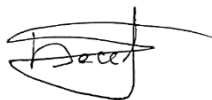


На правах рукописи

Бессонов Александр Евгеньевич



**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ КАРЬЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЭКСКАВАТОРА КАК ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Репин Сергей Васильевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра наземных транспортно-технологических машин, профессор;

Кузиев Дильшад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2025 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные технические карьерные электрические экскаваторы, широко используемые в горнодобывающей промышленности, характеризуются возрастающей конструктивной сложностью и увеличением функциональных возможностей, что закономерно предъявляет повышенные требования к квалификации операторов. В связи с этим особую значимость приобретает исследование эргатических систем, отражающих взаимодействие оператора и технологического оборудования. Анализ данных систем позволяет выявить ключевые факторы, определяющие эффективность их функционирования, включая уровень профессиональной подготовки оператора и специфику его производственной деятельности, что является основой для разработки методик рационального управления техническими комплексами.

Однако существует несоответствие между возросшей конструктивной сложностью машин и существующей системой организации деятельности операторов. Несоответствие технической сложности оборудования и квалификации оператора приводит к снижению производительности оборудования в открытых горных работах на 20%. Указанное расхождение проявляется в снижении фактической производительности, увеличении вероятности внезапных отказов и сокращении срока службы оборудования. Таким образом, обоснование рациональных режимов работы карьерного электрического экскаватора как эргатической системы является актуальной научной задачей, направленной на разработку методов согласования действий оператора с функциональными возможностями современного комплекса.

Степень разработанности темы исследования

Решению вопросов повышения эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов посвящены работы ученых: Андреевой Л.И., Анистратова К.Ю., Боярских Г.А., Великанова В.С., Домбровского Н.Г., Евтюкова С. А., Иванова С.Л., Ивановой П.В., Кантовича Л.И., Комиссарова А.П., Коха П.И., Лагуновой Ю.А., Махно Д.Е., Морозова В.И., Подэрни Р.Ю., Потапова М.Г., Рахутина М.Г., Репина С.В.,

Русихина В.И., Шадрина А.И., Шибанова Д.А., Хажиева В.А. Хорешка А.А. и др.

Несмотря на значительный массив теоретических и экспериментальных исследований, ориентированных на повышение производительности и надёжности карьерных электрических экскаваторов, степень изученности эргатической системы и её комплексного влияния на эксплуатационные характеристики оборудования остаётся недостаточной. Отсутствие комплексного подхода к исследованию этих взаимодействий затрудняет формирование научно обоснованных рекомендаций по привлечению неиспользуемых резервов, что актуализирует необходимость дальнейших исследований, направленных на повышение ресурсных и технико-экономических характеристик оборудования.

Объект исследования – процесс управления экскаватором при выполнении технологической операции добычи.

Предмет исследования – рабочий цикл карьерного электрического экскаватора.

Цель работы – сокращение фактического времени цикла и повышение энергоэффективности карьерного электрического экскаватора с учетом особенностей функционирования в рамках системы «оператор-машина».

Идея заключается в использовании резервов системы управления за счет формирования комплексного подхода к оценке эксплуатационной эффективности карьерного электрического экскаватора, основанного на использовании показателей суммарных энергозатрат и продолжительности рабочего цикла.

Задачи исследования:

1. Систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.
2. Провести оценку влияния эргатической системы на эксплуатационные характеристики карьерного электрического экскаватора.
3. Обосновать критерии комплексной оценки текущего уровня квалификации оператора экскаватора, с учетом показателей суммарных энергозатрат и продолжительности рабочего цикла.
4. Провести экспериментальные исследования на тренажерном комплексе карьерного электрического экскаватора ЭКГ-18Р для

выявления зависимости основных эксплуатационных характеристик оборудования от уровня квалификации оператора.

Научная новизна работы:

1. Выявлены закономерности динамики рабочего цикла карьерного электрического экскаватора в системе «оператор-машина» на основе математической модели, позволяющей количественно оценить временные резервы управления.

2. Установлены зависимости между уровнем квалификации оператора и эффективностью функционирования экскаватора на основе показателей, отражающих реализацию потенциала оборудования.

Соответствие паспорту специальности. Тема исследования соответствует пункту – 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах» области исследования паспорта научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель продолжительности рабочего цикла, обосновывающая динамику эргатической системы с выявлением временных резервов.

2. Обосновано использование показателей, учитывающих суммарные энергозатраты и продолжительность рабочего цикла, в совокупности представляющие инструмент для теоретической оценки уровня квалификации оператора и реализации потенциала оборудования.

3. Зарегистрирована программа для определения показателей эргатической системы карьерного электрического экскаватора: свидетельство о гос. регистрации № 2025615717 РФ;

4. Получен акт внедрения результатов исследования в деятельность ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова» (акт внедрения от 04.06.2025 г.).

Методология и методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований, включая аналитическое исследование и моделирование параметров

рабочего цикла карьерного электрического экскаватора, проведение экспериментов по установлению зависимости параметров эксплуатационной эффективности оборудования от уровня квалификации оператора. В рамках экспериментального исследования использован полноразмерный тренажёрный комплекс, разработанный на основе конструкции экскаватора ЭКГ-18Р/20К и предназначенный для отработки практических навыков управления технологическим оборудованием в условиях, приближённых к реальной производственной обстановке. Комплекс обеспечивает возможность моделирования различных режимов экскавации и разгрузки, включая выполнение операций с породами разных категорий, а также тренировку поведения оператора в нестандартных и потенциально аварийных ситуациях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Снижение фактического времени рабочего цикла карьерного электрического экскаватора на 30% и приближение его к нормативному значению достигается повышением квалификации оператора, что указывает на наличие устойчивых временных резервов, определяющих потенциал повышения эксплуатационной эффективности оборудования.

2. Комплексная оценка уровня квалификации оператора на тренажере ЭКГ-18Р, при значениях коэффициентов энергоэффективности ($K_e \geq 0,9$), управления операцией копания ($K_{y1} \geq 0,7$), операциями поворота и опускания с полным и пустым ковшом ($K_{y2}, K_{y3} \geq 0,6$), является допуском к работе на производстве.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием апробированных методов математического и имитационного моделирования, а также строгим соблюдением принципов постановки цели и задач исследования. Теоретические положения работы базируются на достоверных исходных данных и подтверждаются соответствием с результатами ранее опубликованных исследований по рассматриваемой тематике. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается достаточным объемом репрезентативной статистической информации.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и

конференциях: Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. VI Международная научно-практическая конференция (г. Кемерово, 2022 год); XX и XXI Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека (г. Екатеринбург, 2022, 2023 г.); Ежегодная научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2023 год); Современные проблемы машиностроения XVI Международная научно-техническая конференция (г. Томск, 2023 год).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении теоретических и экспериментальных исследований; разработке математической модели рабочего цикла карьерного электрического экскаватора с учетом эргатической системы «оператор-машина»; формулировании комплексного подхода к оценке эффективности функционирования карьерного электрического экскаватора, основанного на использовании показателей энергозатрат и продолжительности рабочего цикла, а также в выявлении закономерностей динамики исследуемой системы и взаимосвязей между квалификацией оператора и эффективностью её функционирования; подготовке научных публикаций по результатам исследования.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, и 6 приложений. Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 20 рисунков и 6 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» за предоставленную возможность проведения исследований и ценные профессиональные консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности аспекты эксплуатации карьерных электрических экскаваторов в условиях открытых горных работ. Проанализирован комплекс факторов, влияющих на эксплуатационную эффективность и надёжность карьерных экскаваторов, включая горно-геологические условия, параметры забоя, конструктивно-технологические особенности оборудования, организацию производственного процесса, уровень технического обслуживания, а также эргатическую систему. Выполнена систематизация существующих подходов к классификации и оценке параметров экскаваторов с учётом их роли в производственном процессе. Отмечено, что взаимодействие оператора с машиной оказывает существенное влияние на стабильность и результативность работы оборудования. Обоснована актуальность дальнейших исследований, направленных на комплексную оценку эффективности эксплуатации с учётом системы «оператор-машина». Поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования, направленные на формализацию процессов в эргатической системе «оператор-машина» и определение путей повышения эффективности её функционирования за счёт учета влияния характеристик деятельности оператора на структуру и параметры рабочего цикла. Дано описание разработанной математической модели, в которой отражены этапы рабочего цикла экскаватора с учётом возможности совмещения отдельных операций. На основе анализа выявлены ограничения существующих подходов к оценке эффективности взаимодействия оператора с карьерным электрическим экскаватором. Сформулирована структура комплексного подхода к оценке профессиональной

подготовки оператора, включающий временные и энергетические характеристики рабочего цикла, что позволило выявить внутренние резервы эргатической системы «оператор–машина» и обосновать диапазоны повышения эффективности эксплуатации оборудования с учетом использования резервов системы.

В третьей главе представлена программа экспериментальных исследований, направленных на количественную оценку влияния подготовки операторов на параметры функционирования эргатической системы. Приведена методика организации тренировочного процесса с использованием специализированного тренажёрного комплекса, обеспечивающего воспроизведение типовых условий работы и регистрацию телеметрических данных. Сформированы критерии отбора участников, структура упражнений и перечень регистрируемых параметров, включая энергетические и временные показатели, а также особенности функционирования рабочего оборудования. Построена классификация ошибок по степени критичности и прослежены этапы формирования устойчивых профессиональных навыков. Полученные данные используются для последующей верификации моделей и оценки уровня подготовки операторов в производственных условиях.

В четвертой главе изложены результаты обобщения и интерпретации экспериментальных данных, полученных в ходе верификации теоретических положений. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что структура рабочего цикла эргатической системы «оператор–машина» содержит существенные временные и энергетические резервы. Выявлена взаимосвязь между уровнем профессиональной подготовки оператора и качеством управления карьерным экскаватором. Показана эффективность использования комплексного критерия, сформированного на базе штатной информационно-диагностической системы, для оценки уровня профессиональной подготовки. Полученные данные подтверждают реализацию производственного потенциала экскаватора при должном уровне управления и открывают перспективы для дальнейшей автоматизации процессов контроля и обучения операторов.

В заключении приводятся основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых научных положениях:

1. Снижение фактического времени рабочего цикла карьерного электрического экскаватора на 30% и приближение его к нормативному значению достигается повышением квалификации оператора, что указывает на наличие устойчивых временных резервов, определяющих потенциал повышения эксплуатационной эффективности оборудования.

Проанализирована математическая модель продолжительности рабочего цикла, для прогнозирования рационального использования карьерного электрического экскаватора в зависимости от условий его эксплуатации. Предлагаемый подход учитывает влияние эргатической системы на каждом этапе технологического процесса, обеспечивая целостное представление о распределении временных затрат и их зависимости от характера взаимодействия оператора с машиной, что позволяет учесть влияние нерациональных режимов управления, возникающих вследствие недостаточной квалификации оператора. С учётом этих факторов математическая модель рабочего цикла оператора (1):

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{кп}} + t_{\text{пов}} + t_{\text{оп}} + t_{\text{в}} + t_{\text{пов.х}} + t_{\text{оп.х}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{кп}}$ – суммарное время копания горной массы; $t_{\text{пов}}$ – время поворота платформы к самосвалу; $t_{\text{оп}}$ – время опускания ковша к кузову самосвала; $t_{\text{в}}$ – время выгрузки ковша; $t_{\text{пов.х}}$ – время поворота с пустым ковшом к началу забоя; $t_{\text{оп.х}}$ – время опускания ковша к началу забоя.

С ростом уровня квалификации оператор совмещает операции поворота и опускания ковша, благодаря чему достигается номинальное значение времени рабочего цикла (2).

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{кп}} + t_{\text{пов}} + t_{\text{в}} + t_{\text{пов.х}}. \quad (2)$$

В выражении (2) отражается существующее совмещение операций поворота и опускания ковша к самосвалу, а также поворота с порожним ковшом и его опускания к началу забоя. На рисунке 1 отражены траектории движения ковша при последовательной (пунктирная) и параллельной работе (штриховая), отражающие эргатические

процессы при добыче полезных ископаемых, что является рациональным режимом управления.

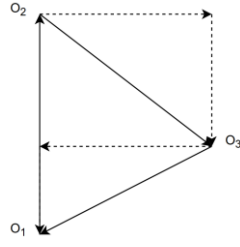


Рисунок 1 – Траектория движения ковша экскаватора: O_1 – точка начала копания; O_2 – точка окончания копания; O_3 – точка выгрузки материала в кузов самосвала

Исходя из представленных различий математическая модель полного времени цикла экскаватора, с учетом работы и мощности соответствующих приводов (3):

$$t_{\text{ц}} = \frac{A_k + A_{\text{п}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}} + k_y N_{\text{нап}}\eta_{\text{под}}} + \frac{A_{\text{пов}}}{N_{\text{пов}}\eta_{\text{пов}}} + \frac{A_{\text{оп}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}}} + t_{\text{в}} + \frac{A_{\text{пов.х}}}{N_{\text{пов}}\eta_{\text{пов}}} + \frac{A_{\text{оп.х}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}}}, \quad (3)$$

где A_k – работа при копании; $A_{\text{п}}$ – работа при подъеме; $A_{\text{пов}}$ – работа при повороте ковша к самосвалу, $A_{\text{оп}}$ – работа при опускании ковша к самосвалу; $A_{\text{пов.х}}$ – работа при повороте ковша к забою; $A_{\text{оп.х}}$ – работа при опускании ковша к началу забоя; $N_{\text{под}}$ – суммарная мощность приводов подъема; $N_{\text{пов}}$ – мощность привода поворота; $N_{\text{нап}}$ – мощность привода напора; η – КПД приводов; k_y – коэффициент участия привода напора при копании и подъеме.

В приведенном выражении (3) не учитывается работа на удержание ковша при повороте, так как это вспомогательная операция, которая происходит параллельно основной и не влияет на продолжительность времени цикла работы оборудования.

Для анализа времени рабочего цикла целесообразно представить работу, совершаемую на каждом этапе, в развернутом виде. Данная формализация обеспечивает строгость и наглядность анализа, поскольку позволяет учесть реальные условия эксплуатации и конструктивные особенности экскаватора (4):

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{рз}} q k_{\text{з}} k_{\text{уд.э}} + (q k_{\text{н}} Y_{\text{с}} + m_{\text{к}} g) H_{\text{к}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}} + k_y N_{\text{нап}}\eta_{\text{под}}} + \frac{k_{\text{всп.э}} (m_{\text{пп}} + m_{\text{к}} + m_{\text{г}}) r^2 \varepsilon \varphi}{N_{\text{пов}}\eta_{\text{пов}}} + \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{г}}) g H_{\text{к}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}}} + t_{\text{в}} + \frac{k_{\text{всп.э}} (m_{\text{пп}} + m_{\text{к}}) r^2 \varepsilon \varphi}{N_{\text{пов}}\eta_{\text{пов}}} + \frac{m_{\text{к}} g H_{\text{к}}}{N_{\text{под}}\eta_{\text{под}}}, \quad (4)$$

где k_z – коэффициент заполнения ковша; m_e – масса породы; r – радиус центра масс поворотных частей экскаватора; H_k – высота забоя; H_c – высота самосвала; q – вместимость ковша; m_k – масса ковша; m_{nn} – масса поворотной платформы; Y_s – объемный вес грунта; $k_{уд.э}$, k_{pz} – коэффициент сопротивления копанью и разрыхления грунта соответственно; ε – угловое ускорение платформы; $k_{ссп.э}$ – безразмерный экспериментальный коэффициент на вспомогательные операции позиционирования ковша; φ – угол поворота платформы для выгрузки ковша; g – ускорение свободного падения.

В качестве базовой машины в исследовании использовался карьерный экскаватор ЭКГ-18Р, эксплуатируемый в номинальных условиях: порода III категории по сложности экскавации с предварительным рыхлением взрывом, коэффициент наполнения равен 1, вместимость ковша 18 м³, высота забоя 15 м, номинальное время цикла 27 с. Для транспортировки горной массы использовался самосвал БЕЛАЗ 75306. На основе математической модели продолжительности рабочего цикла экскаватора проведён анализ при различных значениях коэффициента заполнения ковша (от 0,6 до 1,2) для двух сценариев (рисунок 2): параллельное (совмещённое) выполнение (2); последовательное выполнение операций (1).

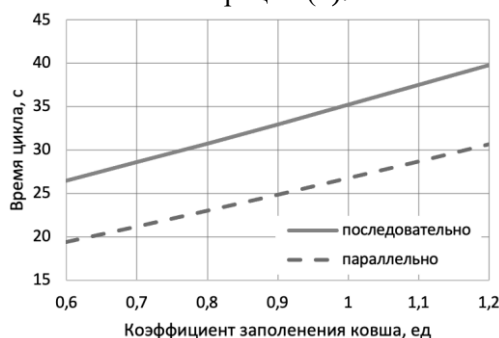


Рисунок 2 – Время рабочего цикла двух стилей управления оборудованием относительно коэффициента заполнения ковша

Конструкция карьерного электрического экскаватора, независимые привода поворота, подъема, напора позволяют выполнять параллельно этапы поворота и опускания ковша в рабочем цикле экскаватора. Совмещение операций используется при расчете времени

цикла работы и указывается в технической документации к оборудованию. Такой подход не учитывает особенности эргатической системы, что может привести к увеличению времени цикла в среднем на 30% в зависимости от коэффициента заполнения ковша.

Приведенная модель рабочего цикла карьерного электрического экскаватора (1) применяется для расчёта временных характеристик, оценки потенциальных резервов продолжительности цикла и анализа эксплуатационной эффективности экскаватора, что формирует теоретическую базу для дальнейшего совершенствования горно-технологических процессов и повышения результативности операторской деятельности.

2. Комплексная оценка уровня квалификации оператора на тренажере ЭКГ-18Р, при значениях коэффициентов энергоэффективности ($K_e \geq 0,9$), управления операцией копания ($K_{y1} \geq 0,7$), операциями поворота и опускания с полным и пустым ковшом ($K_{y2}, K_{y3} \geq 0,6$), является допуском к работе на производстве.

Временная составляющая предложенного комплексного подхода предназначена для оценки уровня квалификации оператора и эффективности эксплуатации карьерных электрических экскаваторов. В рамках существующих методик, аналогично методике Коха, используется временной коэффициент управления K_y , определяемый как отношение номинальной продолжительности рабочего цикла t_n , с учетом безразмерного коэффициента k_c , характеризующего условия эксплуатации оборудования, к фактической продолжительности рабочего цикла t_ϕ (5):

$$K_y = k_c t_n / t_\phi. \quad (5)$$

Номинальное время рабочего цикла t_n характеризуется номинальными условиями эксплуатации и как правило, рассчитываемое производителем оборудования. Безразмерный коэффициент, характеризующий условия эксплуатации, k_c определяется как (6):

$$k_c = t_T / t_n. \quad (6)$$

где t_c – теоретическое время рабочего цикла оборудования, может быть рассчитано с учетом параллельного выполнения операций (2), и условий эксплуатации, либо задаётся эмпирически как минимальное

значение, зафиксированное при эксплуатации экскаватора данного типа в реальных условиях.

Такой подход не учитывает специфику этапов технологической операции добычи. Использование коэффициентов управления непосредственно в каждом этапе рабочего цикла учитывает систему «оператор-машина» в рамках метода расчета с последовательными операциями (1). Коэффициенты управления подразделяются на: K_{y1} – коэффициент управления операцией копания и подъема по времени (7, 10); K_{y2} , K_{y3} – коэффициенты управления операциями поворота – опускания полного (8) и порожнего ковша (9) по времени соответственно.

$$K_{y1} = k_{кп.с} \frac{t_{кп.н}}{t_{к.ф}}, \quad (7)$$

$$K_{y2} = 1 - \frac{(t_{пов.ф.с} - t_{пов.н})}{t_{оп.н}}, \quad (8)$$

$$K_{y3} = 1 - \frac{(t_{пов.х.ф.с} - t_{пов.х.н})}{t_{оп.х.н}}, \quad (9)$$

$$k_{кп.с} = \frac{t_{кп.т}}{t_{кп.н}}, \quad (10)$$

где $t_{кп.н}$ – номинальное время на копание и подъем, $t_{к.ф}$ – фактическое время на копание и подъем, $k_{кп.с}$ – безразмерный коэффициент, характеризующий условия эксплуатации оборудования, $t_{кп.т}$ – теоретическое время на копание и подъем, с учетом условий эксплуатации, $t_{пов.ф.с}$ – фактическое время на поворот и опускание ковша к самосвалу, с, $t_{пов.н}$ – номинальное время на поворот ковша к самосвалу, $t_{оп.н}$ – номинальное время на опускание ковша к самосвалу, $t_{пов.х.ф.с}$ – фактическое время на возврат ковша к началу забоя, $t_{пов.х.ф.н}$ – номинальное время на поворот ковша к началу забоя, $t_{оп.х.н}$ – номинальное время на опускание ковша к началу забоя.

Таким образом добавив коэффициенты управления по времени в формулу продолжительности рабочего цикла с последовательным ходом этапов добычи (2) получим (11):

$$t_{ц} = \frac{1}{K_{y1}} t_{кп} + t_{пов} + (1 - K_{y2}) t_{оп} + t_{в} + t_{пов.х} + (1 - K_{y3}) t_{оп.х} \quad (11)$$

На основе предложенной методики, наличие коэффициентов управления, характеризующих каждый этап технологического процесса, позволяет проводить оценку эффективности эксплуатации

оборудования. В случае, если значения коэффициентов K_{y1} , K_{y2} и K_{y3} больше единицы ($K_{y2}, K_{y3} > 1$) происходит выполнение действий с опережением расчетного цикла. Однако в этом случае требуется дополнительный анализ с использованием параметра энергозатрат, представленного также в этом исследовании. Если значения коэффициентов в диапазоне от нуля до единицы ($0 < K_{y1}, K_{y2}, K_{y3} < 1$) наблюдается частичная последовательность выполнения операций поворота и опускания ковша, что свидетельствует о недостаточной синхронности и потребности в корректировке режима работы оборудования. При значениях коэффициентов меньше нуля ($K_{y1}, K_{y2}, K_{y3} < 0$) – значительные временные потери в производственном цикле и наличие простоев оборудования между операциями.

Второй составной частью комплексного подхода, является показатель энергоэффективности эксплуатации карьерного электрического экскаватора. Учет энергетической составляющей обусловлен необходимостью полного анализа использования потенциала оборудования, поскольку продолжительность рабочего цикла не позволяет в полной мере оценить эффективность процесса.

Для количественной оценки энергоэффективности предложен энергетический критерий K_e , который определяется отношением фактического количества затрачиваемой энергии E_f в процессе выемки горной массы в текущих эксплуатационных условиях к теоретическому количеству затрачиваемой энергии E_t , рассчитанной с учетом условий эксплуатации и совмещения этапов добычи (12):

$$K_e = E_f / E_t. \quad (12)$$

Аналитически количество затрачиваемой (E_t) энергии можно получить, основываясь на формуле продолжительности цикла работы карьерного электрического экскаватора с учетом последовательного выполнения этапов добычи (13):

$$E_t = A_k + A_{\Pi} + A_{\text{пов}} + A_{\text{оп}} + A_{\text{пов.х}} + A_{\text{оп.х}}, \quad (13)$$

Использование энергетического критерия K_e позволяет выявлять резервы энергоресурсов, в зависимости от индивидуальных навыков оператора и особенностей его управления рабочим процессом. При $K_e < 1$ потенциал оборудования используется не полностью.

Вследствие чего на получение одного и того же количества продукции необходимо большее количество циклов. $K_e > 1$ свидетельствует о перегрузе ковша и вероятности работы экскаватора с негабаритом. Совместный анализ энергетических и временных показателей процесса позволяет комплексно подходить к рациональному режиму управления карьерным электрическим экскаватором и вырабатывать рекомендации, направленные как на сокращение продолжительности рабочего цикла, так и на повышение использования потенциала оборудования.

Для подтверждения результатов аналитических исследований была проведена серия экспериментов на тренажёрном комплексе ЭКГ-18Р/20К. Параметры добычи соответствовали расчётным данным, представленным выше. В ходе эксперимента проводилось обучение операторов, с установленной периодичностью выполнялись экзаменационные упражнения, в ходе которых фиксировались показатели работы операторов, включая время выполнения цикла, производительность, а также количество и характер ошибок, потенциально приводящих к поломкам оборудования. Результаты обучения представлены на рисунке 3.

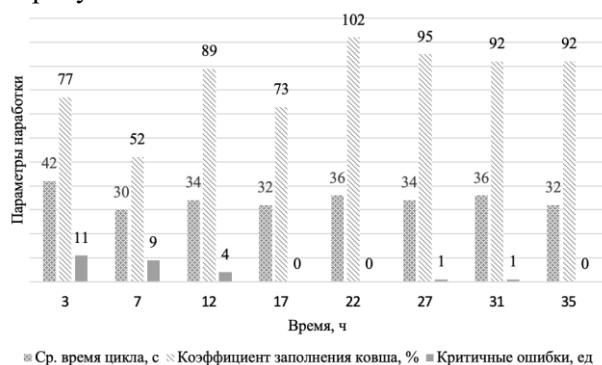


Рисунок 3 – Параметры наработки от времени обучения

В эксперименте принимало участие 15 операторов карьерных гусеничных экскаваторов различных моделей (за исключением ЭКГ 18Р), отобранных по критерию не менее пяти лет практического опыта. Средний стаж работы участников на аналогичной технике составил 10 лет, что обеспечило высокую репрезентативность выборки

для анализа процессов профессионального обучения. Согласно данным, представленным на рисунке 3, количество ошибок снизилось до нуля после 17 ч обучения, а коэффициент заполнения ковша достиг значений выше 0,9. После 27 часа обучения темп прироста производительности замедляется, приближаясь к предельным значениям. Результаты эксперимента подтверждают эффективность тренажёрной подготовки и позволяют выделить рубеж в 20–22 ч как минимально необходимый для формирования устойчивого и безопасного навыка управления экскаватором в условиях моделируемой производственной среды.

На основе результатов эксперимента был произведен расчет критериев комплексного подхода к оценке квалификации операторов (рисунок 4).

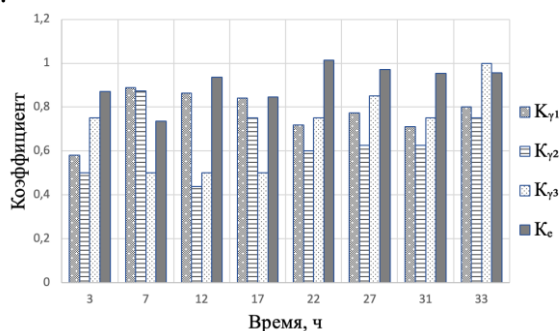


Рисунок 4 – Изменение коэффициентов оценки квалификации оператора по времени. Коэффициенты: K_e – энергоэффективности; K_{y1} – управления операцией копания; K_{y2} , K_{y3} – управления операциями поворота и опускания с полным и порожним ковшом

Анализ тренда изменения коэффициентов (рисунок 4) показал, что на начальном этапе обучения у операторов отмечается низкий уровень устойчивости и координации действий, о чём свидетельствуют значения K_{y1} , K_{y2} и K_{y3} . Последовательный рост значений коэффициентов отражает формирование устойчивых навыков моторики и повышение согласованности операций в процессе управления. Рост коэффициента энергоэффективности K_e указывает на прогрессивное освоение рациональных приёмов копания. Совокупный рост значений коэффициентов подтверждает высокую чувствительность предложенных метрик к уровню подготовки оператора.

Существенным практическим преимуществом предлагаемого комплексного подхода является возможность его расчёта средствами штатной информационно-диагностической системы (IDS) экскаватора без привлечения сторонних измерительных комплексов, что обеспечивает оперативность анализа, минимизацию дополнительных затрат и удобство применения критерия на производстве. Что позволяет использовать комплексный подход для мониторинга профессионального развития оператора.

На основе комплексной методики оценки эксплуатационной эффективности функционирования экскаватора, была разработана программа для ЭВМ для расчёта ключевых показателей работы экскаватора на основании исходных данных, охватывающих как конструктивные характеристики экскаватора, так и условия применения. Программный комплекс позволяет оперативно оценивать эффективность работы оборудования, прогнозировать производственные результаты и формировать рекомендации по установлению рациональных режимов эксплуатации экскаватора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований в диссертации разработаны новые научно обоснованные технические решения, направленные на сокращение фактического времени рабочего цикла и повышение энергоэффективности карьерного электрического экскаватора с учётом особенностей функционирования в системе «оператор-машина», что обеспечивает повышение эксплуатационной эффективности оборудования и совершенствование рабочих процессов.

По результатам выполнения диссертационного исследования сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнена систематизация и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по влиянию эргатической системы «оператор-машина» на эксплуатационные характеристики карьерных электрических экскаваторов. Установлено, что недостаточная квалификация оператора является причиной значительных резервов производительности оборудования, выраженных во временных и энергетических показателях рабочего цикла.

2. В ходе анализа оценки влияния эргатической системы на эксплуатационные характеристики карьерного электрического экскаватора установлено, что при недостаточной квалификации оператора

время рабочего цикла увеличивается на 30% относительно номинального значения за счёт недостаточного совмещения операций поворота и опускания ковша.

3. Обоснован комплексный подход к оценке текущего уровня квалификации оператора карьерного электрического экскаватора на основе показателей суммарных энергозатрат и продолжительности рабочего цикла с учетом коэффициентов: энергоэффективности – $K_e \geq 0,9$; управления операцией копания – $K_{y1} \geq 0,7$; управления операциями поворота и опускания с полным и пустым ковшом – $K_{y2}, K_{y3} \geq 0,6$ соответственно.

4. Экспериментальные исследования на тренажёрном комплексе карьерного электрического экскаватора ЭКГ-18Р подтвердили теоретические выводы о наличии устойчивых зависимостей между уровнем квалификации оператора и эксплуатационными характеристиками оборудования. Установлено, что повышение квалификации операторов приводит к сокращению продолжительности рабочего цикла, уменьшению числа ошибок и стабилизации коэффициента заполнения ковша, что свидетельствует о реализации производственного потенциала оборудования и готовности операторов к эксплуатации реальных машин.

5. Комплексный критерий определяется на базе штатной информационно-диагностической системы (IDS) экскаватора, что обеспечивает текущий анализ, минимизацию дополнительных затрат и удобство применения критерия в реальных производственных условиях.

6. Зарегистрирована программа для определения показателей эргатической системы карьерного электрического экскаватора: свидетельство о гос. регистрации № 2025615717 РФ.

7. Результаты диссертации использованы в деятельности компании ООО «ИЗ-КАРТЕКС им. П. Г. Коробкова» по повышению уровня квалификации операторов на тренажёрном комплексе карьерного электрического экскаватора с учетом анализа эргатической системы (Акт о внедрении от 04.06.2025, номер 01121/25-9273).

8. Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является автоматизация процессов управления карьерным экскаватором с элементами искусственного интеллекта.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Бессонов, А. Е.** Влияние эргатической системы на время рабочего цикла карьерного электрического экскаватора / А. Е. Бессонов, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 136–141. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-136-141.

2. **Бессонов, А. Е.** Анализ уровня квалификации оператора карьерного электрического экскаватора по показателям наработки / А. Е. Бессонов, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов, П. В. Шишкин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 21. – С. 111-116. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-21-111-116.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Mikhailov, A.V. Comprehensive assessment production efficiency of electric rope shovel through operator qualification criteria / A.V. Mikhailov, D.A. Shibarov, **A.E. Bessonov**, C. Bouguebrine // International Journal of Engineering – Transactions A: Basics. – 2024. – V. 37. – No. 7. – pp. 1231-1238. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.03.

4. Михайлов, А.В. Детерминированная модель рабочего цикла карьерного гусеничного экскаватора и анализ критериев управления / А.В. Михайлов, Д.А. Шибанов, **А.Е. Бессонов** // Горный журнал. – 2025. – № 5. – С. 44-51. DOI: 10.17580/gzh.2025.05.07.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615717 Российская Федерация. Программа определения комплексного показателя производственной эффективности карьерных электрических экскаваторов. Заявка №2025612877: заявл. 19.02.2025; опубл. 07.03.2025/ А.В. Михайлов, Д.А. Шибанов, **А.Е. Бессонов**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1с.