) на 11,2%. Значение функционального критерия в данном случае хотя и отличается от оптимального значения $\lambda^0 = 1$, однако всё равно лучше фактического.

Общая расчётная экономия от сокращения численности экскаваторного и автотранспортного парков ЭАК разреза «Талдинский» при фактических объёмах погрузки и перевозок может составить 47,7 млн. рублей в год при соотношении 75 рублей за доллар.

Обобщая результаты выполненных исследований, можно определить уровень качества работы ЭАК, в которых реализованы рекомендации данного исследования. Показатели работы ЭАК разрезов (в сравнении с ЭАК разреза-аналога «Талдинский») приведены на рисунке 5. Здесь: $q_1(\Pi^3)$, $q_2(\Pi^c)$, $q_3(\vartheta_3)$, $q_4(k_{\text{пр}}^{\Sigma})$, $q_5(k_{\text{пр}}^{3-c})$, $q_6(k_p^3)$, $q_7(k_p^c)$ – уровни качества ЭАК по соответствующим единичным показателям (рисунок 1).

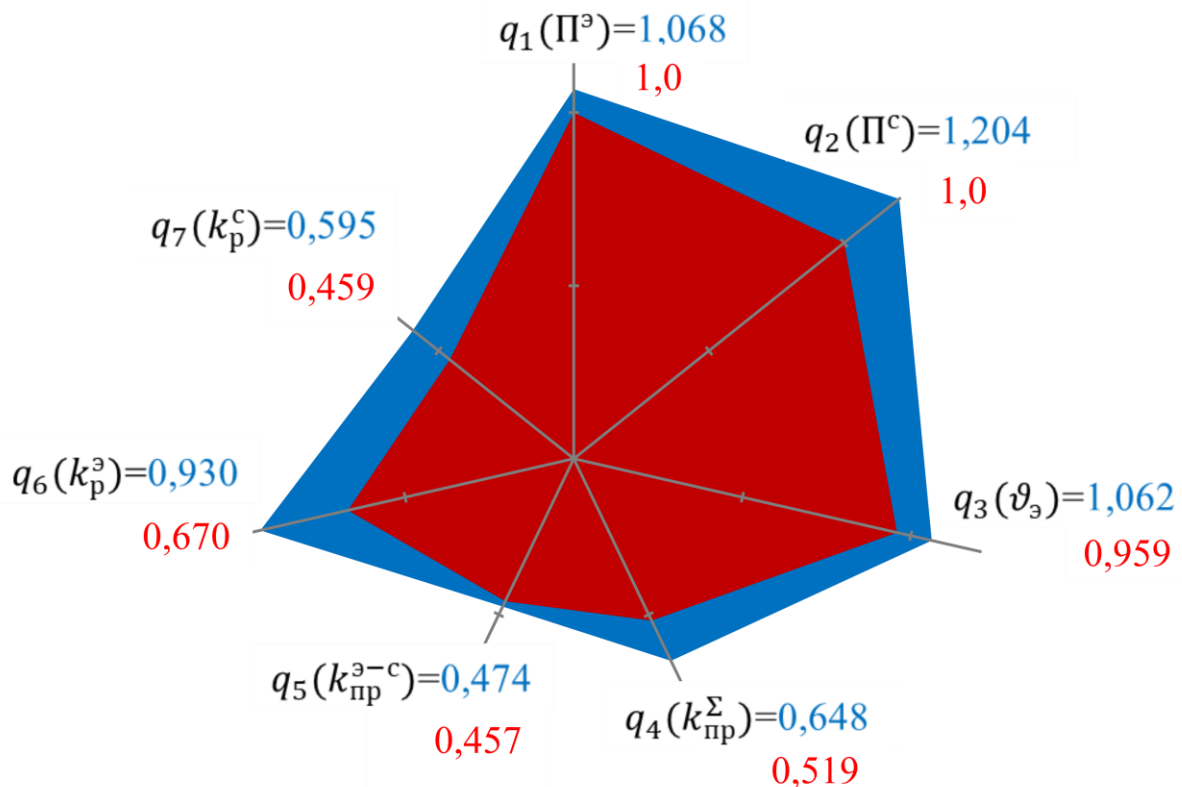


Рисунок 5 – Диаграммы единичных показателей качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов по результатам исследований (красным цветом – по фактическим данным разреза «Талдинский», синим – по результатам исследований)

Разработанные на основе проведённых исследований рекомендации по определению оптимальных параметров и показателей работы действующих и вновь проектируемых ЭАК, а также материалы по оценке качества функционирования ЭАК действующих предприятий переданы АО «УК «Кузбассразрезуголь» и НФ «КУЗБАСС-НИИОГР». Они могут быть использованы как механизм выбора из предлагаемой экскаваторной и автомобильной техники перспективных моделей, создания погрузочно-транспортных комплексов нового поколения с возможностью адаптации их к конкретным условиям эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится новое решение актуальной научной задачи оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов, позволяющее повысить качество их функционирования, что имеет существенное значение для развития теории и практики проектирования горных погрузочно-транспортных комплексов.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Анализом установлено, что эволюционный путь развития карьерных ЭАК, связанный с увеличением единичной мощности погрузочно-транспортной техники, не является приемлемым, так как это не обеспечивает соответствующего роста производительности ЭАК и улучшения показателей их использования. Для создания карьерных ЭАК высокого качества необходимо исходить из системного подхода к ЭАК как сложному техническому комплексу в составе общей горнотранспортной системы ОГР.

2. В результате произведенной сравнительной интегральной оценки уровня качества работы ЭАК действующих разрезов установлено, что перспективным направлением его повышения является оптимизация функционирования ЭАК, позволяющая установить и оптимально сбалансировать основные параметры ЭАК и реализовать их на стадиях проектирования и эксплуатации.

3. На основе системного подхода и методов интегральной оценки качества разработана математическая модель оптимизации работы ЭАК, которая позволяет установить оптимальные значения параметров, достижение которых обеспечивает оптимальный уровень качества работы действующих и вновь проектируемых ЭАК.

4. Исследованиями установлено, что для достижения оптимального уровня качества работы ЭАК действующих и вновь проектируемых разрезов необходимо обеспечить достижение значений параметров в диапазонах: количество самосвалов на один экскаватор – $4,9 \div 6,3$; время загрузки самосвала экскаватором – $3,2 \div 3,9$ мин; продолжительность рейса самосвала – $17,6 \div 28,8$ мин. Это позволяет либо повысить суточную выработку ЭАК, либо сократить численность автотранспортного и экскаваторного парков разреза на 9%. При изменении горнотехнических условий разрезов оптимальное решение может корректироваться.

5. Установлено, что обеспечение оптимального функционирования ЭАК как единой системы в составе разреза с учётом существующих оптимальных взаимосвязей параметров между собой является базой для синтеза оптимальных параметров ЭАК и формирования на их основе оптимальных парков погрузочно-транспортной техники.

6. Реализация научно-методических рекомендаций диссертационной работы позволяет повысить уровень качества работы ЭАК на 33% по сравнению с лучшим из ЭАК существующих разрезов, и на 53% – по сравнению с уровнем качества работы ЭАК УК «Кузбассразрезуголь» в целом. Эти рекомендации могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными и эксплуа-

тирующими организациями для выбора из предлагаемой экскаваторной и автомобильной техники перспективных моделей, создания карьерных погрузочно-транспортных комплексов нового поколения с возможностью адаптации их к конкретным условиям эксплуатации. Общая экономия от сокращения численности экскаваторного и автотранспортного парков ЭАК разреза «Талдинский» при фактических объёмах погрузки и перевозок может составить 47,7 млн. рублей в год.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Дальнейшие исследования в области оценки качества и оптимизации работы горных комплексов предполагается проводить по следующим направлениям:

1. Распространение проведенных исследований по функционированию ЭАК на добычные и смешанные работы.
2. Применение разработанных методик для исследования и оптимизации горных комплексов другого технологического назначения.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах автора:

– в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Воронов, Ан. Ю. Обоснование показателей качества функционирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, В. Л. Жданов, Ар. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 4 (144). С. 3-9.
2. Воронов, Ю.Е. Комплексная оценка технического уровня механического оборудования карьеров / Ю. Е. Воронов, А. В. Косолапов, **Ан. Ю. Воронов**, В. Г. Ромашко, Ар. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 4 (144). С. 26-33.
3. Воронов, Ан. Ю. Оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, А. В. Буянкин, Ар. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 2 (148). С. 19-26.
4. Воронов, Ан. Ю. Математическая модель оптимизации работы карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / Ан. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 2 (148). С. 13-18.
5. Воронов, Ан. Ю. Оптимизация показателей функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по критерию качества / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, В. Г. Ромашко, Ар. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 6 (152). С. 19-24.
6. Воронов, Ан. Ю. Сравнительная оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов в летний и переходный периоды года / Ан. Ю. Воронов, Ю. Е. Воронов, В. Г. Ромашко, Ар. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 2 (154). С. 11-16.

– в изданиях, индексируемых в международных базах:

7. Voronov, Yu. Quality Criterion of the Loading and Transport System Operation at Open-Pit Mines / Yu. Voronov, **An. Voronov**, Ar. Voronov. // The IVth International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2019. E3S Web of Conferences, Volume 105, 01048.

8. Voronov, An. Operation Quality Indicators for Shovel-Truck Systems at Open-Pit Coal Mines / An. Voronov, Yu. Voronov, Ar. Voronov, N. Demirel. // The IVth International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2019. E3S Web of Conferences, Volume 105, 01058.

9. Voronov Yuri. Assessment and prospects for improving the technical level of surface mining machines / Yuri Voronov, Sergey Grishin, Artyom Voronov, Vladimir Romashko, **Anton Voronov** // The Vth International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2020. E3S Web of Conferences, Volume 174, 03014.

– в прочих изданиях:

10. Воронов, Ю. Е. Функциональный критерий качества функционирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / Ю. Е. Воронов, А. А. Хорешок, **Ан. Ю. Воронов**, Н. А. Стенина, Ар. Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 3 (133). С. 54-60.

11. Воронов, Ан. Ю. Об оптимальном проектировании карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, Ар. Ю. Воронов // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сб. материалов III Международной научно-практической конференции, 11-17 октября 2019 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». Кемерово, 2019. С. 238-240.

12. Воронов, Ю. Е. Характеристика экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса / Ю. Е. Воронов, **Ан. Ю. Воронов**, Р.В. Ожогин, А.В. Карин, Ар. Ю. Воронов // Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая», 24-27 апр. 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». Кемерово, 2020. 52602.1-7.

13. Воронов, Ю. Е. Влияние комбинированного цикла работы самосвалов на качество функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов / Ю. Е. Воронов, В. Г. Ромашко, **Ан. Ю. Воронов**, Ар. Ю. Воронов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России [Электронный ресурс]: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. С. 72-77.

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

[2], [8], [9], [13] – исследование условий работы ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезуголь» и формирование требований к качеству их работы;

[1], [3], [7], [10], [11] – обоснование и определение функционального критерия и номенклатуры показателей качества работы ЭАК, проведение расчётов и анализ результатов;

[5], [6], [12] – математическое моделирование целевой функции и ограничений, анализ результатов оптимизации параметров ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезуголь».

Подписано в печать _____. 2022 г.

Формат 60х84 1/6. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Объём 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № ____

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.